

ДЕПАРТАМЕНТ ОБРАЗОВАНИЯ И МОЛОДЕЖНОЙ ПОЛИТИКИ
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ

БУ ВО «СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СЕВЕР РОССИИ: СТРАТЕГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

*Материалы II Всероссийской
научно-практической конференции
27 мая 2016 г.*

Том II

**Сургут
2016**

УДК 001(063)
ББК 72
С28

Редакционная коллегия:

О. Г. Литовченко, д. биол. н., профессор; В. А. Галкин, д. физ.-мат. н., профессор;
В. А. Острейковский, д. тех. н., профессор; В. С. Микшина, к. тех. н., доцент; И. М. Галиев,
к. физ.-мат.н.; В. В. Рыжаков, к. физ.-мат. н.; В. В. Кулдошина, к. тех. н.; Д. А. Голдобин,
к. тех. н., доцент; Д. Ю. Мартынова, к. тех. н.; А. В. Ельников, д. физ.-мат. н., доцент;
Г. Н. Исаков, д. тех. н., профессор.

С28 Север России: стратегии и перспективы развития : материалы II Всерос.
науч.-практич. конф. Сургут, 27 мая 2016 г. : в 4 т. – Сургут. гос. ун-т. – Сургут : ИЦ
СурГУ, 2016. – Т. II. – 321 с.
ISBN 978-5-89545-456-5

Сборник содержит материалы по актуальным вопросам электроэнергетики, системной безопасности производственных технологий Севера России. В статьях затронуты вопросы управления нефтяным пластом на основе суперкомпьютерных технологий. Также в сборнике освещаются вопросы разработки новых материалов и технологий для развития инфраструктуры северных территорий.

Издание предназначено для ученых, преподавателей, специалистов в области нефтяной, газовой промышленности и электроэнергетики, аспирантов, студентов и других заинтересованных лиц.

УДК 001(063)
ББК 72

ISBN 978-5-89545-449-7
978-5-89545-456-5

© БУ ВО «Сургутский государственный
университет»

СОДЕРЖАНИЕ

«ЦИФРОВЫЕ НЕДРА»: УПРАВЛЕНИЕ НЕФТЯНЫМ ПЛАСТОМ НА ОСНОВЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

<i>Боксерман А. А., Вольпин С. Г., Миронов Д. Т.</i> Особенности моделирования МУН для условий применения термогазового метода увеличения нефтеотдачи в различных геолого-физических условиях	8
<i>Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Быковских Д. А.</i> О моделировании идеального газа с переменной во времени геометрией	19
<i>Галкин В. А., Дубовик А. О.</i> Об управлении динамикой слоистого течения вязкой несжимаемой жидкости в рамках модели магнитной гидродинамики	24
<i>Журавлева Л. А.</i> Разработка и свойства инвертных эмульсий на основе эфира триэтаноламина линолевой кислоты для использования в нефтедобыче	27
<i>Каравачева А. А.</i> Разработка пресных высокоингибированных буровых растворов для бурения скважин в сложных горно-геологических условиях	33
<i>Муллагильдин Р. М., Геворкян И. Э, Кеба Ю. А.</i> Комплекс мероприятий по решению проблем, возникающих при креплении скважин на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз»	36
<i>Тимошенко П. А., Молотков А. С.</i> Палеогеография формирования пласта АС5 с прогнозом улучшенных коллекторов и их нефтеносности на территории центральной части Фроловской мегавпадины	41
<i>Урманцева Н. Р., Галкин В. А.</i> Управление поведением жидкости в распределенной колебательной гидросистеме	44
<i>Яценко И. Г.</i> Трудноизвлекаемые нефти Томской области и их физико-химические свойства	49

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

<i>Горынин Г. Л., Власко А. Ф.</i> Расчет температурного поля обжимного кольца, выполненного из композитного волокнистого материала	55
<i>Горынин Г. Л., Григорьев Ю. И.</i> Сравнительный анализ экспериментальных данных модулей упругости древесины и однонаправленного клееного шпона	58
<i>Горынин Г. Л., Снигирева В. А.</i> Пространственный расчет трубобетонной свайстойки с учетом нелинейности диаграммы деформирования бетона	62
<i>Далинкевич А. А., Михеев П. В., Гусев С. А., Игонин Т. Н., Максаева Л. Б., Ненашева Т. А.</i> Исследование длительного водопоглощения конструкционных эпоксидных стеклопластиков с помощью волоконно-оптических датчиков деформаций	67
<i>Далинкевич А. А., Михеев П. В., Гусев С. А., Игонин Т. Н., Максаева Л. Б., Ненашева Т. А.</i> Применение волоконно-оптических датчиков деформаций для исследования микроструктурных изменений в конструкционных эпоксидных стеклопластиках при воздействии природных факторов старения	71
<i>Дорф В. А., Красновский Р. О., Кроль И. С., Капустин Д. Е.</i> Сборно-монолитная технология строительства зданий с несъемной сталефибробетонной опалубкой	77
<i>Ефремова И. И., Жиренков А. Н.</i> Архитектурные решения эксклюзивных сооружений и их адаптация на севере России	83
<i>Жиренков А. А.</i> Основные требования к физико-механическим свойствам строительных тепло- и гидроизоляционных материалов при их эксплуатации в условиях Севера России	87

Занин А. О. Повышение энергетической эффективности газовых водогрейных котельных путем оптимизации автоматического процесса управления.....	90
Матвеев С. А., Губская О. А. Оценка влияния армирования объемной георешеткой на физико-механические характеристики упругого слоя.....	94
Михеев В. В., Савельев С. В. О критерии эффективности процесса виброуплотнения грунтов катками с адаптивными рабочими органами	98
Михеев В. В., Савельев С. В. Эффективное использование вибрационных пневмошинных катков при строительстве грунтовых насыпей с помощью применения рабочих органов специального вида	106
Руденко Е. Ю., Муковнина Г. С., Платова Ю. С., Макарова А. А., Шакиров Д. Р., Бейбулатов С. Ю., Макеева Е. Н. Влияние различных режимов сушки отработанного кизельгура на процесс очистки сточных вод от меди	109
Славгородский С. А. Перспективы использования морских контейнеров в строительстве при создании инфраструктуры в условиях Крайнего Севера	113
Соколов С. Б. О скорости длинных волн в руслах со сложной формой сечения	122
Фуфаева М. С., Алтунина Л. К., Манжай В. Н., Овсянникова В. С., Филатов Д. А. Криогели для формирования противофильтрационного слоя и укрепления откосов дорог в северных регионах	128

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕФТЯНОЙ ОТРАСЛИ

Баус С. С. Программный продукт для контроля и автоматизированного управления процессами нефтедобычи с использованием глубинных насосов	134
Бычин И. В., Гореликов А. В., Ряховский А. В. Численное моделирование магнитогидродинамических течений в канале при заданной мощности потока	137
Вирстюк А. Ю. Разработка модуля по контролю нагнетательных скважин с неравномерным профилем приемистости	140
Дёмко А. И., Радомский С. А., Алмазова Е. Г. Автономный источник питания многофункционального измерителя уровня	145
Журавлев А. Е. Оперативный мониторинг объектов промышленного комплекса в условиях интенсивного информационного обмена	149
Лаврентьев М. М., Бартош В. С., Белаго И. В., Лысаков К. Ф., Романенко А. А. Возможности современных компьютерных архитектур: повышение производительности и обработка данных в режиме поступления	152

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

Антонова В. М., Антипин Д. П., Сальников В. Г. Энергоэффективность систем электроснабжения истощающихся нефтедобывающих скважин	159
Барбарош Н. С., Рыжаков В. В. Электромагнитная совместимость технических средств на трансформаторной подстанции напряжением выше 1 Кв со сдвоенным токоограничивающим реактором	164
Баус С. С. Методологические основы и принципы реализации интеллектуальных энергосистем в условиях северных регионов России	167
Бурмистрова Е. А., Голдобин Д. А. Исследование квазистационарных и переходных процессов на аварийной фазе ВЛ 500 Кв в цикле ОАПВ	172
Гончарук А. Ю., Рысев П. В., Шульга К. С. Применение группового регулирования параметров синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности	176
Иванова Е. В., Максимов А. А. Расчет потерь электроэнергии в неизолированных проводах воздушных линий с учётом режимных и климатических факторов	182

Иванова Е. В., Куликова А. А. Электромагнитная обстановка в сетях 6-35 Кв как рецепторах в электроэнергетической системе	187
Кислицын Е. Ю., Шмарин Я. С. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи в замкнутых сетях нефте- и газодобычи	194
Колева Г. Ю., Чалков А. С., Шеломенцев В. А. Создание электроэнергетической отрасли в XX веке на территории северо-западной части Западной Сибири	198
Конарева Е. А. Сравнение основных типов высокотемпературных проводов воздушных линий	204
Мальцева Л. А. Экономический расчет эффективности использования ламп освещения в жилых помещениях в рамках реализации Государственной программы	210
Уразалиев И. Б. Диагностика конденсаторов связи 110 кВ в процессе эксплуатации (обмен производственным опытом)	214
Ширковец А. И. Повышение эксплуатационной надежности сетей 6-35 Кв на электростанциях посредством включения резисторов в нейтраль	225
Шуманская Е. В. Разработка математической модели многопроводной несимметричной ЛЭП с целью определения электромагнитных наводок на отключенные фазы и параллельные ВЛ	232

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СИСТЕМНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕВЕРА РОССИИ

Антонов С. Ю., Исаков Г. Н. Системный анализ тепломассопереноса и имитационная модель низового лесного пожара в полунатурном эксперименте	237
Газя Г. В. Перспективы и проблемы реализации системного подхода к снижению уровня производственного травматизма на предприятиях нефтегазового комплекса Ханты-Мансийского автономного округа – Югры	244
Годовников А. И., Исаков Г. Н. Расчет безопасного расстояния от теплового излучения огненного шара при авариях на магистральных газопроводах	248
Грицков С. Н., Исаков Г. Н. Системный анализ тепломассопереноса и имитационная модель торфяного пожара в полунатурном эксперименте	253
Гришин А. М., Зима В. П., Касымов Д. П. Системный анализ пожарной опасности элементов деревянных строений при воздействии природных пожаров	260
Исаков Г. Н. Анализ и моделирование последствий при неуправляемой эвакуации людей в условиях пожара	264
Карауш С. А., Вагин Д. О. Влияние теплоустойчивости наружных ограждающих конструкций на микроклимат помещений зданий при отказах систем теплоснабжения ...	268
Касымов Д. П., Зима В. П. Применение методов ИК-диагностики в исследовании зажигания древесины и торфа от низового лесного пожара	271
Кривошеина Е. В., Букалов Г. К., Мартынова Д. Ю. Организация обучения безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте	277
Манаева А. Р., Исаков Г. Н. Системный анализ и обработка экспериментальных данных по самовоспламенению напольных покрытий при высокоскоростном нагреве в воздухе	281
Мартынова Д. Ю. Показатели результативности деятельности компаний в области охраны труда и промышленной безопасности на территории ХМАО – Югры	285
Мартынова Д. Ю., Воронин А. А. Проблемы безопасности при размещении АЗС на территории муниципальных образований	288
Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование количественной оценки техногенного риска в теории безопасности критически важных объектов	293

Сазонова Ю. А., Гудошник Е. Э. Проблемы промышленной безопасности в процессе работы капитального ремонта скважин как опасного производственного объекта	301
Сарынин И. И., Гудошник Е. Э. Перевод автотранспорта ООО «Газпром трансгаз Югорск» на газомоторное топливо. Воздействие на окружающую среду и создание здоровых условий труда	305
Фатеев В. Н. Системный анализ и управление пожаротушением очагов природных пожаров с помощью закрученных газовых струй	309
Фомина Е. Р. О критериях воспламенения жидких капель на нагретой поверхности	314
Сведения об авторах	317

Дорогие друзья!

26-27 мая 2016 года в Сургутском государственном университете при поддержке Департамента образования и молодёжной политики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры состоялась II Всероссийская научно-практическая конференция «Север России: стратегии и перспективы развития», посвященная обсуждению социально-экономических, экологических, технологических, инфраструктурных, медицинских проблем и перспектив устойчивого развития северных территорий России.

На пленарном заседании прозвучали доклады, в которых подчеркивалась важность исследований вопросов, посвященных Северу. Учёные говорили о позиционировании России между Западом и Востоком, о региональной системе высшего образования Югры, участники конференции познакомились с направлениями работы Уральской инженерной школы как программы кадрового развития региона, с возможностями современных компьютерных архитектур. Эти актуальные проблемы вызвали живой научный интерес участников мероприятия и задали настроение активного обсуждения секционных докладов.

В работе конференции приняли участие более 500 ученых, представителей образовательных и научных учреждений, ведущих специалистов крупных предприятий из Москвы, Казани, Екатеринбурга, Новосибирска, Тюмени, Челябинска, Ханты-Мансийска, Сургута. В результате работы 15 секций, 5 круглых столов и семинара-практикума были намечены пути реализации научных исследований и перспективы развития таких направлений, как медицина, спорт, экология, электроэнергетика, информационные технологии, системная безопасность, язык, культура, образование, история.

Уверены, что обсуждение актуальных тем, связанных с Севером и Арктикой, продолжится в мае 2017 года на III Всероссийской научно-практической конференции «Север России: стратегии и перспективы развития».

Желаем учёным успехов в развитии и реализации научных идей и проектов, продуктивных встреч на научных площадках и плодотворного сотрудничества как с научным, так и с бизнес-сообществом России.

*С уважением
оргкомитет конференции*

«ЦИФРОВЫЕ НЕДРА»: УПРАВЛЕНИЕ НЕФТЯНЫМ ПЛАСТОМ НА ОСНОВЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 622.276.1/4:519.87

*Боксерман А. А., Вольпин С. Г., Миронов Д. Т.
Bokserman A. A., Volpin S. G., Mironov D. T.*

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МУН ДЛЯ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОГАЗОВОГО МЕТОДА УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

SIMULATION EOR METHODS IN TERMS OF THERMAL-GAS METHOD APPLICATIONS OF OIL RECOVERY FOR DIFFERENT RESERVOIR CONDITIONS

Статья посвящена некоторым особенностям моделирования методов увеличения нефтеотдачи и оценке технологического потенциала применения термогазового метода увеличения нефтеотдачи (ТГ МУН) для различных геолого-физических условий. Кратко освещен механизм воздействия на пласт при реализации ТГ МУН и характерные особенности данной технологии.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы, низкопроницаемые коллектора, баженовская свита, термогазовое воздействие, кероген, смешивающееся вытеснение, нефтеотдача, использование суперкомпьютеров.

Анализ и обобщение мирового и отечественного опыта воспроизводства сырьевой базы нефтедобычи показывает, что приоритетным направлением прироста запасов нефти в настоящее время становятся современные методы увеличения нефтеотдачи (МУН), особенно интегрированные технологии, сочетающие в себе комбинацию различных методов (тепловых, газовых и физико-химических). Именно такой подход к их развитию и промышленному применению может обеспечить синергетический эффект в освоении новых и разрабатываемых нефтяных месторождений, существенный рост извлекаемых запасов и объемов добычи нефти без дополнительных затрат на геологоразведочные работы, а также экономию капитальных вложений на обустройство новых месторождений и развитие инфраструктуры.

В этой связи актуальной становится проблема освоения все возрастающей доли трудноизвлекаемых запасов нефти на разрабатываемых и обустроенных месторождениях России. Большие перспективы в решении этой проблемы связаны с применением термогазовой технологии.

Неотъемлемой частью современного проектирования является математическое моделирование процесса разработки и создание цифровых геолого-гидродинамических моделей. Окончательное решение по выбору первоочередного участка проведения ОПР следует принимать с учетом предварительных расчетов технологических показателей вариантов разработки для участков ОПР на геолого-гидродинамических моделях. В данной статье рассмотрены вопросы по обоснованию и моделированию вытеснения углеводородов термогазовым (ТГ) методом с помощью современных термогидродинамических симуляторов.

Прогноз технологических параметров разработки опытных участков по результатам численного моделирования с применением ТГ МУН позволяют ожидать существенный прирост нефтеотдачи даже на обводненных участках месторождения за счет применения метода.

Пророст составляет 30–40 % и выше, по сравнению с применением традиционных методов, что является необходимым для рациональной выработки недр.

Термогазовый метод увеличения нефтеотдачи впервые был предложен в 1971 г. во ВНИИнефть им. А. П. Крылова и имеет отечественный приоритет [4]. Метод основан на закачке воздуха (водо-воздушной смеси) в пласт и его трансформации в эффективные вытесняющие агенты за счет внутрипластовых окислительных процессов. Для реализации метода впервые в мировой практике используется важная энергетическая особенность значительной части месторождений, в том числе Западной Сибири, которые характеризуются не только высоким пластовым давлением, но и повышенными пластовыми температурами, свыше 65 °С [5]. Такие температуры при закачке воздуха в результате высокой скорости процесса расхода кислорода на реакцию самопроизвольного окисления нефти гарантируют безопасное ведение процесса и обеспечивают внутрипластовую генерацию высокоэффективного вытесняющего газового агента, обеспечивающего значительный прирост нефтеотдачи.

Термогазовый метод представляет собой интеграцию тепловых и газовых методов воздействия. Следствием такого комплексного подхода является то, что при внутрипластовых процессах в ходе ТГ воздействия (ТГВ) реализуются основные особенности механизмов как тепловых, так и газовых методов. Вместе с тем необходимо учитывать следующие принципиальные отличительные особенности данного МУН.

Характерной особенностью термогазового метода является его предназначение для извлечения маловязких нефтей, в связи с чем внутрипластовые окислительные процессы связаны с внутрипластовой трансформацией закачиваемого кислородсодержащего агента в смешивающийся с нефтью вытесняющий агент. Формируемый при реализации ТГВ нефтевытесняющий агент содержит не только дымовые газы, но и углеводородные газы и широкие фракции легких углеводородов (ШФЛУ), выделяемые из пластовой нефти под влиянием теплового воздействия.

В этой связи ниже отмечены основные особенности технологии и даны некоторые новые обобщения.

Механизм вытеснения нефти при внутрипластовом горении можно описать следующим образом. По мере перемещения фронта горения в пласте формируется несколько характерных отчетливо выделяющихся температурных зон (рис. 1) [6].

Как видно на рисунке в зоне 1, где уже прошло горение (и основные окислительные процессы) остаточная нефтенасыщенность снижается до минимальных значений, что подтверждается результатами исследований керна на месторождении Буффало (США) до 4–6 % [11].

Основные процессы проходят в зонах 2 и 3 – это зоны горения (2) и зона пиролиза и коксования нефти (3). В зоне конденсации (4) при снижении температуры заканчиваются химические превращения. В области, примыкающей к зоне реакций, протекают последовательно испарение и повторная конденсация легких фракций нефти и воды, изначально присутствовавшей в пласте, происходит также конденсация воды, являющейся продуктом химических реакций. В пределах этой области наблюдается понижение температуры до 200 °С Тпласта. Необходимо отметить, что явления испарения-конденсации способствуют ускорению процесса переноса теплоты, в том числе и в окружающие породы.

Технология термогазового воздействия создана на стыке тепловых и газовых МУН и имеет принципиальные отличия от обычно применяемого процесса внутрипластового горения, реализуемого на месторождениях высоковязких нефтей.

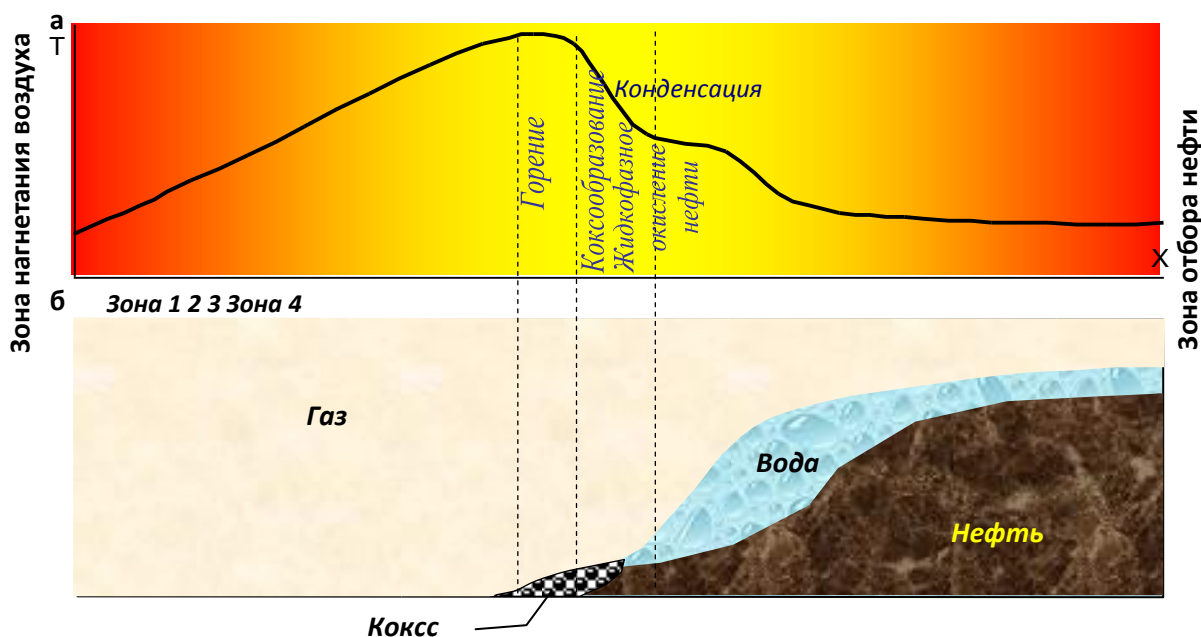


Рис. 1. Профили температуры (а) и насыщенности (б) при перемещении фронта горения в пористой среде [6]

При сухом внутрипластовом горении в пласте с высоковязкой нефтью порядка 60–80 % вытеснения реализуется в области фронта горения. В термогазовой технологии на фронте высокотемпературных реакций вытесняется всего 5–15 % нефти. Эти цифры, конечно, приблизительные и меняются в зависимости от свойств нефти и пластовых условий. Основное вытеснение происходит впереди и задача фронта горения (зоны высокотемпературных окислительных реакций) – генерировать эффективные вытесняющие агенты: CO_2 , легкие углеводородные фракции, азот, водяной пар. Фронт горения в данной технологии играет вспомогательную роль. Основное вытеснение обеспечивается именно газовыми агентами.

Одна из главных особенностей состоит в том, что технология ТГВ использует важные энергетические особенности месторождений, характеризующихся не только высоким пластовым давлением, но и повышенными пластовыми температурами (60 С и более). Такие температуры при закачке воздуха в результате высокой скорости расходования кислорода воздуха на окисление нефти создают условия для полного потребления кислорода, гарантируют безопасное ведение процесса и обеспечивают внутрипластовую генерацию высокоэффективного вытесняющего газового агента, обеспечивающего кардинальный прирост нефтеотдачи.

Согласно математическим исследованиям размер зоны полного потребления закачиваемого в пласт вместе с воздухом кислорода на порядок меньше, чем расстояния между добывающими и нагнетательными скважинами, что обеспечивает безопасную реализацию термогазового МУН. Результаты исследований показали также, что в широком диапазоне условий закачка воздуха может быть ограничена созданием оторочки в объеме 25–35 % объема пор, а затем может быть осуществлен переход на другой вытесняющий агент, в частности, на закачку воды.

В 1980-х и начале 1990-х гг. в рамках Программы проектов промысловых испытаний и освоения современных МУН метод ТГВ прошел успешные испытания на месторождениях СССР и США, в т. ч. в соответствии с международным соглашением «Интернефтеотдача» РМНТК «Нефтеотдача» (СССР) – НК «Амоко» (США).

В ходе опытно-промышленных работ на месторождениях маловязких нефтей основные положения и прогнозная эффективность метода нашли полное подтверждение. В частности, на месторождениях с пластовой температурой свыше 50 С происходило практически

полное самопроизвольное потребление кислорода воздуха в пласте. Подтверждена значительная роль и высокая вытесняющая способность формируемого в пласте газового агента – смеси азота с углекислым газом и легкими фракциями нефти. В процессе опытно-промышленных работ происходило значительное, вплоть до кратного, увеличение добычи нефти. Многие скважины переходили на фонтанный режим работы. Дополнительное извлечение нефти достигало 30–40 % и более от остаточных, после заводнения, запасов.

После окончания реализации данной совместной программы в США промысловые испытания и освоение термогазового МУН были продолжены и получили развитие на других месторождениях США с основными геолого-физическими параметрами, аналогичными проводимым по Программе. Об этом свидетельствуют данные, приведенные в табл. 1 (по состоянию на 01.12.2011) [9]. Причем, если в 2004 г. технология ТГВ в США применялась на 6 объектах, то в 2011 г. уже на 11-ти. При этом на конец 2011 г. с применением метода было добыто около 964 тыс. т нефти.

Таблица 1

Опыт применения ТГВ в США (на 01.12.2011)

Месторождение	Год начала реализации проекта	Тип коллектора	Пористость, %	Проницаемость, мД	Глубина, м	Вязкость нефти, сП	Температура, °С	Нефтеотдача, %	Годовая добыча общая/за счет МУН, тыс. т/год
Medicine Pole Hills Unit	1985	Д	17	15	2900	2	110	60	20/20
West Medicine Pole Unit	2001	Д	17	10	2900	2	102	34	49/49
South Medicine Pole Unit	2003	Д	17	10	2800	2	106	40	20/20
Cedar Hills North Unit	2002	Д	18	10	2740	2	102	53	637/637
West Cedar Hills Unit	2003	Д	17	10	2740	2	102	53	29/29
Buffalo	1979	Д	20	10	2580	2	102	64	23/23
West Buffalo	1987	Д	20	10	2580	2	102	64	18/18
South Buffalo	1983	Д	20	10	2580	2	102	64	40/40
Pennel Phase 1	2002	Д	17	10	2680	1,44	93	48	21/8
Pennel Phase 2	2002	Д	17	10	2680	1,44	93	46	78/5
Little Beaver	2002	Д	17	10	2530	1,44	93	28	83/38

К сожалению, после распада союзного государства и начальной стадии перехода России к рыночной экономике реализация проектов МУН, в том числе по термогазовой технологии, как и успешно действовавшей государственной программы по воспроизводству сырьевой базы за счет увеличения нефтеотдачи, прекратилась.

Обобщение опыта применения технологии позволяет сформулировать следующие ее преимущества:

- относительная простота реализации и нулевая стоимость используемого газового агента;
- возможность применения технологии на объектах с весьма низкопроницаемыми (10×10^{-3} мкм² и менее) и низкопористыми (менее 15 %) коллекторами;
- возможность применения на объектах с водо-чувствительными коллекторами, с низкой эффективностью при закачке воды;
- высокий потенциал по приросту нефтеотдачи, в том числе на объектах в значительной степени выработанных при заводнении.

Следует подчеркнуть, что, несмотря на возможность доработки (после заводнения) залежей с применением ТГВ, экономика процесса будет лучше, если ТГВ начинать как можно ранее.

Особенности геолого-физических параметров продуктивных пластов месторождения, в первую очередь повышенный уровень пластовой температуры (90–92 °С), являются важной предпосылкой целесообразности применения здесь термогазового МУН.

Для обоснования целесообразности применения ТГВ на месторождении вначале проводятся значительные по объему экспериментальные и теоретические исследования.

Для экспериментов по определению смесимости используются керны и пластовые флюиды месторождения. Термогазовые смеси (ТГС) подготавливаются путем смешения в бомбе PVT газов, состав которых (CO₂, N₂, легкие углеводороды) определен по результатам экспериментов по окислению нефтей на реакторах и трубных моделях и подтвержден на математических моделях.

В процессе гидродинамического моделирования разработана и используется методика расчета технологических показателей на основе использования современных программных комплексов.

В связи с тем, что основной составляющей механизма ТГВ является смешивающее вытеснение, использован следующий метод ускорения расчетов. В пакете композиционного моделирования, например E300 (Шлюмберже) или GEM (CMG Канада), строится композиционная изотермическая модель, включающая основные компоненты оторочки и пластового флюида. Далее на созданной изотермической модели рассчитываются серии вариантов по обоснованию оптимального объема закачки воздуха для получения максимального значения КИН. Параметры выбранного варианта далее уточняются на 3Д неизотермической модели, учитывающей кинетику окисления, многофазность и многокомпонентность потоков. В процессе расчетов проводится обоснование технологических параметров процесса на типовом элементе пласта, включая водовоздушное отношение, забойные давления на скважинах, скорости продвижения оторочки, концентрации компонентов в газовой и жидкой фазах. Для выбранного варианта рассматриваются различные подходы по регулированию процесса ТГВ, в том числе, регулирование продвижения фронта как по площади, так и по разрезу, применение чередующейся закачки воздуха и воды.

Пример реализации основных подходов при гидродинамических расчетах процесса ТГВ. Оценочные и прогнозные расчеты проведены для моделей продуктивных пластов, имеющих сходные геолого-физические характеристики пластам группы АС, широко распространенных в ряде месторождений Западной Сибири и представленных низкопроницаемыми песчаниками с высоким содержанием глинистого материала и с низкими фильтрационными характеристиками объектов, средняя проницаемость пласта $2 - 8 \cdot 10^{-3}$ мкм². Запасы нефти в таких коллекторах относятся к категории трудноизвлекаемых. Для достижения эффективной степени извлечения таких запасов, согласно мировой практике, необходимо освоение и промышленное применение современных методов увеличения нефтеотдачи, в первую очередь, – газовых.

Особенности геолого-физических параметров продуктивных пластов месторождения – повышенный уровень пластовой температуры (90–92 °С) – являются важными предпосылками целесообразности применения здесь термогазового МУН.

Вначале по результатам проведенных экспериментальных исследований (PVT свойства глубинных проб нефти, коэффициенты вытеснения нефти водой и газом, фазовые проницаемости) проводилось построение гидродинамической модели на композиционном симуляторе. Далее были проведены многовариантные расчеты на неизотермической, гидродинамической модели для небольшого типового элемента пласта до получения согласования с экспериментальными данными, что позволило обосновать значения расчетных параметров ТГВ (ВНО, скорость продвижения оторочки, концентрации компонентов в жидкой и газовой фазах в пределах оторочки).

Необходимо отметить, что построение гидродинамической модели в неизотермической постановке требует задания ряда дополнительных параметров по сравнению с аналогичной композиционной постановкой.

Применительно к решению задач термогазового воздействия на пласты, содержащие трудноизвлекаемую нефть, наиболее адекватным представляется использование симулятора STARS (CMG Канада), который позволяет задавать и учитывать в расчетах как свойства резервуара и свойства компонентов (относящихся к газообразным, жидким и твердым компонентам), так и тепловое взаимодействие жидкостей и породы, с учетом изменения геомеханических параметров породы, ее термическое расширение, теплофизические процессы и гидро-газодинамические процессы при закачке и течении в пласте нефти, воды, пара, различных газов.

Благодаря устойчивости расчетов в широком интервале температур и давлений программный комплекс CMG широко используется для моделирования большинства тепловых методов за рубежом.

Также необходимо отметить, что использование изотермической и неизотермической моделей обусловлено и тем, что при переходе на гидродинамическую модель для участка ОПР с большим числом ячеек время расчетов вариантов на неизотермическом симуляторе резко увеличивается. Поэтому, и это часто применяется в практике численного моделирования процессов, происходящих в пласте при закачке в него воздуха [12, 14], реализуется изотермическая композиционная модель, основанная на использовании уравнения состояния компонентов. В данной работе в дальнейшем дополнительно применялся неизотермический симулятор для более корректного моделирования зон экзотермических реакций, зон распределения концентрации кислорода закачиваемого в пласт воздуха, расчетов скорости распространения температурного фронта, образующегося в ходе окислительных реакций и другие моменты для описания процесса ТГВ.

Необходимо отметить, что в дальнейшем для моделирования процессов при ТГВ и других аналогичных сложных физико-химических процессов, протекающих в нефтяном пласте на микро- и макроуровнях необходимо использование *суперкомпьютеров*, и данное направление сейчас активно развивается [3].

Суперкомпьютерные технологии, включающие в себя отечественные суперкомпьютеры и новый отечественный программный продукт термогидросимулятор, позволяющий вести моделирование процессов многофазной многокомпонентной неизотермической фильтрации в пластах сложной структуры, является кардинальным способом повышения оперативности и детальности моделирования в сотни раз.

Эффективность вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов и контроля за её осуществлением требуют существенного повышения объёма и достоверности информации о строении пласта и процессах, в нём протекающих. В рамках государственных программ совместно с территориальными научными центрами и с поддержкой администрации ХМАО планируется разработка программного обеспечения моделирования технологии термогазового воздействия, а также мониторинга разработки нефтяного месторождения на основе решения прямых и обратных задач подземной гидродинамики при комплексировании различных видов исследований с применением отечественного программного обеспечения на основе суперкомпьютерных технологий.

Планируемое создание программного вычислительного комплекса для суперЭВМ с массовым параллелизмом (десятки тысяч процессорных ядер) позволит создать основы цифрового месторождения, важнейшим составляющим которого является *цифровое управление процессом разработки нефтяного месторождения*.

Для основных экспериментов использовался керновый материал продуктивных пластов группы АС Западной Сибири, имеющих низкие фильтрационные характеристики – средняя проницаемость пласта $4-8 \cdot 10^{-3}$ мкм².

Результаты предварительно проведенных лабораторных фильтрационных экспериментов на керновом материале по моделированию вытеснения нефти при ТГВ для условий пласта показали, что остаточная нефтенасыщенность после прохождения сформировавшейся при ТГВ оторочки составляет менее 10 %.

Также проводилось физическое моделирование процессов ТГВ в насыпной слим-модели пласта, которое показало, что для применяемых нефтей образуется зона многоконтактной смесимости между газом и нефтью.

Исследования кинетических параметров окислительных процессов при ТГВ показали, что при пластовой температуре (около 90 °С) период индукции составляет менее 2 суток, т. е. окисление начнется достаточно быстро после начала закачки воздуха.

Таким образом, экспериментальные исследования механизма ТГВ применительно к геолого-физическим условиям месторождения подтвердили возможность эффективной реализации метода на объектах месторождения.

Следующим шагом для обоснования целесообразности применения ТГВ на месторождении стали многовариантные расчеты показателей разработки и сопоставительный анализ нескольких пилотных участков месторождения. Выбор участков для промысловых испытаний новых технологических процессов существенным образом сказывается на успешности их реализации, поэтому для обоснования выбора первоочередного участка были рассмотрены участки, находящиеся в различных стадиях разработки и имеющие различные геолого-фильтрационные характеристики. В качестве первоочередных опытных участков были определены зоны и объекты, содержащие основные запасы нефти, и участки, характеризующие различную степень выработки запасов.

Характерные значения параметров участков имеют среднюю эффективную нефтенасыщенную толщину около 10 м, средняя проницаемость – 5 мД, среднюю пористость – 0,16, коэффициент песчаности – 0,4. При анализе распределения запасов для участка по проницаемости основная доля запасов была сосредоточена в коллекторах с проницаемостью от 3 до 10 мД.

На построенной композиционной изотермической гидродинамической модели участка-кандидата ОПР были рассчитаны технологические варианты с различными объемами закачки в пласт воздуха и с переходом на заводнение. На рис. 2 показано изменение неснижаемой водонасыщенности по кубу, полученному из 3Д модели участка ОПР. Видно, что пласт имеет высокую расчлененность разреза, средняя неснижаемая водонасыщенность составляет 49 %.

Вначале рассчитывался базовый вариант – с заводнением, затем варианты с поддержанием постоянного расхода воздуха при непрерывной его закачке и при циклической закачке воздуха и воды. Интервалы перфораций добывающих скважин отключались, как и в варианте с заводнением, при обводненности выше 98 %, а также при газовом факторе свыше 3000 нм³/м³. Ограничение на забойное давление при нагнетании воздуха составило 45 МПа.

И затем рассчитывался вариант с дополнительными работами по ГТМ, направленных на регулирование выработки.

На рис. 3 и в табл. 2 показано сравнение накопленной добычи нефти с участка ОПР по вариантам. Видно, что наибольшей накопленной добычей и, следовательно, наибольшим конечной нефтеотдачей, составившей 42 %, обладает вариант 4, в сравнении с нефтеотдачей 28 %, полученной в базовом варианте при заводнении.

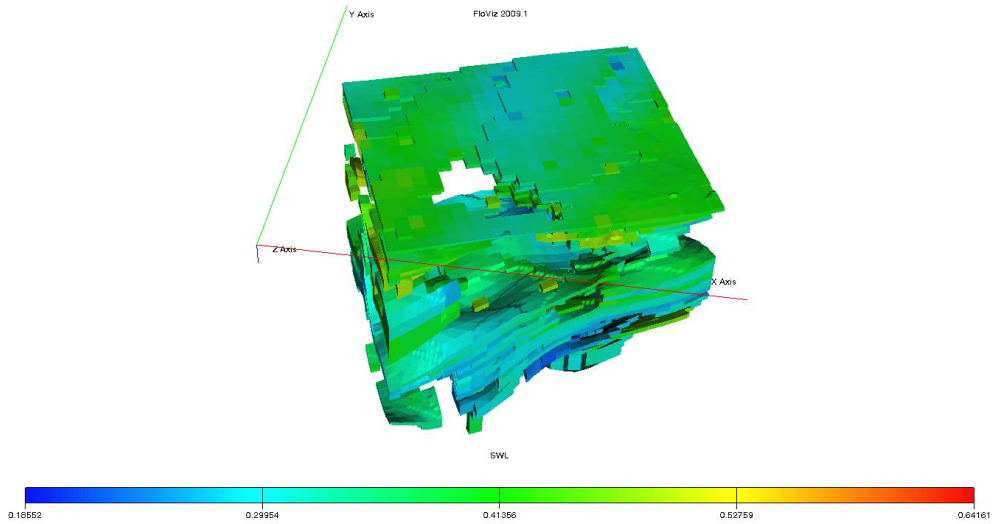


Рис. 2. Изменение неснижаемой водонасыщенности на кубе 3Д модели участка ОПР

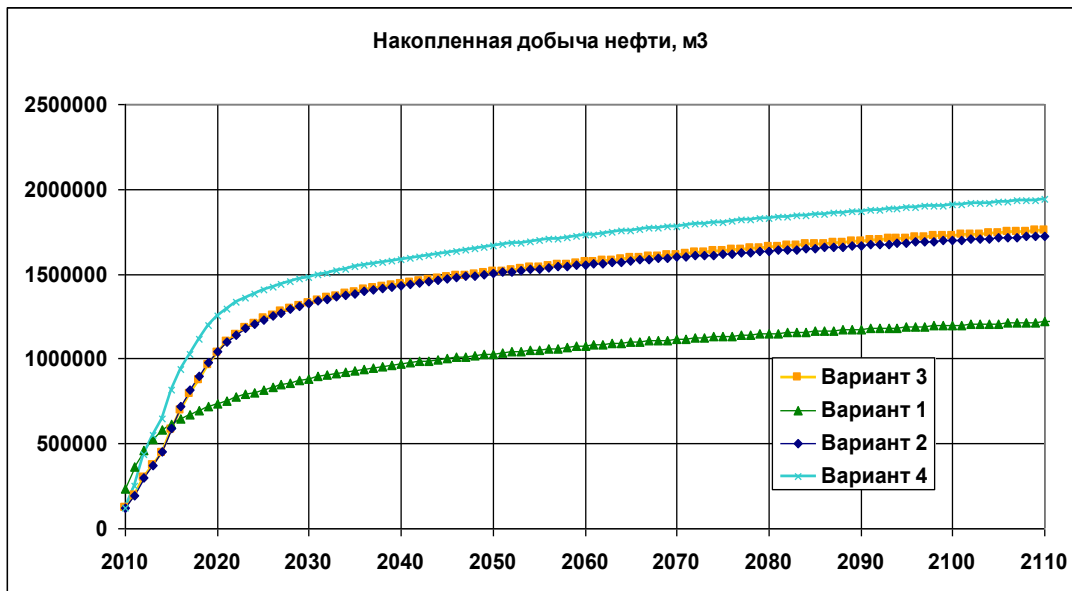


Рис. 3. Накопленная добыча нефти для участка

Таблица 2

Основные технологические показатели вариантов разработки участка

№ варианта	Накоплен. добыча нефти на 95 % обв., млн т	Накоплен. водонеф. отношение, м ³ /т	Накоплен. воздухонеф. отношение, ст м ³ /т на конец ОПР	Объем закачки воздуха, дол. пор. об.	КИН в целом по уч-ку (обводнёность 95 %), д. ед.
1	0,95	8,55	—	—	0,280
2	1,32	3,00	210	0,14	0,411
3	1,35	3,20	205	0,14	0,413
4	1,64	4,26	348	0,28	0,427

Таким образом, применение ТГВ при разработке участка, находящегося на начальной стадии разработки, позволяет достичь значения КИН 0,42 при объеме закачки воздуха, составившего 30 % от порового объема участка.

Далее с помощью неізотермического симулятора STARS CMG при моделировании процесса ТГВ были рассмотрены следующие практические задачи: проведена оценка распространения и размера зоны поглощения кислорода воздуха в пласте, скорости продвижения и величины максимальной температуры фронта интенсивных окислительных реакций.

Для расчета на STARS композиционная PVT модель нефти с помощью программного комплекса WinProp была переведена в термическую PVT модель на основе констант равновесия. Все PVT зависимости, присущие композиционной модели, и товарные характеристики нефти остались неизменными.

Некоторые результаты моделирования продвижения температурного фронта и оторочки при ТГВ для одного из участка ОПП приведены на рис. 4–5. На рис. 4 видно, что на момент окончания нагнетания воздуха ни в одну из добывающих скважин не прорывается кислород, а на рис. 5 показано распределение компоненты CO_2 в газовой фазе на конец закачки воздуха.

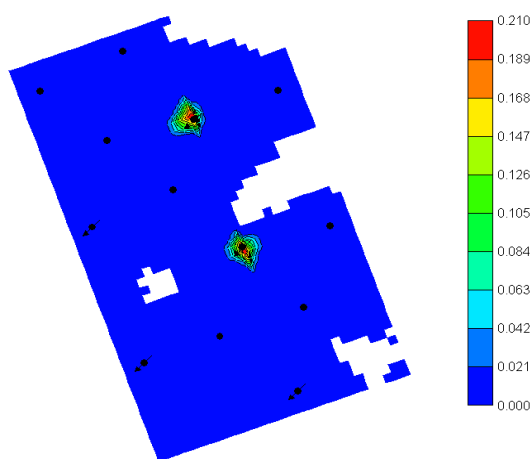


Рис. 4. Распределение мольной доли кислорода (O_2) в газовой фазе

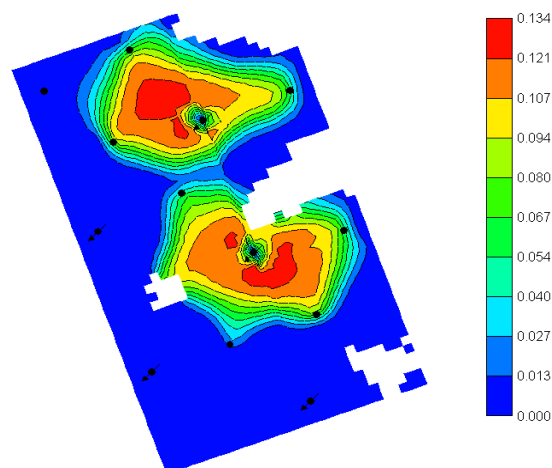


Рис. 5. Распределение мольной доли CO_2 в газовой фазе на конец закачки воздуха

Таким образом, по результатам термогидродинамического моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Весь кислород, закачиваемый с воздухом, поглощается в околоскважинной зоне, распространяясь всего на несколько десятков метров вокруг нагнетательных скважин, в то время как не содержащий кислород газ продвигается по направлению к добывающим скважинам, образуя оторочку из легких фракций нефти и растворенных продуктов горения.

2. Низкая нефтенасыщенность за сформировавшейся оторочкой свидетельствует о формировании режима частично смешивающегося вытеснения.

3. Температурный фронт сохраняется на протяжении всей закачки воздуха и медленно продвигается к добывающим скважинам.

4. Выделившийся при окислении CO_2 частично растворяется в нефти: концентрация CO_2 в газовой фазе падает в направлении от температурного фронта к добывающим скважинам.

Расчет технологических показателей вариантов разработки на термогидродинамическом симуляторе подтвердил высокую эффективность и безопасность (полное отсутствие содержания кислорода в продукции) применения ТГВ на месторождения.

Таким образом, проведенные расчеты на изотермическом и неізотермическом симуляторах показали обоснованность выбора в качестве кандидата на ОПП обводненного участка.

Необходимо отметить, что расчеты технологических показателей вариантов проводились также и для участка, имеющего высокую текущую обводненность продукции (более 40 %) и незначительную выработку запасов. Расчеты также показали, что при ТГВ достигается высокое значение КИН – более 0,3, но требуется значительный объем закачки воздуха на этом участке, что отразится на экономических показателях процесса.

Первоочередным для проведения ОПР можно рекомендовать участок, расположенный в наиболее низкопроницаемой зоне пласта (представляющей краевые зоны), по которому применение ТГВ позволит достичь КИН 0,40, что значительно превышает КИН при заводнении.

В заключение кратко остановимся на возможностях применения ТГВ на залежах бажендовской свиты (БС). При формировании технологии воздействия на породы БС необходимо учитывать характер их фильтрационно-емкостных свойств и содержание в них углеводородов как в твердом, так и в жидком виде.

Прежде всего, следует отметить принципиальную особенность содержания углеводородов в породах БС, которая является нефтематеринской породой, – процессы преобразования органического вещества в нефть еще не завершены. К настоящему времени углеводороды в породах БС содержатся в виде легкой нефти в пустотном пространстве и в органическом веществе – керогене. В свою очередь, пустотное пространство представлено микро- и макроуровнями. Гидродинамически связанная среда в основном содержится в макротрещиноватых частях породы, проницаемость которых изменяется в широких пределах – от единиц миллидарси до единиц дарси. Вместе с тем значительная доля нефти содержится в микропустотном пространстве, которое в начальных пластовых условиях является практически непроницаемым.

В то же время обширные лабораторные и промысловые исследования показали, что фильтрационно-емкостные характеристики пород БС в значительной мере определяются уровнем температуры. С увеличением температуры для всех типов нефтекерогеносодержащих пород отмечается увеличение общей пустотности (рис. 6), а значит и проницаемости, накопленной добычи, следовательно, и зоны дренажа [1, 10].

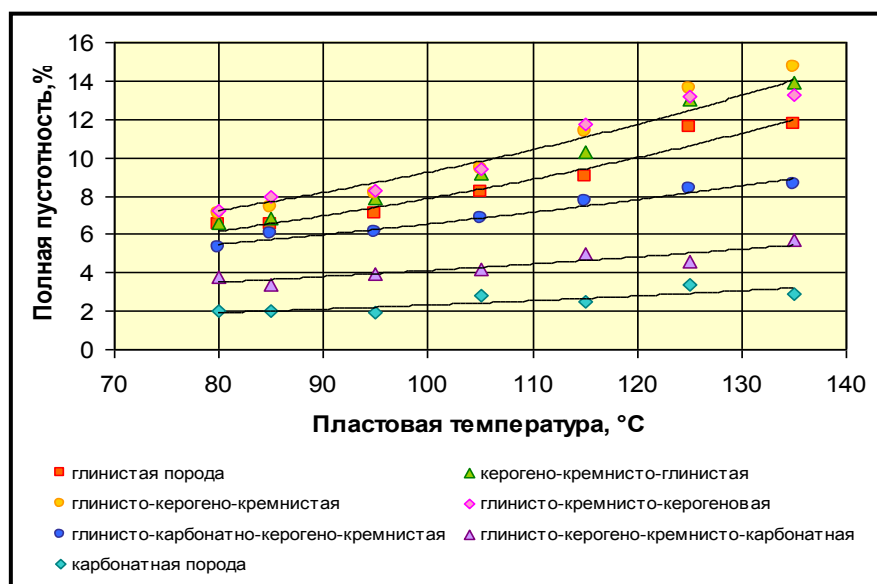


Рис. 6. Зависимость средних значений полной пустотности литотипов пород БС от температуры пласта [1; 10]

В этой связи следует отметить, что многочисленные экспериментальные исследования [8; 7; 2] показали, что увеличение температуры микропустотного пространства (матрицы) до 250–350 °C позволяет не только извлечь не менее 70–80 % первоначально содержащейся в ней легкой нефти, но и в результате пиролиза и крекинга превратить значительную часть

твердого керогена в жидкие и газообразные углеводороды, которые при определенных условиях также могут быть извлечены. При этом суммарная объемная доля выхода углеводородов может достигать 50–60 % от объемного содержания керогена.

Отличительной особенностью внутрипластовых окислительных процессов, проходящих при термогазовом воздействии в породах баженовской свиты, является то, что в качестве топлива при реализации этих процессов будет преимущественно использоваться кероген, который содержится во всех литотипах пород.

Таким образом, развитие отечественного термогазового способа разработки месторождений баженовской свиты согласно научным и промысловым исследованиям обладает значительным потенциалом извлечения нефти (в размере не менее 40 % от запасов), в то время как применяемые в настоящее время способы разработки БС, основанные на применении только гидроразрыва пласта, обеспечивают извлечение не более 3–5 % от запасов нефти на естественном режиме, что на порядок ниже.

Планируемое в настоящее время создание отечественной программы моделирования термогазового способа разработки с использованием суперкомпьютеров для разработки месторождений БС имеет огромные перспективы и будет отражать основные особенности, происходящие в пласте при формировании «синтетической» нефти и углеводородов и при вводе в разработку недраенируемых зон за счет теплового воздействия.

Литература

1. Алекперов В. Ю., Грайфер В. И., Николаев Н. М., Карпов В. Б., Кокорев В. И., Нургалеев Р. Г., Палий А. П., Боксерман А. А., Фомкин А. В. Новый отечественный способ разработки месторождений баженовской свиты (ч. 1, 2) // Нефтяное хозяйство. 2013. № 12. С. 100–105 ; 2014. № 1. С. 50–53.
2. Антонов С. В., Полищук А. М., Боксерман А. А. Развитие термогазового метода повышения нефтеотдачи. Кинетические закономерности автоокисления керогена и нефти // Теория и практика применения методов повышения нефтеотдачи пластов : материалы II междунар. симпозиума 15 сентября 2009 г. Т. 1. С. 183.
3. Бетелин В. Б., Боксерман А. А., Костюков В. Е., Савельев В. А. Проблемы управления процессами повышения нефтеотдачи на основе моделирования на суперЭВМ // Нефтегазопромысловый инжиниринг. № 3. 2010. С. 20–24.
4. Боксерман А. А. Результаты и перспективы применения тепловых методов воздействия на пласт // Тепловые методы воздействия на пласт : материалы межотрасл. семинара. Ухта. 5–8 октября 1971 г.). М. : ВНИИОЭНГ. С. 10–16.
5. Боксерман А. А., Сафиуллин Р. Х., Кузьмина М. В. Разработка нефтяных месторождений с помощью внутрипластового горения // Горное дело. Разработка нефтяных и газовых месторождений. М. : ВИНТИ, 1969. С. 106–161.
6. Грайфер В. И., Боксерман А. А. Термогазовая нанотехнология воздействия на низкопроницаемые пласты Баженовской свиты // Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям : материалы конф. Москва, 18–19 ноября 2008 г. М., 2008.
7. Кокорев В. И. Техничко-технологические основы инновационных методов разработки месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами нефти : автореф. дис. ... д-ра тех. н. Москва, 2010.
8. Кокорев В. И., Судобин Н. Г., Полищук А. М., Горлов Е. Г. Термодеструкция керогена битуминозных пород туглейской (баженовской) свиты месторождений Краснотинского района // Теория и практика применения методов повышения нефтеотдачи пластов : материалы II междунар. симпозиума. 15 сентября 2009 г. Т. 1. С. 45.
9. Обзор применения МУН в мире // Oil & Gas Journal. 2012. Apr.
10. Сонич В. П. Перспективы разработки отложений Баженовской свиты на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз». М., 2002.

11. Gutierrez B. P., Taylor A. R., Kumar V. K., Ursenbach M. G., Moore R. G., Mehta S. A. Recovery Factors In High Pressure Air Injection. SPE 108429, 2007.
12. Kuhlman M. I. Simulation of light oil air injection into viscous – dominated and gravity stable reservoirs. SPE 59331, 2000.
13. Kumar V. K., Gutierrez D., Thies B. P., Cantrell C. 30 Years of Successful High-Pressure Air Injection: Performance Evaluation of Buffalo Field, South Dakota. SPE 133494, 2010.
14. Zwart A. H. de, Batenburg D. W. van, Blom C. P. A., Tsolakidis A., Glandt C. A., Boerriger P. The Modeling Challenge of High Pressure Air Injection. SPE 113917, 2008.

УДК 533.6.01:519.87:004.94

Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Быковских Д. А.
Galkin V. A., Gavrilenko T. V., Bikovskih D. A.

О МОДЕЛИРОВАНИИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА С ПЕРЕМЕННОЙ ВО ВРЕМЕНИ ГЕОМЕТРИЕЙ

TOWARDS MODELING IDEAL GAS WITH TIME-VARIABLE FLOW GEOMETRY

В статье представлено описание модели движения идеального газа с переменной во времени геометрией. Разработан и реализован параллельный алгоритм расчета траектории частицы с учетом взаимодействия с движущейся границей для высокопроизводительных систем с общей памятью. Представлены результаты распределения частиц идеального газа в движущемся шаре (тест 1) и кубе (тест 2) с подвижными границами. Проведено исследование на сильную масштабируемость, основанное на этих тестах.

Ключевые слова: математическое моделирование, гидродинамика, идеальный газ.

Введение

Статья посвящена управлению динамике поведения идеального газа в замкнутом пространстве с подвижными отражающими границами. Особенность данного класса задач связана с построением фильтрационной модели пласта, основанной на использовании статистических оценок, определяющих гидродинамические параметры течения жидкости или газа в элементарных объемах [4]. В таких моделях также можно изучать возникновение резонансных свойств, в том числе приводящих к модели Улама, связанной с ускорением частицы, взаимодействующей с осциллирующими стенками [3].

Для проведения расчетов моделирования динамики идеального газа, состоящего из большого числа частиц (от 10^6), с подвижными границами, требуется большое количество вычислительных ресурсов. Поэтому был разработан программный комплекс, использующий параллельные алгоритмы, написанные на языке C++. В качестве компилятора был выбран Intel C/C++ compiler, позволяющий использовать различные уровни оптимизаций и поддерживающий технологию OpenMP.

Математическая модель

Математическая модель – модель идеального газа. Каждая частица (материальная точка) абсолютно упруго отражается от движущихся границ. Граница состоит из:

- 1) прямоугольных областей, в которых она определена (т. е. вне этих областей частица не взаимодействует с границей);

2) аналитического уравнения (поверхность), представленного в каноническом виде с определенными коэффициентами и сдвигом относительно начала координат;

3) скорости $u(t)$.

При этом масса частицы (условно равна 1) больше нуля, а масса границы является бесконечно большой по сравнению с массой частицы.

В случае, когда скорость движения границы больше нуля, необходимо сначала перейти в другую систему отчета (1), в которой движущаяся граница становится неподвижной [2]. Далее необходимо выполнить закон зеркального отражения (2), а затем вернуться назад к системе отчета, связанной с наблюдателем (3).

$$v_{t,j-1}^{(i)} = v_{t,j-1}^{(i)} - u_t, \quad (1)$$

где u_t – скорость движения границы;

$$v_{t,j}^{(i)} = v_{t,j-1}^{(i)} - 2n(v_{t,j-1}^{(i)}, n), \quad (2)$$

где n – нормаль.

$$v_{t,j}^{(i)} = v_{t,j}^{(i)} + u_t. \quad (3)$$

Траектория движения частицы, отражающаяся от движущейся границы, является кусочно-линейной функцией, а вектор скорости состоит из набора векторов:

$$v_{t,j}^{(i)} = \begin{cases} q_t^{(i+1)} = q_t^{(i)} + \sum v_{t,j}^{(i)}(t_{j+1} - t_j) \\ v_{t,0}^{(i)} = v_{t,k}^{(i-1)}, & t_0 < t^* < t_1 \\ v_{t,1}^{(i)} = v_{t,0}^{(i)} - 2n([v_{t,0}^{(i)} - u_t], n), & t_1 < t^* < t_2 \\ \dots \\ v_{t,j}^{(i)} = v_{t,j-1}^{(i)} - 2n([v_{t,j-1}^{(i)} - u_t], n), & t_j < t^* < t_{j+1} \\ \dots \\ v_{t,k}^{(i)} = v_{t,k-1}^{(i)} - 2n([v_{t,k-1}^{(i)} - u_t], n), & t_k < t^* < t_{k+1} \end{cases}, \quad (4)$$

где $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ – моменты времени, в которых частица взаимодействует с границей;

t^* – текущий момент времени;

$|t_{k+1} - t_0| = \Delta t$ – одна итерация (шаг по времени);

k – количество границ, от которых частица отразилась.

Следует обратить внимание на одно важное замечание: траектория движения границы представляет собой кусочно-линейную функцию, это связано с тем, что для поиска точки пересечения траектории частицы и границы используется специальный метод [1].

Алгоритм

Следует подчеркнуть два условия, исходящих из постановки математической модели и приводящих к высокому уровню параллелизма работы приложения. Первое (очевидное) условие заключается в том, что частицы между собой не взаимодействуют. Вторым условием является то, что траектория границы не меняется при взаимодействии с частицей, поскольку масса границы является бесконечно большой по сравнению с границей. Это значит, что не нужно корректировать траекторию границы после первого столкновения с частицей и делать перерасчет траекторий для остальных частиц.

Схему алгоритма условно можно разбить на следующие большие блоки:

1) задание начальных условий;

2) вычисление нового местоположения частиц с учетом движения границ;

- 3) перемещение границ;
- 4) вычисление макроскопических характеристик [1];
- 5) визуальное представление (отрисовка) частиц и границ.

В 1-м блоке устанавливаются параметры для частиц и границ.

Блоки 2–5 представляют собой одну итерацию, из которой последние 2 блока можно отбросить. Наиболее ресурсоемкий блок, в котором происходят основные расчеты, является 2-й. Алгоритм расчета траектории движения одной частицы для 2-го блока представлен ниже:

Algorithm 1. Алгоритм расчета траектории частицы

Input: частица, шаг по времени и границы

Output: частица с новыми параметрами

procedure Move (частица, шаг по времени, границы)

while бесконечный цикл **do**

for перебор всех границ **do**

if пересекла ли точка границу **then**

определение нового местоположения и момент времени столкновения с границей

if принадлежит ли точка области определения границы **then**

if момент времени столкновения является минимальным в цикле **then**

фиксация номера границы, с которой частица столкнулась

фиксация нового местоположения

фиксация времени столкновения

end if

end if

end if

end for

if взаимодействовала ли частица с границей **then**

корректировка частицы (местоположение, скорость и вектор направления) с учетом взаимодействия с границей

корректировка времени

else

корректировка частицы (местоположение), невзаимодействующей с границами

return частица с новыми параметрами

end if

end while

end procedure

Корректировка частицы, которая взаимодействует с границей, происходит по закону зеркального отражения с переходом в систему отчета, в которой граница становится неподвижной. В частности, новое местоположение частицы выбирается из минимального времени столкновения с границей.

Корректировку времени (в рамках одной итерации) необходимо производить следующим образом: с одной стороны, необходимо уменьшать значение оставшегося времени, поскольку местоположение частицы меняется после отражения, с другой стороны, необходимо суммировать время, чтобы корректно определять местоположение границы, поскольку местоположение границы однозначно определяется.

Данный алгоритм имеет следующие характерные особенности:

1. Шаг по времени необходимо задавать таким образом, чтобы для каждой итерации определялось однозначное пересечение траекторий частицы и границы.

2. Изменять вектор направления и скорость границы можно только между итерациями.

В 3-м блоке происходит вычисление нового местоположения для каждой границы в соответствии с заданным шагом по времени. При этом после перемещения границы можно менять ее скорость и вектор направления.

Моделирование и анализ результатов

Далее приводится серия различных примеров с одинаковым количеством ($N = 10^7$) и расположением частиц (в начале системы координат, т. е. в т. $M = (0,0,0)$) в начальный момент времени ($t = 0$). Скорость частиц одинакова ($|v| = 1$), а их векторы направления определяются случайным образом с равномерным распределением. Шаг одной итерации (Δt) равен 0.001.

Границы определяются с помощью аналитических уравнений и коэффициентов при них, а их движение – по пилообразному закону. Их функция скорости имеет ступенчатый вид, представленный ниже:

$$u(t) = \begin{cases} u_0, & k \cdot \Delta t \cdot [t^*] \equiv 0 \pmod{2} \\ -u_0, & k \cdot \Delta t \cdot [t^*] \equiv 1 \pmod{2} \end{cases}, \quad (5)$$

где u_0 – скорость границы, заданная в начальный момент времени;

k – дополнительный параметр, эквивалентный числу итераций, после которого происходит изменение вектора скорости;

$[t^*]$ – целая часть от текущего момента времени ($t^* > 0$).

В примерах для более наглядного представления характеристик частиц применяется градиентная раскраска, такая, что цвет частицы зависит от ее вектора направления.

Тест 1. Граница представляет собой шар $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, для которого параметры кусочно-линейной функции скорости определяются, как $u_0 = 1 \cdot (1,0,0)$, $k = 1000$.

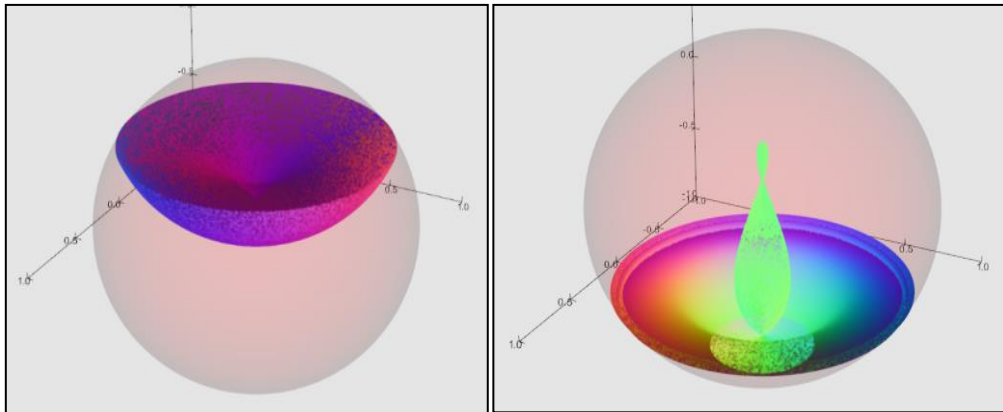


Рис. 1. Распределение частиц идеального газа в движущемся шаре:
 слева – $t = 0,8$; справа – $t = 1,5$

Тест 2. Границы представляют собой куб, у которого грани ($x = 1/2$, $x = -1/2$, $y = 1/2$, $y = -1/2$, $z = 1/2$, $z = -1/2$) движутся либо навстречу друг к другу, либо прочь друг от друга (параметры движения определяются попарно $u_0 = -0.4 \cdot (1,0,0)$, $u_0 = 0.4 \cdot (1,0,0)$; для всех $k = 1000$).

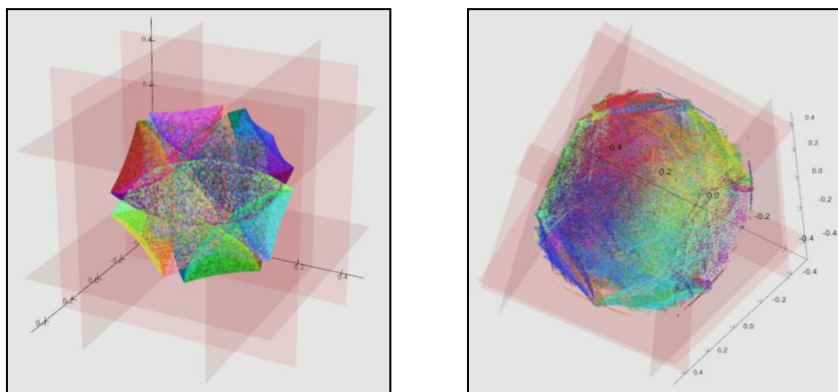


Рис. 2. Распределение частиц идеального газа ($N = 10^7$) в кубе с подвижными границами: слева – $t = 0,6$; справа – $t = 1,7$

Анализ результатов. Расчеты проводились в одном вычислительном узле (система с общей памятью) с классическим процессором Intel Xeon E5-2690V2 3GHz (10 ядер) [5] с 32 ГБ ОЗУ. В качестве технологии распараллеливания был выбран стандарт OpenMP. В качестве компилятора был выбран Intel C/C++ Compiler v16.0 с опциями – O2-openmp-inline-level=2. Общее время моделирования $t = 2$.

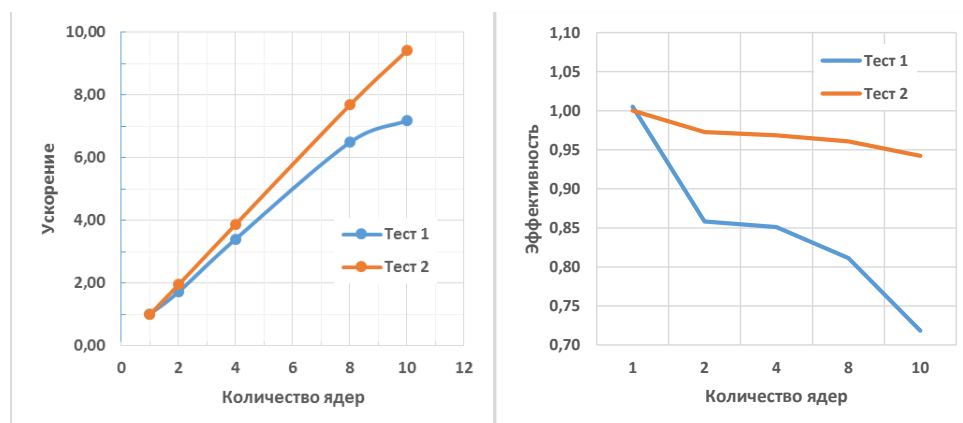


Рис. 3. Ускорение и эффективность OpenMP-программы

На рис. 3 представлены графики зависимости ускорения и эффективности от количества ядер. Из графика зависимости ускорения от количества ядер видно, что во втором тесте наблюдается практически линейный рост ускорения и сохраняется высокая эффективность (свыше 94 %). Снижение эффективности и ускорения с увеличением числа ядер в первом тесте по сравнению со вторым связано с увеличением количества накладных расходов, приходящихся на один поток.

Заключение

Одним из способов воздействия на среду, состоящую из частиц газа или жидкости является изменение ее границ (областей) с течением времени. В частности, на практике необходимы гидродинамические параметры течения (давление, температура и т. д.) частиц как для всей области, так и для какой-то ее подобласти. Управление такими параметрами, воздействуя на границы, – одна из сложнейших задач на сегодняшний день. Практическое применение даже простых моделей, связанных с данной задачей, огромно. Например, построение видимой части космоса, основанной на распределении излучения (фотонный газ), где движущимися границами являются массивные объекты, или построение фильтрационной модели пласта.

Разработан программный комплекс, предназначенный для моделирования отражения невзаимодействующих частиц от областей (стенок) произвольной геометрии и позволяющий отобразить эту динамику визуально. Представлен и реализован алгоритм для воспроизводительных систем, тесты показали высокий уровень параллелизма.

Литература

1. Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Быковских Д. А. Управление динамикой невзаимодействующих частиц в плоской области // Вестник кибернетики. Сургутск. гос. ун-т. Сургут : ИЦ СурГУ. 2015. № 3 (19). С. 141–152.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. М. : Наука, 1965. 204 с
3. Наплеков Д. М., Тур А. В., Яновский В. В. Минимальная модель ускорения Ферми // Журнал технической физики. Спб : Наука. 2010. Т. 80. Вып. 5. С. 11–22.
4. Betelin V. B., Galkin V. A. Control of Incompressible Fluid Parameters in the Case of Time-Varying Flow Geometry // Doklady Mathematics. 2015. Vol. 92. № 1. P. 511–513.
5. Intel Xeon Processor E5-2690 v2 (25M Cache, 3.00 GHz) Спецификации // Intel Corporation. URL: http://ark.intel.com/ru/products/75279/Intel-Xeon-Processor-E5-2690-v2-25M-Cache-3_00-GHz (дата обращения: 04.02.2016).

УДК 532.5:531.822:519.87:517.9

*Галкин В. А., Дубовик А. О.
Galkin V. A., Dubovik A. O.*

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДИНАМИКОЙ СЛОИСТОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В РАМКАХ МОДЕЛИ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

TOWARDS LAYERED FLOW DYNAMICS CONTROL OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID WITHIN MAGNETOHYDRODYNAMICS MODEL

На основе модели магнитной гидродинамики рассматривается задача управления динамикой слоистого течения вязкой несжимаемой жидкости. В качестве управляющих факторов рассматривается внешнее магнитное поле, а также движущиеся границы области течения.

Ключевые слова: управление течением, уравнения магнитной гидродинамики.

Магнитная гидродинамика (МГД) объясняет множество явлений космической физики: земной и солнечный магнетизм, происхождение магнитных полей в Галактике, хромосферные вспышки на Солнце, магнитные бури и др. На основе магнитной гидродинамики создаются МГД-генераторы, МГД-насосы, а также возможно осуществление управляемого термоядерного синтеза.

Описание трехмерных движений жидкости, особенно при наличии нетривиальных дополнительных полей (например, магнитного поля в случае МГД), представляет сложную нелинейную задачу, решение которой в виде точных формул удастся получить крайне редко, а численные расчеты требуют существенных вычислительных ресурсов и не всегда могут проводиться с гарантированной точностью. Поэтому подтверждением результатов вычислительного эксперимента служит сравнение с натурными экспериментами или аналогичными расчетами других авторов. Также возможна проверка результатов численного моделирова-

ния на аналитических решениях – некоторых классов решений исходной более общей задачи, полученных при дополнительных ограничениях. Так, в работах [1; 2] формулируются задачи управления течением жидкости для стационарной модели МГД вязкой несжимаемой жидкости в ограниченной области с непроницаемой идеально проводящей границей. В [5] для уравнений идеальной МГД описывается класс решений с постоянным давлением.

В данной работе рассматривается задача управления течением вязкой несжимаемой проводящей жидкости, играющая важную роль в ряде прикладных областей МГД, в том числе при разработке МГД-генераторов, создании новых подводных двигателей, моделирования систем охлаждения ядерных реакторов, управлении термоядерным синтезом. В работе [3] отмечается актуальность задач управления течением жидкости также в связи с необходимостью создания отечественной технологии «цифровое месторождение». В частности, для нефтегазовой отрасли рассматриваемый класс задач непосредственно связан с моделированием отклика месторождения на динамические воздействия различных типов (механические, тепловые, электрические, химические и т. п.), что позволяет провести оптимизацию воздействий с целью повышения коэффициента извлечения нефти.

Система уравнений МГД несжимаемой жидкости в открытой пространственной области $D \subset R^3$ при условии соленоидальности вектора магнитного индукции $\mathbf{B}(x, t)$ в декартовых координатах $\{x_1, x_2, x_3\}$ имеет вид:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} + \frac{1}{4\pi\rho} [\text{rot } \mathbf{B} \times \mathbf{B}], \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{rot}[\mathbf{u} \times \mathbf{B}] + \nu_m \Delta \mathbf{B}, \quad (3)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \chi \Delta T + \frac{1}{c_p} \frac{\nu}{2} \sum_{i,j=1}^3 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2, \quad (5)$$

где t – время, $\rho > 0$ – плотность жидкости, $\mathbf{u} = \{u_1(x, t), u_2(x, t), u_3(x, t)\}$ – поле скоростей, $p(x, t)$ – давление, $T(x, t)$ – поле температур, ν – кинематическая вязкость жидкости, ν_m – магнитная вязкость жидкости, χ – коэффициент температуропроводности среды, c_p – теплоемкость жидкости. В случае несжимаемой жидкости система уравнений (1) – (5) распадается на две независимые части: систему (1) – (4) и уравнение энергии (5).

Рассмотрим задачу о слоистом течении (ортогонально оси Ox_2 , $x_2 \in [0, l]$, вдоль плоскости $x_1 Ox_3$) несжимаемой жидкости, при котором динамика жидкости задается полем скоростей

$$u(x, t) = \begin{pmatrix} u_1(x_2, t) \\ 0 \\ u_3(x_2, t) \end{pmatrix}, \quad x_2 \in [0, l], \quad t > 0. \quad (6)$$

Сделаем несколько предположений, а именно:

$$\nu_m = \nu, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \alpha \mathbf{u}, \quad \alpha = \text{const}, \quad (8)$$

$$p = -\frac{1}{8\pi} \mathbf{B}^2. \quad (9)$$

При выборе поля давления p в виде (9) уравнения (1), (2) могут рассматриваться независимо от (3), (4). При данных предположениях будет справедлива следующая теорема.

Теорема. Пусть \mathbf{u} – вектор скорости жидкости, компоненты которого удовлетворяют решению одномерного уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_2^2}, \quad i=1, 3, \quad x_2 \in (0, l), \quad t > 0, \quad (10)$$

кроме того, пусть имеют место предположения (7) – (9), тогда тройка $(\mathbf{u}, p, \mathbf{B})$ является решением системы (1) – (4).

Доказательство. Из (8) следует $[\text{rot } \mathbf{u} \times \mathbf{B}] \equiv 0$ и эквивалентность (2) и (4), а из (7), (8) следует эквивалентность (3) и (10). Условие (2) и тождество $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = 0$ выполняются в силу вида вектора скорости (6). Из тождества $\frac{\nabla \mathbf{B}^2}{2} \equiv (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + [\text{rot } \mathbf{B} \times \mathbf{B}]$, предположения (9), следует равносильность уравнений (1) и (10). Что и требовалось доказать.

Задача (1), (2), (5) с полем скоростей (6) рассматривалась в [4] на отрезке $[0;1]$ в связи с рассмотрением задачи об управлении течением вязкой несжимаемой жидкости посредством движения границы области течения. В качестве управляющего воздействия на границе течения были выбраны условия прилипания

$$u_i(x_2, t)|_{x_2=0} = 0, \quad u_i(x_2, t)|_{x_2=1} = 0, \quad i=1, 3.$$

На границе также выполнялось условие теплонепроницаемости стенок

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{x_2=1} = 0.$$

Расчетные значения поля температур представлены на рис. 1 и 2. Соответствуют закону диссипации кинетической энергии потока жидкости в тепловую.

В силу (8) возможно, управляя электромагнитным полем, задавать динамику скорости течения жидкости.

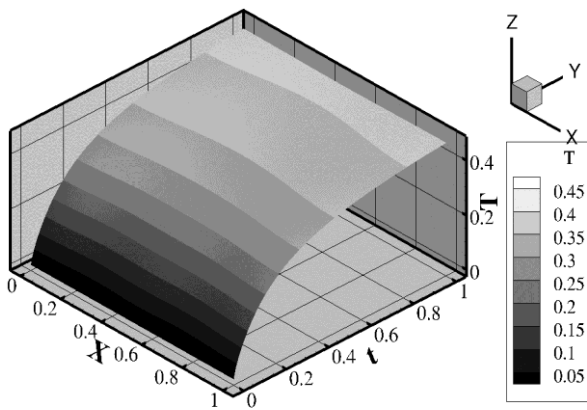


Рис. 1. Поле температур $T(x_2, t)$

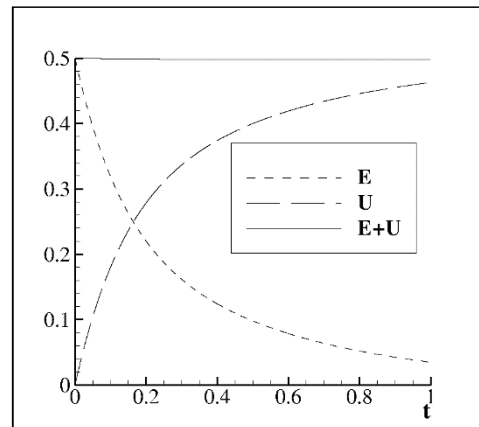


Рис. 2. Диссипация кинетической энергии (E) во внутреннюю энергию (U), их сумма ($E+U$)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-41-00059-урал-а)

Литература

1. Алексеев Г. В. Задачи управления для стационарных уравнений магнитной гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости // Прикладная математика и тех. физика. 2003. Т. 44. № 6. С. 170–179.
2. Алексеев Г. В. Разрешимость задач управления для стационарных уравнений магнитной гидродинамики вязкой жидкости // Сибирск. математ. журн. 2004. Т. 45. № 2. С. 241–263.

3. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Задачи управления параметрами несжимаемой жидкости при изменении во времени геометрии течения // ДАН. 2015. Т. 463. № 2. С. 1–3.
4. Галкин В. А., Дубовик А. О. Об управлении тепловыделением в течении вязкой несжимаемой жидкости посредством движения границы области течения // Вестник кибернетики. Электрон. журн. Сургутск. гос. ун-т. Сургут : ИЦ СурГУ. 2015. № 3 (19). С. 136–140.
5. Головин С. В. Естественная система координат и точные решения для уравнений идеальной магнитной гидродинамики // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4 (3). С. 722–724.

УДК 661.185:54.05:622.276.6

Журавлева Л. А.
Zhuravleva L. A.

РАЗРАБОТКА И СВОЙСТВА ИНВЕРТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА ОСНОВЕ ЭФИРА ТРИЭТАНОЛАМИНА ЛИНОЛЕВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В НЕФТЕДОБЫЧЕ

RESEARCH TRIETHANOLAMINE ESTER - LINOLEIC ACID - BASED INVERT EMULSIONS FOR USE IN OIL RECOVERY

В работе приведены результаты синтеза поверхностно-активных веществ по реакции этерификации линолевой кислоты триэтанололамином в присутствии кислотного катализатора путем азеотропной отгонки воды. Осуществлен компонентный подбор эмульсии состава: ПАВ, дизельное топливо, вода и исследованы некоторые свойства. Установлено, что при соотношении компонентов 6–10 : 35–50 : 1–3 соответственно эмульсия неограниченно агрегативно устойчива при $25,0 \pm 0,2$ °С и $80,0 \pm 0,2$ °С, стабильна к воздействию сероводорода. Установлено, что пластическая и динамическая вязкости, статическое напряжение сдвига, плотность и фильтрация соответствуют и/или выше норм, предъявляемых к буровым растворам.

Ключевые слова: обратные эмульсии, инвертные эмульсии, эмульгаторы, эфиры триэтанололамина высших ненасыщенных жирных кислот, стабильность эмульсий.

Выражаем глубокую благодарность кандидату химических наук, старшему сотруднику научно-исследовательского отдела сопровождения и строительства скважин Сургутского научно-исследовательского и проектного института ОАО «Сургутнефтегаз» Лодиной Ирине Викторовне за замечания и ценные советы по осуществлению научно-исследовательской работы.

Одной из приоритетных задач нефтедобывающей промышленности является увеличение извлекаемости нефти из пласта путем использования инновационных методов. В настоящее время с этой целью широко используют метод бурения горизонтальных и многозабойных скважин, гидроразрыв пластов [14; 16], метод уплотнения сетки скважин, создания внутрипластовых оторочек и регулирования фильтрационных потоков с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ), полимеров [9] и композиций осадкогелеобразующих веществ [1; 19; 20]. Используют волновое [5], электрическое и микробиологическое воздействия [2; 3; 10; 11]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки и применяется избирательно или в сочетании в зависимости от геологических особенностей месторождений [7; 8]. Однако доля физико-химических методов в системе методов увеличения нефтеотдачи пласта составляет около 4 %, хотя применение ПАВ сохраняет коллекторские свойства пласта, положительно влияет на подготовку и транспортировку нефти [17; 18; 22], что связано с уникальными коллоидно-химическими свойствами молекул и дисперсий ПАВ.

Так, использование ПАВ в системе «вода – нефть» эффективно снижает межфазное натяжение, что вызывает деформацию капель нефти и увеличивает фильтрацию углеводородной фазы через поры. Установлено, что под действием ПАВ происходит эффективное снижение краевого угла смачивания, что снижает адгезионное взаимодействие нефти с породой и повышает извлекаемость нефти [13]. Улучшаются реологические свойства нефти, что также обеспечивает лучшее вытеснение нефти из пласта. Все это стимулирует синтез и разработку новых и качественное улучшение уже используемых эмульсий и, в частности, эмульгаторов инвертных эмульсий [3; 6; 12; 15].

С усложнением геологических условий добычи нефти к коллоидным системам ПАВ предъявляются более жесткие требования: высокая агрегативная устойчивость при высоких температурах и давлении, экологическая безопасность и др.

Анализ публикаций показал, что этим требованиям отвечают инвертные (обратные) эмульсии «вода в масле» [4; 21; 23]. Поэтому остается актуальной разработка эффективных эмульгаторов инвертных эмульсий.

Целью настоящей работы является синтез ПАВ на основе триэтаноламина (ТЭА) и линолевой кислоты (ненасыщенной жирной кислоты) и исследование возможности его использования как эмульгатора инвертных эмульсий; подбор компонентного состава эмульсии «вода в масле» и исследование некоторых реологических свойств для возможности ее использования в качестве бурового раствора.

Выбор эфира триэтаноламина линолевой кислоты как эмульгатора инвертных эмульсий обоснован тем, что применяемые в настоящее время ПАВ Эмультал и Нефтенол НЗ – это амиды, амидоэфиры и эфиры жирных кислот таллового масла и таллового пека состава $C_8 - C_{24}$ и этаноламинов. Можно предположить, что данные соединения, обладая различной величиной гидрофильно-липофильного баланса, будут проявлять различную эмульгирующую способность. Поэтому остается актуальным синтез ПАВ на основе этаноламинов и отдельных высших жирных кислот и установление их коллоидно-химических и реологических свойств.

В настоящей работе в качестве жирной кислоты использовали линолевою кислоту ТУ 6-09-1866-77, в качестве амина – триэтаноламин ТУ 2423-005-78722668-2010, в качестве углеводородной фазы – дизельное топливо ГОСТ Р 52368-2005.

Задачами исследования являлось установление коллоидно-химических свойств синтезированного ПАВ и реологических характеристик дисперсии состава: ПАВ, дизельное топливо, вода, вещества-понижители фильтрации путем исследования поверхностного и межфазного натяжения, смачивающей способности, агрегативной устойчивости, стабильности к воздействию сероводорода, термостабильности, вязкости и статического напряжения сдвига.

С этой целью, прежде всего, синтезировали эфир триэтаноламина линолевой кислоты. Синтез проводили по известной методике [23] по реакции этерификации линолевой кислоты триэтаноламином в присутствии концентрированной серной кислоты как кислотного катализатора путем азеотропной отгонки воды. Количество воды, выделенное в результате реакции, соответствует расчетному и выход эфира триэтаноламина линолевой кислоты составил $76,65 \pm 0,08$ %. Синтезированный ПАВ представляет собой маслянистую однородную прозрачную жидкость коричневого цвета, плотностью $0,935$ г/см³.

Эмульгатор готовили по методике, описанной в работе Яновского В. А. [23]. Для этого ПАВ охлаждали до температуры $60-40$ °С и при непрерывном перемешивании смешивали с дизельным топливом в соотношении 1 : 2 по объему. Эмульгатор представляет собой маслянистую прозрачную однородную жидкость светло-коричневого цвета, плотностью $0,853$ г/см³. Далее визуально устанавливали устойчивость эмульгатора от момента приготовления до момента разрушения коллоидной системы. С этой целью эмульгатор объемом 15 мл наливали в пробирки, герметично закрывали притертыми пробками и помещали в термостат при температуре $25,0 \pm 0,2$ °С. Эмульсия считается стабильной, если не расслаивается в течение 24-х часов. Установлено, что эмульгатор на основе синтезированного ПАВ неограниченно агрегативно устойчив.

Далее провели компонентный подбор эмульсии состава: ПАВ, дизельное топливо, вода. Для этого провели предварительный многофакторный эксперимент, в котором варьируемыми параметрами были объемные доли компонентов эмульсии, которые меняли в широких пределах (% об.): эмульгатор от 1 до 25; дизельное топливо от 1 до 80; водный 15 % раствор хлорида кальция ГОСТ 450-77 от 1 до 100. Эмульсию готовили при непрерывном перемешивании верхнеприводной пропеллерной мешалкой в течение 20–25 мин при этом строго соблюдали следующий порядок добавления ингредиентов: в стакан наливали необходимый объем углеводородной фазы (дизельное топливо), затем добавляли эмульгатор и после получения однородной системы – по каплям приливали минерализованную воду. После чего эмульсию еще перемешивали в течение 10–15 мин. Агрегативную устойчивость эмульсии определяли при температуре $25,0 \pm 0,2$ °С по методике, описанной выше. В результате были получены несколько соотношений компонентов, при которых эмульсии стабильны. Некоторые результаты компонентного подбора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Компонентный подбор эмульсии на основе эфира триэтаноламина линолевой кислоты (фрагмент)

Эмульгатор (% об.)	H ₂ O (% об.)	Дизельное топливо (% об.)	Агрегативная устойчивость при 25 °С	Термостабильность при 80 °С	Устойчивость к воздействию к H ₂ S
1–2	20–25	4–5	стабильна	не стабильна	не стабильна
1–2	4–5	20–22	не стабильна	не стабильна	не стабильна
1–2	9–10	40–42	не стабильна	не стабильна	не стабильна
1–2	2–3	13–14	не стабильна	не стабильна	не стабильна
4–5	16–20	95–100	стабильна	не стабильна	стабильна
6–10	1–3	35–50	стабильна	стабильна	стабильна

В результате были подобраны две эмульсии состава эмульгатор : H₂O : дизельное топливо соответственно равные 4–5 : 16–20 : 95–100 (эмульсия 1-го типа) и 6–10 : 1–3 : 35–50 (эмульсия 2-го типа), которые показали неограниченную агрегативную устойчивость при 25 °С. Эмульсия 1-го типа представляет плотный однородный гель белого цвета, плотностью 1,030 г/см³. Эмульсия 2-го типа – это плотный однородный гель светло-серого цвета, плотностью 0,913 г/см³.

Далее определили тип эмульсий. С этой целью эмульсию объемом 1 мл при непрерывном перемешивании добавляли в 250 мл дизельного топлива (неполярная дисперсионная среда) и дистиллированную воду (полярная дисперсионная среда). Установлено, что в неполярной дисперсионной среде обе эмульсии образуют однородную, гомогенную систему и с течением времени не наблюдается коалесценции эмульсий. В полярной дисперсионной среде образуется гетерогенная система с микрокаплями исследованных эмульсий, которые с течением времени начинают укрупняться за счет коалесценции и оседать на дно стакана в виде одной сферической капли. Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследуемые эмульсии и 1-го и 2-го типа являются инвертными.

Термостабильность эмульсий определяли визуально, для этого в пробирки помещали эмульсии выбранного состава, пробирки закрывали притертыми пробками и помещали в термостат при температуре $80,0 \pm 0,2$ °С. Эмульсия считается стабильной, если в течение 8 часов не наблюдается ее разрушения. Установлено, что эмульсия 1-го типа неустойчива при температуре $60,0 \pm 0,2$ °С и полностью разделяется на две фазы при температуре $80,0 \pm 0,2$ °С. Эмульсия 2-го типа стабильна в течение 8 ч при температурах $80,0 \pm 0,2$ °С и $120,0 \pm 0,2$ °С (исследование стабильности при более высокой температуре не проводилось).

На основании полученных результатов для дальнейших исследований была выбрана эмульсия 2-го типа, как термостабильная.

Устойчивость к воздействию сероводорода определяли визуально при насыщении эмульсии газом. Для этого через эмульсию пропускали сероводород до появления постоянного потока газа через слой коллоидной системы и далее устанавливали стабильность при температуре $25,0 \pm 0,2$ °С по методике, описанной выше. Установлено, что эмульсия устойчива к воздействию сероводорода в течение 24 ч.

Для оценки коллоидно-химических свойств эмульсии методом Вильгельми установили межфазное натяжение в системах «нефть – вода», «эмульсия – нефть», соответственно равные 114,32 мН/м и 41,57 мН/м, что, вероятно, будет положительно влиять на извлекаемость нефти из пласта. Результаты исследования коллоидно-химических характеристик исследуемой эмульсии приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Коллоидно-химические характеристики эмульсии состава
эмульгатор : вода : дизельное топливо 6 – 10 : 1 – 3 : 35 – 50 (% об.)**

Агрегативная устойчивость при 25 °С	Термостабильность при 120°С	Межфазное натяжение		Краевой угол смачивания		Работа адгезии	
		«нефть – вода», мН/м	«нефть – эмульсия», мН/м	парафин	битум	парафин	битум
> 24 ч	> 8 ч	114,32	41,57	53°	40°	44,1	8,2

Для придания коллоидной системе определенных реологических свойств в предложенный состав эмульсии 2-го типа добавили кальматант – модифицированную глину (органобентонит ТУ 2458-1719708-00) в соотношении от 2,0 до 7,0 % мас. из расчета не более 6 кг на 1 м³ эмульсии. Была подготовлена инвертная эмульсия состава эмульгатор : СаСl₂ : Н₂О : органобентонит : дизельное топливо, равного 20–40 : 1–3,4 : 2–6,8 : 3,6–10,8 : до 100 % мас. Эмульсию готовили по методике, описанной выше. Получили однородную, устойчивую гелеобразную массу светло-серого цвета, плотностью 1,07 г/см³.

Реологические свойства определяли по стандартным физико-химическим методам контроля буровых растворов, результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3

Реологические свойства исследованной коллоидной системы

ρ , г/см ³	Φ , см ³ /30 мин.	СНС, ДПа	τ_0 (ДНС), ДПа	η , МПа·с	Электростабильность, В
20 – 40 : 1 – 3,4 : 2 – 6,8 : 3,6 – 10,8 : до 100 % мас.					
1,07	6	30,24/34,08	287,5	76,8	1450
Параметры, предъявляемые к буровым растворам					
от 0,85 до 2,00	3 – 5	$\geq 30,3$	≥ 210	≥ 45	≥ 100

Фильтрацию определяли на фильтр-прессе марки ВМ-6, как объем отфильтрованной дисперсионной среды за 30 мин пропускания эмульсии через бумажный фильтр ограниченной площади (Φ , см³/30 мин). Фильтрация исследованной эмульсии при данных соотношениях органофильной глины составила 6 см³/30 мин, что может быть снижено увеличением ее содержания.

Пластическую вязкость (η) определяли как сопротивление течению при перемешивании при 600 и 300 об/мин, угол закручивания соответственно составил 50 и 33, а пластическая вязкость – 76,8 МПа·с. Динамическая вязкость (τ_0) или динамическое напряжение сдвига (ДНС, ДПа) исследованной системы составила 287,5 ДПа.

Статическое напряжение сдвига (СНС, ДПа) характеризует прочность тиксотропной структуры и для исследованной коллоидной системы составила 30,24/34,08 ДПа через 1 и 10 минут соответственно.

Электростабильность определяли по величине напряжения электрического тока, необходимого для электропробоя слоя эмульсии, помещенной между электродами. Данный параметр характеризует степень дисперсности эмульгированной воды и прочность стабилизирующего слоя эмульгатора. Чем стабильнее система, тем выше потенциал пробоя, вызывающий коалесценцию капель эмульсии. Для коллоидных систем с избытком углеводородной фазы напряжение потенциала пробоя соответствует 100 В. Электростабильность эмульсии определяли на тестере стабильности эмульсии марки ТЭЭ-01 С, величина которой составила 1450 В, что свидетельствует о высокой электростабильности исследованной эмульсии.

Выводы

1. По реакции этерификации в кислой среде путем азеотропной отгонки воды синтезирован ПАВ эфир триэтаноламина линолевой кислоты.
2. Установлена высокая эмульгирующая способность ПАВ как эмульгатора инвертных эмульсий.
3. Осуществлен компонентный подбор эмульсии состава эмульгатор, дизельное топливо, минерализованная вода соответственно равный 6 – 10 : 35 – 50 : 1 – 3, установлена ее агрегативная устойчивость.
4. Установлена термостабильность эмульсии при температуре $80,0 \pm 0,2$ °С $120,0 \pm 0,2$ °С и устойчивость к воздействию сероводорода.
5. Проведены лабораторные исследования коллоидно-химических и реологических свойств исследованной эмульсии. Установлено, что свойства исследованной эмульсии соответствуют или выше параметров, предъявляемых буровым растворам.

Литература

1. Алтунина Л. К., Кувшинов В. А. Нефтеорганические гели для увеличения нефтеотдачи неоднородных пластов с высокой температурой // Нефтяное хозяйство. 1995. № 4. С. 4.
2. Андреев В. Е., Котенев Ю. А., Загидуллина Л. Н. Биотехнологические методы увеличения нефтеотдачи пластов. Уфа : УГНТУ, 2000. 137 с.
3. Бурже Ж., Сурио П., Камбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов / пер. с франц. М. : Недра, 1989. 422 с.
4. Байда А. А., Агаев В. Г. Разработка мицеллярных растворов и микроэмульсий для увеличения нефтеотдачи пласта // Нефть и газ. Химия и технология переработки нефти и газа. 2010. № 3. С. 78–85.
5. Ганиев Р. Ф., Украинский А. Е., Фролов К. В. Волновой механизм ускорения движения жидкости в капиллярах пористых сред // ДАН СССР. 1989. Т. 306. № 4. С. 258 – 262.
6. Деркач С. Р., Берестова Г. И., Мотылева Т. А. Использование ПАВ для интенсификации нефтедобычи при первичном и вторичном вскрытии пластов // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. № 4/1. С. 784–792.
7. Керимов М. З., Гамидов Г. А., Бабаев М. Б. Комплексный метод оценки эффективности процесса разработки многопластового месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2003. № 1. С. 42–46.
8. Курбанбаев М. И., Мирошников В. Я., Толоконский С. И. и др. Применение многофункциональных поверхностно-активных реагентов для нефтедобычи и транспорта // Нефть. Газ. Новации. 2010. № 10. С. 33–38.
9. Кондрашев О. Ф., Шарипов А. У. Модификация структурно-механических свойств полимеров в пористой среде. М. : Геоинформак, 2000. 56 с.
10. Котенев Ю. А., Загидуллина Л. Н., Андреев В. Е. и др. Микробиологический метод увеличения нефтеотдачи пластов на основе активного ила биологических очистных сооружений // Нефтяное хозяйство. 2004. № 4. С. 40–50.

11. Кучумов Р. Я. Применение метода вибровоздействия в нефтедобыче. Уфа.: Башкнигоиздат, 1988. 111 с.
12. Крянев Д., Петраков А., Рогова Т., Билинчук А. Экспериментальное и промышленное испытания обратных эмульсий на основе эмульгатора ЭКС-ЭМ // Бурение и нефть. 2006. № 8. С. 8–11.
13. Орлов Г. А., Кендис М. Ш., Глушченко В. Н. Применение обратных эмульсий в нефтедобыче. М. : Недра, 1991. 224 с.
14. Петров Н. А., Коренько А. В., Давыдова И. Н., Комлева С. Ф. Обработка бурового раствора при бурении скважин с горизонтальным окончанием // Нефтегазовое дело. 2007. № 4. С. 50–58.
15. Рогачев М. К. Разработка эмульгаторов обратных эмульсий для добычи нефти // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: Перспективные процессы и продукты малотоннажной химии : материалы XIII междунар. науч.-технич. конф. Тула. Тула : Изд-во Тульск. гос. пед. ун-та, 2000. Вып. 3. С. 126–128.
16. Силин М. А., Магадова Л. А., Давлетшина Л. Ф. и др. Стимуляция терригенных коллекторов по межтрубному пространству добывающих скважин // Нефтепромысловое дело. 2012. № 7. С. 27–30.
17. Солодников А. О., Киселев К. В., Андреев О. В. Исследование межфазного натяжения на границе нефть-кислотный раствор в присутствии поверхностно-активных веществ // Вестник ТюмГУ. 2013. № 5. С. 148–155.
18. Фунг Ван Хай, Шамаев Г. А. Выбор эмульсии для проведения обработок призабойной зоны пласта нижнего олигоцена месторождения Белый Тигр // Нефтяное хозяйство. 2008. № 8. С. 88.
19. Халадов А. Ш., Антипин Ю. В. Современные представления об интенсификации добычи нефти из высокотемпературных карбонатных пластов месторождений Чеченской республики // Нефтегазовое дело. Разработка нефтегазовых месторождений. 2009. Т. 7. № 1. С. 32–36.
20. Хакимов А. А., Сатаров Р. И., Качурин А. В. Совершенствование технологии кислотных обработок // Нефтяное хозяйство. 2012. № 3. С. 53–54.
21. Царьков А. Ю., Заворотный В. Л., Живаева В. В., Нечаева О. А. Применение таллового масла и его производных в нефтегазовой отрасли // Бурение. Экспозиция. Нефть, газ. 2012. № 2 (20). С. 8–10.
22. Шакиров А. Н., Исмагилов О. З., Козин В. Г. и др. Исследование коллоидно-химических свойств ПАВ, используемых в эмульсионных методах повышения нефтеотдачи пластов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2003. № 11. С. 39–42.
23. Яновский В. А., Чуркин Р. А., Андротов М. О., Косова Н. И. Синтез и исследование свойств эмульгаторов обратных эмульсий на основе производных кислот дистиллята таллового масла и этаноламинов // Вестник ТомГУ. 2013. № 370. С. 194–199.

УДК 622.257.122:54

Караваяева А. А.
Karavaeva A. A.

**РАЗРАБОТКА ПРЕСНЫХ ВЫСОКОИНГИБИРОВАННЫХ
БУРОВЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В СЛОЖНЫХ
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

**NONSALINE HIGH INHIBITED BOREHOLE DRILLING MUD DEVELOPING
IN SEVERE MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS**

В настоящее время бурение скважин под многостадийный гидроразрыв пласта производится с применением высоко минерализованных буровых растворов, это может привести к экологической катастрофе и гибели местной флоры и фауны. В статье рекомендовано применение силикатного бурового раствора на водной основе, содержащий в себе в качестве ингибирующей добавки силикат натрия или калия (жидкое стекло), по технологическим параметрам и ингибирующей способности не уступающего минерализованному бинарному буровому раствору «МЕГАБУР».

Ключевые слова: буровые растворы, силикатный буровой раствор.

В настоящее время бурение скважин под многостадийный гидроразрыв пласта на Рогожниковском, Ай-Пимском, Высотном и других месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз» производится с применением высоко минерализованных буровых растворов. Это системы: «МЕГАБУР» на основе солей калия и натрия с содержанием хлор ионов от 150 до 220 г/л; «МУЛЬТИБУР» на основе насыщенного раствора хлорида кальция с содержанием хлоридов до 200 г/л. В этих системах содержание токсичных хлоридов превышает предельно допустимую величину для сточных вод в 500–700 раз. Попадание концентрированного солевого раствора в почву может привести к экологической катастрофе и гибели местной флоры и фауны, поэтому остатки минерализованных растворов и засоленный шлам утилизируются в специально отведённые объекты, размещаемые в безопасных от затопления зонах. Утилизация требует больших затрат на вывоз и складирование засоленных отходов, кроме того, на сегодняшний день объёмы хранилищ переполнены.

В связи с этим возникает необходимость создания экологически безопасных растворов, которые по своим технологическим параметрам могли бы соответствовать минерализованным системам.

В течение последних 30 лет были разработаны системы глинистых растворов, получившие название ингибированных. Ингибированные растворы обладают следующими отличительными признаками: способностью повышать устойчивость глинистых пород, слагающих стенки скважин, способностью предупреждать самозамес, т. е. диспергирование и переход в состав промывочной жидкости выбуренных глинистых пород, меньшей чувствительностью к действию электролитов, повышенной глиноёмкостью.

В соответствии с установившейся терминологией ингибирование заключается в частичной регулируемой коагуляции глинистых частиц, приводящей к образованию агрегатов при сохранении общей связности. В ингибированных системах агрегация глинистых частиц ограничивается соответствующими химическими реагентами, а диспергирование предотвращается двух- и более валентными катионами, вводимыми в глинистые растворы в качестве ингибиторов. Поливалентные катионы являются связывающим звеном между отдельными частицами глины, поэтому с увеличением концентрации поливалентных катионов возрастают величина агрегатов глинистых частиц и прочность связи между частицами [2].

В процессе бурения – когда буровой раствор поступает в пласт – происходит гидратация сланцев, их набухание и диспергация, что приводит к снижению механической прочности сланца. Советские ученые показали, что одним из самых эффективных способов для предотвращения обвалов, кавернообразования и прихватов, при наличии глинистых осадочных пород с высоким содержанием воды, является применение силикатного бурового раствора. Механизм предупреждения осложнений назван химическим укреплением [3].

В данной работе рекомендовано применение силикатного бурового раствора на водной основе, рецептура которого приведена в табл. 1.

Таблица 1

Состав силикатного бурового раствора

Наименование реагента	Концентрация реагента	
	% вес	кг/м ³
Глина	2,5–5,0	25,0–50,0
Жидкое стекло (силикат натрия)	4,0–6,0	40–60
КМЦ 1000	0,5–2,0	5–20
Полианионная целлюлоза ВО	0,3–0,6	3,0–6,0
Диспергирующая добавка	4,0–7,0	40–70
Смазывающая добавка	0,3–0,6	3,0–6,0
ПАВ Икдефом	0,04–0,06	0,4–0,6
Баритовый концентрат	15,0–20,0	150,0–200,0

Силикатный раствор – это раствор, содержащий в себе в качестве ингибирующей добавки силикат натрия или калия (жидкое стекло). Он применяется для повышения устойчивости ствола скважины при разбуривании осыпающихся пород (аргиллитов, глинистых сланцев). Принцип их упрочнения основан на лёгком проникновении жидкого стекла в трещины и поры стенок скважины и быстром выделении геля кремниевой кислоты, цементирующей поверхность ствола. При этом скорость гидратации глинистых сланцев уменьшается вследствие адсорбции образующихся полисиликатов на их поверхности. Крепящее действие жидкого стекла усиливается при наличии в породах, слагающих стенки скважины, солей кальция. При взаимодействии жидкого стекла с солями кальция выделяется щёлочь, которая, в свою очередь, образует с солями кальция гидроксид кальция, обладающую крепящим действием.

Принцип повышения устойчивости стенок скважин силикатной системой включает следующее:

1. При поступлении силиката в пору пласта и контакте его с химическими веществами происходит реакция, образуются трёхмерные гели и нерастворимые сгустки, которые на стенках скважины перекрывают поры сланца и мелкие зазоры.

2. Силикаты подавляют капиллярное набухание и диспергацию минералов в сланце.

В рецептуре силикатного раствора применяется диспергатор органической природы – Osno Desco C A (смесь железохромовых солей сульфенированного лигнина). Установлено, что происходит обмен между ионами железа и хрома лигносульфоната и кальция глины. Этот обмен даёт основание предположить, что лигносульфонаты адсорбируются на базальных поверхностях, реагируют с алюминием у рёбер кристаллов глины, при этом высвобождаются ионы железа и хрома, которые затем вступают в ионообменную реакцию с ионами натрия и кальция на базальных поверхностях. С точки зрения полученных технологических параметров, важно отметить действие Osno desco C A как стабилизатора (табл. 2).

Ингибирующую способность растворов исследовали на глинистых образцах, приготовленных путём прессования немодифицированного монтмориллонита. Прибор Dynamic Lainer Swellmeter Complete w/Compactor (тестер динамики набухания глинистых сланцев) фиксировал увеличение высоты образцов в среде исследуемых буровых растворов. На рис. 1

представлена кинетика набухания глины в течение 4 000 минут в системе пресного силикатного бурового раствора и в системе бинарного бурового раствора «МЕГАБУР».

Таблица 2

Технологические параметры силикатного бурового раствора

Параметр	Значение	Значение после прогрева при 110 °С в течение 16 часов	Значение после прогрева при 110 °С в течение 16 часов обработка Osno desko
плотность, кг/м ³	1260	1260	1250
условная вязкость (Т), сек.	90	140	100
водоотдача (В), см ³ /30 мин.	4,4	7	6
СНС, дПа			
за 10 сек.	15	20	15
за 10 мин.	25	35	30
водородный показатель (рН)	10,5	9,5	9,8
пластическая вязкость, мПа	40	45	40
динамическое напряжение сдвига, дПа	140	250	165
коэффициент трения (K _{тр})	0,03	0,03	0,05
содержание твёрдой фазы, %	12	12	14

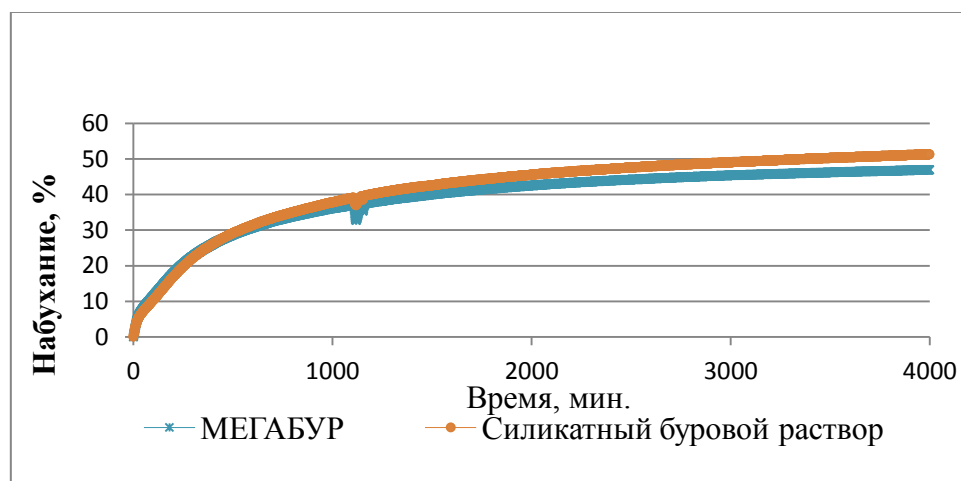


Рис. 1. Кинетика набухания глины в течение 4 000 мин в системе пресного силикатного бурового раствора и в системе бинарного бурового раствора «МЕГАБУР»

Факторы, влияющие на действие силикатного бурового раствора на стенку скважины:

1. Влияние силикатного модуля. Чем больше модуль, тем большее количество силикатных ионов объединены в коллоидных частицах.
2. Влияние количества добавленных силикатов. С увеличением количества силиката в растворе быстро повышается устойчивость стенки скважин в ранние сроки, и медленно повышается устойчивость в более поздние сроки, реологические характеристики растворов становятся хуже, водоотдача становится больше при количестве силиката более 5 % в растворе. Поэтому количество добавления силикатов при бурении практически не должно быть более 6 %.
3. Совместимость с пластом.
4. Влияние органических агентов.

Выводы

1. В лабораторных условиях разработана рецептура пресного высокоингибированного бурового раствора, по технологическим параметрам и ингибирующей способности не усту-

пающего минерализованному бинарному буровому раствору «МЕГАБУР». В состав раствора включены доступные реагенты, каждый из которых целенаправленно регулирует определённый технологический показатель промывочной жидкости.

2. Разработанная рецептура пресного бурового раствора имеет низкий класс опасности, так как все компоненты системы относятся к малоопасным соединениям.

3. Растворы обладают повышенной ингибирующей способностью (среднее значение приращения высоты образцов 47 %).

4. Показатель фильтрации для силикатного бурового раствора 4,4 см³/30 мин., после прогрева – 6,0 см³/30 мин.

5. Работа имеет практическую значимость в случае успешного внедрения предлагаемой технологии, так как бурение скважин на пресном высоко ингибированном буровом растворе позволит снизить не только негативное воздействие отходов бурения на окружающую среду, но и существенно сократить материальные затраты при строительстве скважин в ОАО «Сургутнефтегаз», т. е., в конечном итоге, снизить себестоимость добываемой нефти.

Литература

1. Булатов А. И., Пеньков А. И., Проселков Ю. М. Справочник по промывке скважин. М. : Недра, 1984. 317 с.
2. Грей Дж. Р., Дарли Г. С. Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей). М. : Недра, 1985. 506 с.
3. Паус К. Ф. Буровые промывочные жидкости. М. : Недра, 1967. 311 с.

УДК 622.245.1:622.245.42

*Муллагильдин Р. М., Геворкян И. Э, Кеба Ю. А.
Mullagildin R. M., Gevorkyan I. E., Keba Yu. A.*

КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ КРЕПЛЕНИИ СКВАЖИН НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ОАО «СУРГУТНЕФТЕГАЗ»

SET OF ACTIONS FOR PROBLEMS SOLUTION ARISING BY CEMENTING IN OILFIELD

В последнее время участились случаи плохого и отсутствующего контакта цементного камня с колонной при цементировании кондукторов в интервале многолетнемёрзлых пород от 0 до 350 метров. В статье для решения проблемы представлена разработанная технология промывки ствола скважины с использованием цементировочного агрегата из обвязки тампонажной техники, в качестве разжижителя рекомендуется использовать нитрилотримелфосфовую кислоту (НТФ), разработана рецептура буферной жидкости «БУРС-ГКМ», обладающей широким диапазоном плотности, реологии, низкой фильтрацией и кольматирующими свойствами; для улучшения качества крепления кондукторов предлагается рецептура материала тампонажного облегченного МТО-5-50, обладающего высокими адгезионными и прочностными свойствами.

Ключевые слова: цементирование кондукторов, технология промывки ствола скважины, нитрилотримелфосфовая кислота, БУРС-ГКМ, МТО-5-50.

На некоторых месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз» участились случаи плохого и отсутствующего контакта цементного камня с колонной при цементировании кондукторов в интервале многолетнемёрзлых пород от 0 до 350 м: на Северо-Лабатьюганском, Верхнекалымском, Жумажановском, Русскинском, Савуйском, Федоровском и Быстринском. К примеру, процент отсутствующего контакта на Жумажановском месторождении достигает до 82,6 %.

Причинами плохого качества крепления являются:

- высокие реологические параметры бурового раствора, которые затрудняют процесс вытеснения буферной жидкостью;
 - низкая плотность буферной жидкости, которая приводит к ленточному вытеснению и размыванию в зоне многолетнемёрзлых пород, это вызывает прорыв буферной жидкости в слабые породы, что ведёт к потере циркуляции;
 - невысокие адгезионные и прочностные свойства применяемых облегченных цементов.
- В представленной работе проведены лабораторные исследования, направленные на:
- снижение реологических характеристик буровых растворов с целью улучшения процесса замещения;
 - сокращение времени простоя бурового раствора в скважине во время подготовительных работ перед цементированием;
 - разработку утяжеленной буферной жидкости с высокой реологией;
 - разработку облегченного тампонажного материала с высокими адгезионными и прочностными характеристиками.

В своих научных работах доктор технических наук М. О. Ашрафьян установил зависимость коэффициента вытеснения от соотношения реологии бурового и тампонажного растворов и скорости восходящего потока, которая ранее количественно никем не оценивалась. В работе он привел модель процесса:

$$K_b = 1 - 0,32 \cdot \tau_{0r}/\tau_{0c} + 0,18 \cdot \eta_r/\eta_c + 0,03 \cdot \tau_{0r} \cdot \eta_r/\tau_{0c} \cdot \eta_c + 0,16 \cdot \tau_{0r} \cdot \rho_r/\tau_{0c} \cdot \rho_c + 0,08v \cdot \tau_{0r}/\tau_{0c} - 0,31 \cdot \eta_r \cdot \rho_r/\eta_c \cdot \rho_c,$$

где τ_{0r}/τ_{0c} – динамическое напряжение сдвига;

η_r/η_c – пластическая вязкость;

v – скорость восходящего потока в кольцевом пространстве.

С помощью модели установлено, что наибольшее влияние на коэффициент вытеснения оказывает соотношение динамических напряжений сдвига. Для увеличения коэффициента вытеснения необходимо уменьшать соотношения реологических параметров бурового и тампонажного растворов путём химической обработки [1].

Таким образом, на первом этапе с целью улучшения замещения научно-исследовательской лабораторией буровых, тампонажных растворов и специальных жидкостей «СургутНИПИнефть» предложено во время спуска кондуктора разжижать буровой раствор.

В качестве разжижителя рекомендуется использовать нитрилотримелфосфоновую кислоту (НТФ). Так как нитрилотримелфосфоновая кислота, взаимодействуя с глинистыми минералами, приводит к уменьшению гидратации глинистых частиц и их структурообразующей способности.

В табл. 1 представлены реологические характеристики реального бурового раствора до и после обработки реагентом НТФ.

Таблица 1

**Реологические характеристики бурового раствора (куст 4 Савуйское м/р)
до и после обработки реагентом НТФ**

№ п/п	Наименование	ρ , кг/м ³	УВ, с	ПВ, мПа*с	ДНС, дПа	СНС, 10 ² /10 _{мин}	СНС, 30 _{мин}	СНС, 60 _{мин}	рН	Ф, мл/30 _{мин}
1	Буровой раствор	1215	46	24	91	24/206	302	384	8,9	6,4
2	Буровой раствор+0,2% НТФ	1215	36	17	53	19/139	139	187	6,8	8,0
3	Буровой раствор+0,5% НТФ	1215	21	12	34	5/100	100	126	6,2	10,5
4	Буровой раствор+0,75% НТФ	Нетекущий гель								

При обработке бурового раствора реагентом НТФ с концентрацией 0,2 % наблюдается снижение статического напряжения сдвига (СНС) и, в целом, вязкости бурового раствора. При увеличении концентрации НТФ с 0,75 % до 1 % наблюдается загущение бурового раствора.

После определения реологических характеристик определяли адгезию цементного камня по отношению к металлическому кольцу [2]. Результаты представлены на рис 1.

Значения адгезии цементного камня с металлическими кольцами, выдержанными в буровом растворе, обработанном реагентом НТФ, выше, чем у колец с буровым раствором без разжижителя. Наряду с этим, в качестве сравнения были взяты борсиликатный реагент и детергент противосальниковый, которые только ухудшили адгезию.

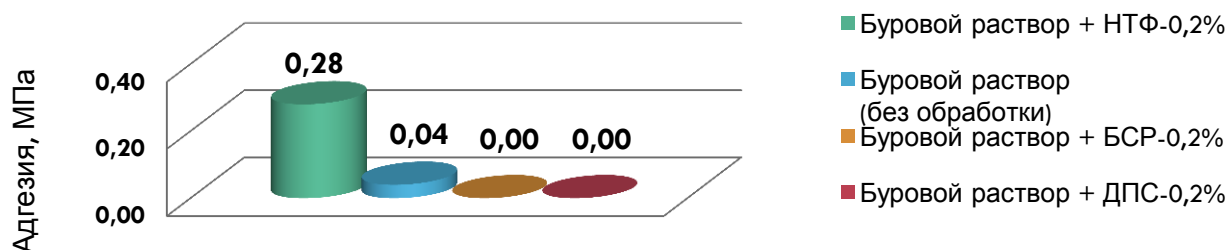


Рис. 1. Адгезия цементного камня ПЦТ Ш-Об-Р 5-50+4-100 к металлу через 2 суток при 22 °С, МПа

Затем проводили расчет по повышению полноты вытеснения растворов при цементировании скважин, с использованием модели М. О. Ашрафьяна.

Результаты расчетов представлены на рис. 2.

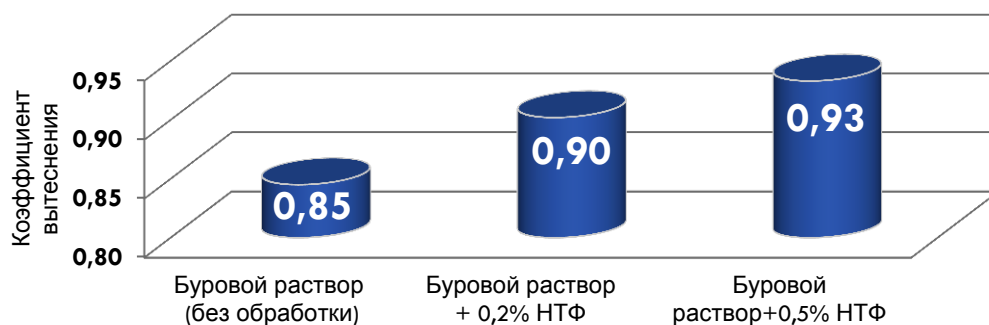


Рис. 2. Коэффициент вытеснения бурового раствора

Коэффициент вытеснения бурового раствора без обработки составляет 0,85, при обработке бурового раствора реагентом НТФ коэффициент вытеснения возрастет.

Как правило, после спуска кондуктора проводится промывка ствола скважины, и перед началом закачки буферных и тампонажных растворов проходит от 30 до 90 мин.

За время подготовительных работ буровой раствор в скважине начинает набирать структуру и превращаться в нетекучий гель с высоким значением СНС, вследствие чего в процессе цементирования затрудняется вытеснение бурового раствора из скважины.

На рис. 3 показана динамика набора СНС бурового раствора по времени.

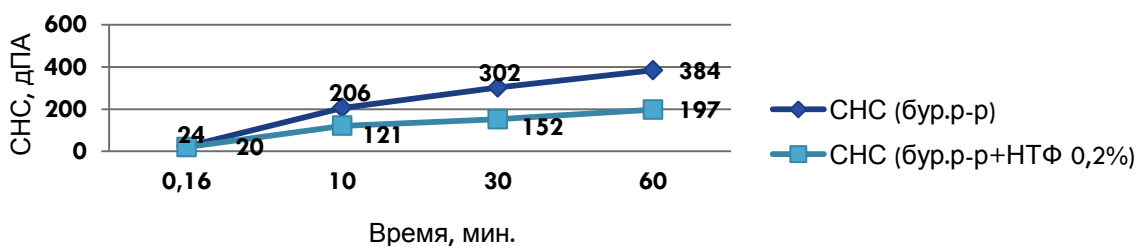


Рис. 3. Зависимость СНС бурового раствора от времени

Статическое напряжение сдвига бурового раствора со временем возрастает. Эти значения говорят о том, что чем дольше буровой раствор находится в состоянии покоя в скважине, тем сложнее будет разрушить его структуру и полностью его вытеснить.

Таким образом, на втором этапе для решения проблемы разработана технология промывки ствола скважины с использованием цементировочного агрегата из обвязки тампонажной техники. Схема обвязки представлена на рис. 4.

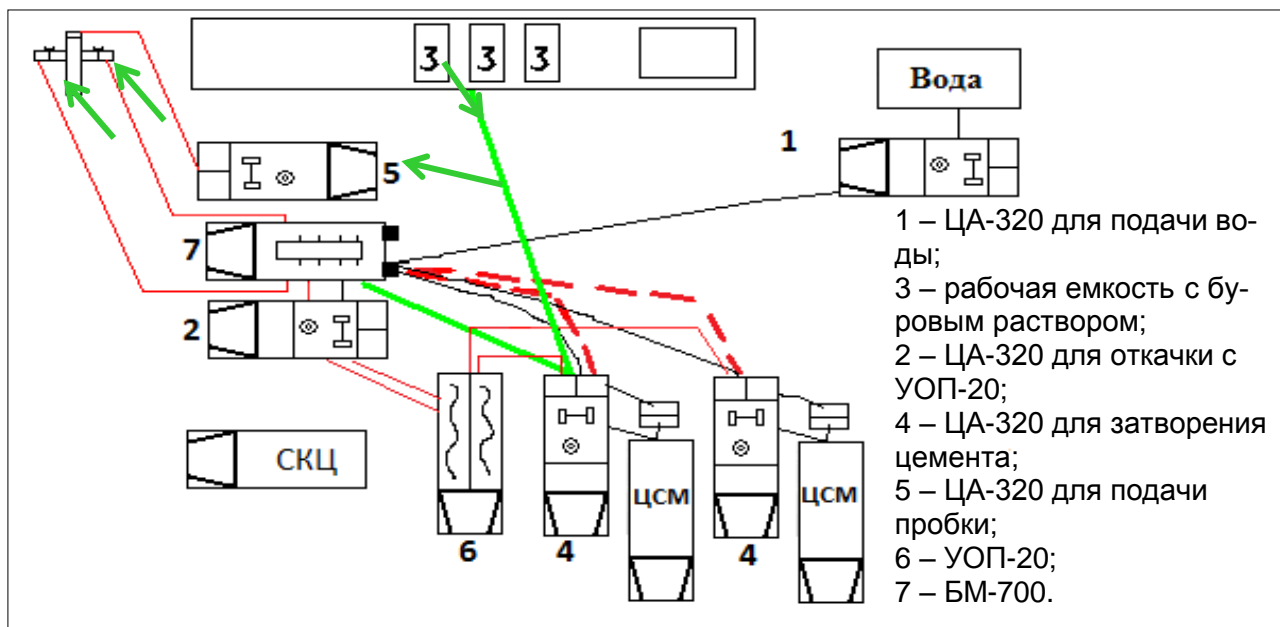


Рис. 4. Схема обвязки тампонажной техники

Во время промывки готовятся облегченный раствор и буферная жидкость.

По завершению промывки в кратчайшие сроки начинается закачка буферной жидкости и тампонажных растворов.

На третьем этапе исследований разработана рецептура буферной жидкости «БУРС-ГКМ», обладающей широким диапазоном плотности, реологии, низкой фильтрацией и кольматирующими свойствами. Параметры «БУРС-ГКМ» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры буферной жидкости «БУРС-ГКМ»

Состав	Плотность, г/см ³	ПВ, мПа*с	ДНС, Па	Моющая способность, %	Ф, мл/30 мин	Примечание
«БУРС-ГКМ»	1,261	14	171	10	20	Седиментационно-устойчивый
	1,312	18,1	136	14	10	Седиментационно-устойчивый

Буферная жидкость «БУРС-ГКМ» совместима как с буровыми, так и с тампонажными растворами.

На четвертом этапе исследований для улучшения качества крепления кондукторов предлагается разработанная «СургутНИПИнефть» рецептура материала тампонажного облегченного МТО-5-50, обладающего высокими адгезионными и прочностными свойствами по сравнению с применяемым цементом ПЦТ III-Об-Р 5-50+4-100. Было протестировано множество различных добавок и реагентов, в итоге – наиболее эффективной оказалась рецептура, представленная в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства МТО 5-50 в сравнении с аналогом

Наименование	В/С	Д, мм	ρ, г/см ³	V, мл	Время загустевания, мин	Сроки схватывания, ч-мин		Предел прочности, Мпа		Адгезия с колонной, МПа
						начало	конец	изгиб	сжатие	
МТО 5-50	0,84	240	1502	0,9	>300	12–05	14–50	2,5	5,4	1,25
ПЦТ III-Об-Р 5-50+4-100	0,93	240	1500	0	>300	15–48	18–12	1,8	3,4	0,35

Разработанный цемент МТО-5-50 обладает повышенным пределом прочности на изгиб и сжатие, а также улучшенной адгезией цемента с колонной, в 3,5 раза выше по сравнению с аналогом ПЦТ III-Об-Р 5-50+4-100.

Выводы

1. Введение нитрилотримелфосфоновой кислоты в буровой раствор во время спуска кондуктора и предложенная технология обвязки тампонажной техники для промывки ствола скважины позволят увеличить полноту замещения бурового раствора и уменьшить время нахождения его в покое.

2. Разработана высоковязкая разделяющая буферная жидкость «БУРС-ГКМ» с широким диапазоном плотности, которая позволит обеспечить очистку ствола скважин от бурового раствора, «языков» твердой фазы и повысить сцепление цементного камня со стенками скважины.

3. Разработан материал тампонажный облегченный МТО-5-50 с повышенной адгезией и прочностью (в сравнении с применяемым облегченным цементом).

4. Предложенный комплекс мероприятий рекомендуется для улучшения качества крепления кондукторов в ОАО «Сургутнефтегаз».

Литература

1. Ашрафьян М. О. О вытеснении глинистого раствора цементным и повышении качества цементирования скважин // Бурение и нефть. 2014. № 2.
2. Шуть К. Ф. Технические условия и методы испытания тампонажных цементов. М. : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. 152 с.

УДК 553.982.2(571.122):551.8:552.578.2.08

Тимошенко П. А., Молотков А. С.
Timoshenko P. A., Molotkov A. S.

**ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТА АС5 С ПРОГНОЗОМ
УЛУЧШЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ И ИХ НЕФТЕНОСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ФРОЛОВСКОЙ МЕГАВПАДИНЫ**

**PALEOGRAPHIC FORMATION OF PAYZONE AS5 WITH ENHANCED COLLECTORS
PREDICTION AND THEIR OIL-BEARING CAPACITY
IN CENTRAL PART OF FROLOVSKAYA MEGACAVE**

В представленной статье предложен комплекс методических решений по прогнозированию неантиклинальных объектов на примере пласта АС5 центральной части Фроловской мегавпадины. В основе работы заложен принцип стадийности исследований. Использован набор различных методов и приемов по прогнозированию ловушек УВ: палеогеоморфологический анализ, методика В. С. Муромцева по установлению фациальных обстановок при использовании электрометрических моделей, определение фациальных обстановок на основе генетических признаков встреченных в керновом материале и динамический анализ сейсмической записи.

Ключевые слова: коллектор, прогноз, Фроловская, нефтегазоносность, фации.

В настоящее время из-за исчерпания фонда структур прирост запасов углеводородного сырья и открытие новых залежей в Западной Сибири связываются в основном со сложными ловушками комбинированного типа. Большинство существующих центров нефтедобычи фактически вступило в фазу исследования недр, которую можно охарактеризовать как неантиклинальный этап, базирующийся на переосмыслении всей геолого-геофизической информации [2].

Методика работ

Предлагаемая методика работ по выявлению неантиклинальных объектов основывается на стадийном исследовании и разделена на два этапа. На региональном уровне рассмотрены перспективы наличия промышленных залежей в пласте АС5 фроловской свиты на территории центральной части Фроловской мегавпадины. На локальном уровне детализировано строение выявленных перспективных объектов регионального этапа.

1. Региональный этап

Критерии прогноза улучшенных коллекторов.

В данной работе при поиске критериев прогноза коллекторов с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами в рассматриваемом горизонте опробованы известные подходы палеогеоморфологического картирования.

Палеогеоморфологический анализ. Актуальность, решаемые задачи, современное применение.

Роль древних рельефов в формировании различных типов залежей нефти и газа и других видов полезных ископаемых, связанных с осадочными породами, известна давно. В последнее время становится очевидным исключительное значение палеоморфологии для картирования различных типов осадочных тел с целью выяснения условий их образования. Палеогеоморфологическое картирование нефтегазоносных областей представляет собой актуальную задачу в связи с возросшей необходимостью выявления зон развития неантиклинальных ловушек и их локального прогнозирования. Данный вид анализа имеет особо важ-

ное значение для старых нефтегазоносных районов, где накоплено большое количество геолого-геофизической информации, а фонд локальных структур практически исчерпан [3].

В основе палеоструктурных построений лежит предпосылка о соответствии уровню моря выбранной границы выравнивания на момент ее формирования. Построенная карта толщин между отражающими горизонтами (толщины между отражающими горизонтами М (подшва кошайской пачки) и АС5) послужила основой палеорекострукции кровли исследуемого горизонта на рассматриваемой территории. Отмечается закономерное развитие улучшенных коллекторов в пласте на склоновых частях построенной палеоповерхности, которая приурочена к зоне интервала толщин 284–292 м. В большинстве скважин (90 % случаев), пробуренных в пределах наблюдаемой области, получены промышленные притоки нефти из пласта АС5. Данная область имеет субмеридиональное простирание и прослеживается в южном направлении. В отдельных скважинах, пробуренных в выявленной зоне встречены водонасыщенные коллектора, в связи с чем следует поиск критериев прогноза нефтенасыщения исследуемого горизонта.

Критерии прогноза нефтегазоносности отложений.

После изучения обширного фактического геолого-геофизического материала на исследуемой площади отмечена наиболее яркая закономерность наличия нефтеносности и ее признаков в рассматриваемом горизонте над и в непосредственной близости с областями отрицательных гравиметрических аномалий, которые, как отмечено керновым материалом отдельных пробуренных скважин, охарактеризованы интрузивными вулканическими образованиями различного состава. Автором данной работы предполагаются наиболее вероятные причины вышеописанных наблюдений.

1. Первая связана с органогенно-осадочной теорией происхождения нефти. В связи с аномально высокими температурой и давлением, отмеченными в пробуренных скважинах над выявленными интрузиями по всему разрезу, можно предположить дополнительное влияние этих факторов на нефтематеринские толщи, которые, в свою очередь, генерируют большее количество углеводородов.

2. Вторая связана с абиогенной природой образования углеводородов. Предполагается привнос совместно с отмеченными вулканогенными образованиями большого количества водородосодержащих газов, который по мере продвижения через вмещающую толщу пород образует соединения с углеродом, тем самым формируя соединения от простейших углеводородов – CH_4 (метана) до более сложных.

В качестве дополнительного фактора, оказывающего влияние на этаж нефтеносности, может выступать наличие крупных тектонических нарушений над рассматриваемыми интрузивными образованиями. Отмеченные закономерности легли в основу прогнозных участков с наиболее вероятной промышленной нефтегазоносностью отложений ранее выявленных улучшенных коллекторов изучаемого горизонта.

Рекомендации по направлению работ.

Выработанные региональные критерии прогноза позволили оценить перспективы малоизученных площадей (в том числе участков, выставляемых на аукционы и конкурсы) на предмет наличия промышленных скоплений углеводородного сырья в изучаемом горизонте и оценить риски при проведении геологоразведочных работ. На основе полученного прогноза следует корректировка направлений работ на участках недр, находящихся в пользовании компании, в связи чем требуется проведение анализа при использовании ранее отмеченных критериев на детальном уровне.

2. Локальный этап

Для проведения детальных работ выбраны наиболее перспективные участки, в пределах которых планируется проведение геологоразведочных работ. На территории Западно-Нялинского лицензионного участка в скважине 1П из пласта АС5 получен промышленный приток нефти, ранее значительных перспектив с которым не связывалось. Данный участок вызывает особый интерес для дальнейших работ по разведке выявленной залежи.

Палеогеография пласта АС5, прогноз улучшенных коллекторов. Палеогеоморфологический анализ (детализация региональных построений)

Для определения условий формирования рассматриваемых отложений и уточнения ранее выявленных на региональном этапе границ развития улучшенных коллекторов построена карта толщин между отражающими горизонтами М и АС5. Площадь работ включает участки, отработанные двумя сейсморазведочными партиями на территории Северо-Селияровского, Сынъеганского и Западно-Нялинского лицензионных участков. В результате построений удалось скорректировать ранее выявленную зону с предполагаемыми коллекторами улучшенного типа.

Электрометрические модели фаций

В связи с отсутствием фотографий кернового материала в рассматриваемом пласте в большей части пробуренных скважин для установления фациальной природы изучаемых отложений в первую очередь выполнен анализ электрометрических кривых метода потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) в интервале пласта АС5 по методике, предложенной В. С. Муромцевым [1]. Анализ показал, что практически все скважины, пробуренные на территории Северо-Селияровского месторождения, давшие промышленные притоки нефти, расположены на территории вдольбереговых регрессивных баров. Песчаники рассматриваемых отложений имеют более высокие параметры пористости (более 22 %) и проницаемости (свыше 10 мД). В отдельных скважинах, пробуренных в зоне баров встречены отложения, электрометрические модели которых соответствуют промоинам разрывных течений. Восточнее данной области встречены мелководно-морские отложения внутренней части шельфа, имеющие пористость, не превышающую 15 % и проницаемость до 1–2 мД. Западнее зоны отложений вдольбереговых баров встречены глинистые отложения открытого моря.

Исследования керна

Для уточнения фациальных обстановок проанализирован имеющийся керновый материал пробуренных скважин. По комплексу генетических признаков можно с уверенностью говорить о приуроченности отложений пласта АС5 к прибрежно-морским вдольбереговым регрессивным барам. Восточную область можно охарактеризовать как песчаный материал внутренней части волнового шельфа. Западную – илы дальней зоны волнового шельфа.

Динамический анализ

С целью поиска дополнительных критериев прогноза улучшенных коллекторов на площади работ проведен динамический анализ. Использованы порядка 20 сейсмических атрибутов в различных окнах. Поиск коррелятивных связей осуществлялся с параметром эффективных толщин пласта АС5. Наилучшая связь отмечена при рассмотрении средних магнитуд в окне +5 –10 м сек, коэффициент корреляции которого составил порядка 67 %. По результатам анализа выделены границы предполагаемого развития улучшенных коллекторов в пласте АС5. Выявленные области закономерно вписываются в прогнозную зону, полученную по результатам палеогеоморфологического картирования.

Рекомендации по направлению работ

По результатам работ локального этапа подготовлена палеогеогеографическая схема формирования пласта АС5 с прогнозом промышленно продуктивных коллекторов, которая позволила запланировать бурение 2-х разведочных скважин.

Выводы

1. Результаты работ подчеркивают исключительную значимость стадийности исследований в геологоразведочном процессе.
2. Требуется регулярный мониторинг и при необходимости пересмотр направлений работ на каждом из этапов геологоразведочных работ.
3. Установленные обстановки формирования пласта АС5 при использовании всей имеющейся информации и существующих методик позволили сформировать концептуальную модель накопления данного горизонта, которая является ключом к пониманию возможной геометрии резервуаров, находящихся в нем, и, соответственно, позволяет более эффективно работать с данным объектом.

Литература

1. Муромцев В. С. Диагностика континентальных и прибрежно-морских терригенных осадков по электрическим моделям фаций // Методы прогнозирования и закономерности размещения литологических и стратиграфических ловушек нефти и газа. Тр. ВНИГРИ. Л. : ВНИГРИ, 1983. 219 с.
2. Проничева М. В, Савинова Г. Н. Содержание и методика составления палеогеоморфологических карт для нефтегазоносных областей // Тр. ЗапСибНИГНИ. Тюмень : ЗапСибНИГНИ, 1984. Вып. 189. С. 6–12.
3. Соколовский А. П., Соколовский Р. А. Фроловская фациальная зона неокома Западной Сибири в свете оценки перспектив нефтегазоносности // Вестн. недропользования ХМАО. 2005. № 15. С. 64–69.

УДК 532.5:519.87

Урманцева Н. Р., Галкин В. А.
Urmantseva N. R., Galkin V. A.

УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЕМ ЖИДКОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ГИДРОСИСТЕМЕ

FLUID BEHAVIOUR MANAGEMENT IN DISTRIBUTED OSCILLATING HYDRODYNAMIC SYSTEM

Работа посвящена задачам управления динамикой несжимаемой жидкости за счет воздействия различных силовых полей. Явление поляризации диэлектрика позволяет реализовать процесс управления электрическими полями, воздействующими на жидкость, и добиться параметрического резонанса при колебаниях уровня поверхности жидкости. Также в качестве управляющих воздействий на распределенную гидросистему рассматривается изменение во времени геометрии течения. Для нефтегазовой отрасли рассматриваемый класс задач связан с моделированием отклика месторождения на динамические воздействия различных типов, которое позволяет провести оптимизацию воздействий с целью повышения коэффициента извлечения нефти.

Ключевые слова: гидродинамическая система, объемные силы, поляризация диэлектрика, колебательные процессы.

Настоящая работа входит в цикл исследований по созданию моделей и алгоритмов управляемого поведения жидкости с постоянной плотностью ρ , находящейся под действием внешних объемных сил, распределенных с плотностью

$$\bar{F} = -\rho \nabla G \quad , \quad (1)$$

где G – потенциал сил (рис. 1).

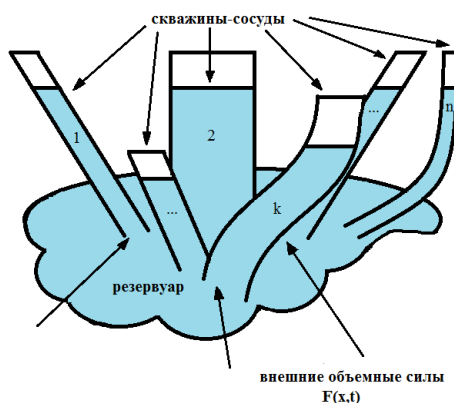


Рис. 1. Распределенная колебательная система, состоящая из n скважин и общего резервуара

К крупным распределенным колебательным системам можно отнести гидрологическую систему Земли, где общим резервуаром являются подземные воды, а выводами скважин на поверхность – водоемы различных типов. Как следствие, изменение уровня воды одного водоема будет зависеть не только от климатических, геологических, антропогенных факторов, но и от изменения уровня воды других элементов системы.

Управление поведением жидкости в областях со сложной переменной геометрией приобретает прикладное значение в медицинских исследованиях, связанных с неврологией, кардиологией и т. п. Система кровообращения состоит из множества сообщающихся сосудов, и исследование колебательного движения крови по сосудам необходимо для адекватного моделирования протекающих там гидродинамических процессов.

Модели управления динамикой несжимаемой жидкости и соответствующие обратные задачи приведены в [1; 2]. Существенным фактором, позволяющим реализовать заданный характер течения несжимаемой жидкости, являются внешние объемные силы: гравитационные, электрические, вязкого трения, входящие в уравнения динамики (1). Отметим, что силы кулоновского типа, являющиеся градиентом гравитационного или электрического потенциала, могут быть включены в перенормировку давления жидкости. Таким образом, кулоновские силы позволяют рассматривать давление как управляющий распределенный параметр.

Известно, что если к поверхности воды поднести заряженное тело, создающее неоднородное электрическое поле, то поверхность жидкости, находящаяся в гравитационном равновесии, претерпит искривление, вызванное локальным изменением поля давления (рис. 2).



Рис. 2. Влияние электростатических полей на мениск жидкости

В частности, это явление позволяет реализовать процесс управления электрическими полями, воздействующими на жидкость, и добиться параметрического резонанса при колебаниях уровня поверхности жидкости. Управление колебаниями за счет воздействия электростимуляции для изменения характера кровотока, давления в сосудах является перспективным направлением исследований.

Следуя [1], отметим, что для решения задачи управления колебаниями жидкости в сосудах рассматривается течение несжимаемой жидкости в пространственной области $\{x\} \in D(t) \subset R_n$ с границей $\partial D(t)$, где t – время. Условие несжимаемости предполагает неизменность объема $D(t)$. Предполагается, что в указанной области жидкость имеет постоянную плотность $\rho > 0$, а ее динамика задается полем скоростей $V = (V_1, V_2, V_3)$ и давлением $p(x, t)$, которые подчиняются уравнениям Навье–Стокса:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + \sum_1^3 V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \rho^{-1} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \nu \Delta V_i + \rho^{-1} F_i, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} V = 0, \quad t > 0, \quad x \in D(t),$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, $F(x, t) = \{F_i\}_1^3$ – плотность объемных сил.

В общем случае, учитывая закон сохранения энергии, уравнения движения (2) следует рассматривать в совокупности с динамикой температуры жидкости $T(x, t)$, от которой зависит кинематическая вязкость. Движение жидкости на границе $\partial D(t)$ подчиняется условию

$$J(V, p, T)|_{\partial D(t)} = 0, \quad (3)$$

конкретный вид которого определяется характером взаимодействия жидкости с окружающей средой на границе области течения. Соотношения (2), (3) обычно дополняются заданием начальных данных

$$J_0(V, p, T)|_{\partial D(0)} = 0, \quad x \in D(0), \quad t = 0. \quad (4)$$

В более общем случае соотношения (3), (4) могут быть заменены на задание условия связи $\varphi(V, p, T)|_S = 0$ на некотором многообразии S размерности n в гидросистеме $C = \bigcup_t D_t$.

Определим неким образом целевой функционал $J(V, p, T, C) \geq 0$. Задача управления состоит в определении вида управляющих воздействий (управления) $\varphi(V, p, T)|_S = 0$, минимизирующего функционал J на некотором заданном пространстве управлений. Выбор данного пространства определяется классом прикладных задач, для которых задается вид J [1].

В рамках поставленных задач естественными управляющими воздействиями на распределенную гидросистему являются:

- 1) внешние объемные силы $F(x, t)$, действующие на систему;
- 2) переменная во времени геометрия области $D(t)$.

Задачу с внешними силами (2) можно сформулировать без внешних сил, переопределив величину давления

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + \sum_1^3 V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{p}}{\rho \partial x_i} = \nu \Delta V_i, \quad (5)$$

где $\tilde{p} = p + \rho G$. Данное формальное переопределение позволяет стандартизировать управленческую модель (2).

Оптимизационная постановка задачи управления за счет изменения геометрии области $D(t)$ состоит в выборе такого поля деформаций W , для которого в заданной подобласти, расположенной в гидросистеме C , поле скоростей жидкости V и ее давление p в некоторой метрике J наименее уклоняется от целевых значений (т. е. в фиксированной скважине задается желаемый дебит – график скорости течения и давления во времени и пространстве, который оптимизируется на основании аппаратных ограничений, задающих пространство оптимизации) [1].

Воздействие внешних объемных сил также приводит к изменению внутренней геометрии области, которая, в свою очередь, влияет на поле скоростей V и давление p . Примером может служить обильное выделение пузырьков газов в объеме $D(t)$, которые появляются при декомпрессии растворенных газов (рис. 3). Подчеркнем, что перенормировка давления p за счет поля внешних потенциальных сил G влечет появление пузырьков газа, динамически изменяющих область течения жидкости $D(t)$.

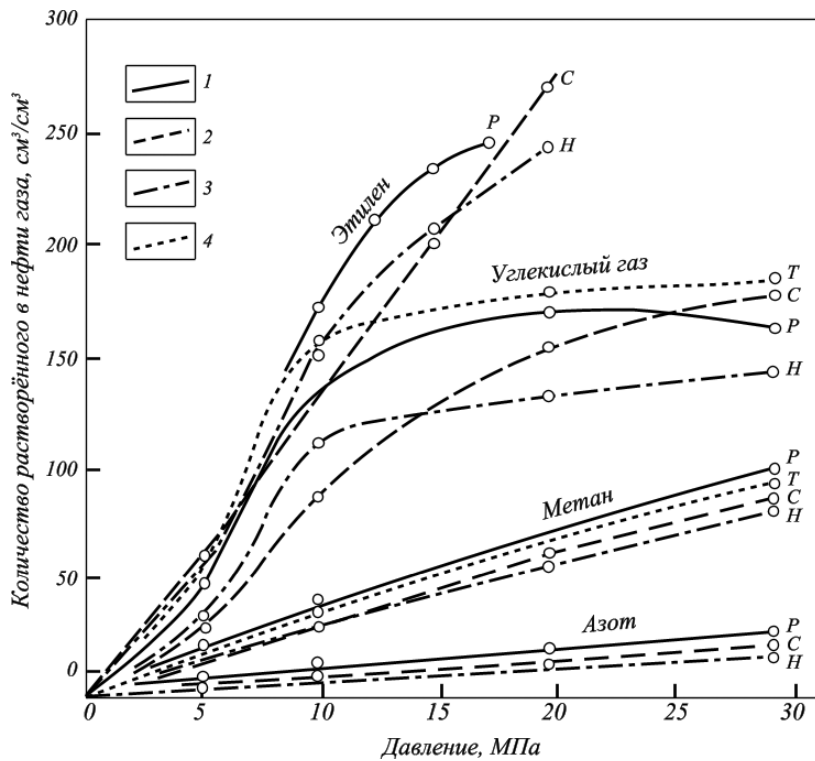


Рис. 3. Изотермы растворимости газов в нефти при температуре 50 °С [3]

Рассмотрим частный случай задачи. Находящийся в двухскважинной гидросистеме столб жидкости приходит в колебательное движение:

- 1) после некоторого начального возмущения под действием силы тяжести F_g ;
- 2) под действием внешнего электростатического поля с потенциалом φ .

Площадь поперечного сечения скважин и резервуара постоянна и равна S , L –общая длина столба жидкости, ρ – плотность жидкости, x – величина максимального отклонения от положения равновесия (см. рисунок 4).

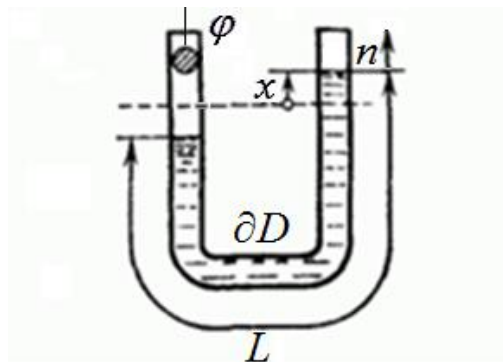


Рис. 4. Колебания жидкости в гидросистеме

Движение жидкости на границе $\partial D(t)$ подчиняется условию:

$$(V, n)|_{\partial D(t)} = V_n, \quad (6)$$

где n – внешняя нормаль к границе течения.

В эксперименте для управления динамикой гидродинамической U-образной системы использовался заряженный металлический шарик (рис. 5), являющийся источником электрического поля с потенциалом $\varphi = 24\text{кВ}$. При поднесении шарика к поверхности воды в одной из скважин происходило искривление мениска за счет поляризации диэлектрика [4]. В ходе эксперимента была установлена следующая закономерность: когда число воздействий на неподвижный столб жидкости в единицу времени стремится к собственной частоте колебательной системы

$$T = \pi \sqrt{\frac{2L}{g}}, \quad (7)$$

гидросистема выходит из положения равновесия и начинает совершать колебания.

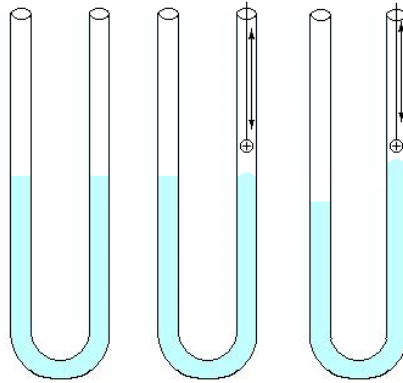


Рис. 5. Динамика изменения уровня жидкости в скважинах под действием электрического поля

При моделировании колебательных процессов в гидросистемах были получены следующие результаты:

1. Построена экспериментальная установка для моделирования поведения жидкости в гидросистеме из двух скважин под действием силы тяжести и проведен эксперимент по установлению периода колебаний [5]. Изучено поведение жидкости под действием электростатического поля.

2. Определен характер воздействий на гидросистему электростатическим полем G для управления поведением жидкости.

3. Разработано программное обеспечение для моделирования затухающих колебаний жидкости, возникающих в гидродинамической системе, состоящей из $n = 2$ скважин, под действием объемных сил [5].

Перспективным представляется использование результатов данного исследования при моделировании гидродинамических процессов крови головного мозга. А управление колебаниями за счет воздействия электростатического поля для изменения характера кровотока, давления в сосудах является альтернативой медикаментозному и хирургическому лечению заболеваний системы кровоснабжения.

Данное исследование имеет прикладное значение и для других отраслей, например, для нефтегазовой отрасли, где задачи управления течением жидкости связаны с моделированием отклика месторождения на динамические воздействия различных типов (механические,

тепловые, электрические), которое позволяет провести оптимизацию воздействий с целью повышения коэффициента извлечения нефти [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 14-01-00478 «Разработка и исследование математических моделей и алгоритмов решения задач гидродинамики осцилляций в сосудах живых организмов и выявление связи с электромеханическими характеристиками, регистрируемыми на поверхности кожи».

Литература

1. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Задачи управления параметрами несжимаемой жидкости при изменении во времени геометрии течения // Доклады академии наук. 2015. Т. 463. С. 149–151.
2. Галкин В. А., Урманцева Н. Р. Математическое моделирование гидродинамических процессов крови головного мозга // Электрон. изд-е. Вестник кибернетики. 2014. № 4 (16). С. 35–42.
3. Росляк А. Т. Физика пласта : курс лекций. Томск, 2008. 131 с.
4. Стишков Ю. К., Остапенко А. А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л. : Изд-во Ленинград. ун-та, 1989. 174 с.
5. Урманцева Н. Р. Моделирование колебательных процессов жидкости в сообщающихся сосудах // Тенденции и перспективы развития современного научного знания: материалы XVI международной научно-практической конференции. М.: Ин-т стратегич. исследований. С. 7–13.

УДК 553.982(571.16):552.578.2.08:53/.54

Ященко И. Г.
Yashchenko I. G.

ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫЕ НЕФТИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ И ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

TOMSK REGION SCAVENGER OILS AND ITS PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

Проведен сравнительный анализ физико-химических свойств тяжелых, вязких, парафинистых и высокосмолистых нефтей Томской области. Большинство тяжелых, вязких, парафинистых и высокосмолистых нефтей залегают в средне- и верхнеюрских пластах глубиной 2 500–3 000 м, парафинистые нефти отличаются тем, что не выявлены на малых и средних глубинах до 1 500 м, но есть в залежах до 4 000 м. Установлено, что парафинистые нефти отличаются более качественными характеристиками – плотность и вязкость самые низкие, наименьшее содержание серы, смол и асфальтенов, кокса, водорода и кислорода, содержание дизельных фракций высокое, температура застывания отрицательная.

Ключевые слова: Томская область, тяжелые, вязкие, парафинистые и высокосмолистые нефти; ресурсы, география распределения, физико-химические свойства нефтей.

Западная Сибирь остается главным нефтедобывающим регионом России, но в развитии ее нефтегазового комплекса накапливаются негативные тенденции. Так, если в 1990 г. доля Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна в общероссийском производстве нефти

составляла 72,8 %, то к 2000 г. она сократилась до 68 %, а к 2010 г. – до 63 % [1]. В частности, на долю Ханты-Мансийского автономного округа, нефтедобыча которого неизменно составляла ранее около 60–70 % объема общероссийской добычи, в 2014 г. пришлось всего 47,6 % добычи страны объемом 526,1 млн т нефти, сокращение темпов падения добычи за 2014 г. составило 1,9 % [2, 4].

Томская область – ресурсный регион и относится к ведущим регионам России по добыче нефти и газа, в котором углеводородное сырье является основным полезным ископаемым (природный капитал области на 98 % состоит из нефтяных ресурсов). Тенденции развития нефтегазового комплекса более стабильны – по сравнению с 2015 г. объемы добычи нефти в 2014 г. снизились меньше 1 %, в 2016 г. планируется добыть 11, 25 млн т и достичь уровень добычи 2013 г. [5]. В области открыто 131 месторождение, в том числе 102 нефтяных, 21 нефтегазоконденсатных и 8 газоконденсатных [3].

Сегодня Томская область сталкивается с теми же проблемами, которые характерны для всех нефтедобывающих регионов мира – запасы становятся все более труднодоступными. Одно из направлений увеличения и стабилизации объемов добычи нефти – это добыча нефти за счет эксплуатации трудноизвлекаемых запасов, в том числе с аномальными физико-химическими свойствами (тяжелые (ТН), вязкие (ВН), парафинистые (ПН) и высокосмолистые (ВСН) нефти).

Основу проведения исследований закономерностей пространственного размещения и физико-химических свойств трудноизвлекаемых нефтей составила созданная в ИХН СО РАН глобальная база данных (БД) по физико-химическим свойствам нефти, включающая в настоящее время описания 31 670 образцов [6]. Для территории Томской области, разделенной на пять нефтегазоносных областей (НГО), в БД описано 1 754 образца нефти. Месторождения с исследуемыми нефтями сосредоточены в основном в Васюганской и Каймысовской областях, на территории которых расположено 30 месторождений с ТН, 22 месторождения – с ВН и 13 месторождений – с ВСН, а большинство составляют месторождения с ПН (78 месторождений) (табл. 1).

Таблица 1

**Частота встречаемости томских месторождений с трудноизвлекаемыми нефтями
в нефтегазоносных областях Западно-Сибирского НГБ**

Нефтегазоносная область	Тяжелые нефти	Вязкие нефти	Парафинистые нефти	Высокосмолистые нефти
Васюганская	11	9	35	4
Каймысовская	19	13	31	9
Пайдугинская	–	–	7	–
Среднеобская	2	–	5	–
ВСЕГО	32	22	78	13

Запасы тяжелых нефтей в основном сосредоточены в крупных месторождениях – Фестивальное, Мыльджинское, Никольское и Урманское, вязких нефтей – Фестивальное, Майское, Мыльджинское, Верхнесалатское, Никольское и Урманское, ПН – Советское, Фестивальное, Западно-Лугинецкое, Майское, Рыбальное, Столбовое, Нововасюганское, Мыльджинское, Казанское, Верхнесалатское, Федюшкинское и Урманское, ВСН – Первомайское, Крапивинское, Фестивальное и Майское.

Рассмотрим распределение трудноизвлекаемой нефти Томской области по возрасту нефтемещающих пород (табл. 2). Как видно из табл. 2, большинство тяжелых, вязких, парафинистых и высокосмолистых нефтей являются мезозойскими, в частности, средне- и верхнеюрскими. Отметим, что количество залежей вязких и высокосмолистых нефтей распределилось почти поровну на мезозойские и палеозойские.

Таблица 2

**Частота встречаемости залежей с трудноизвлекаемыми нефтями
по разрезу Томской области**

Возраст, обозначение	Кол-во залежей	Месторождения
Тяжелые нефти		
Нижнемеловая, К ₁	3	Оленье, Северное
Юрская	2	Восточно-Моисеевское, Озерное
Верхнеюрская, J ₃	11	Восточно-Моисеевское, Горстовое, Катылгинское, Крапивинское, Ледовое, Ломовое, Лонтыняхское, Моисеевское, Нижне-Табаганское
Среднеюрская, J ₂	9	Восточно-Герасимовское, Герасимовское, Мыльджинское, Таежное
Нижнеюрская, J ₁	3	Крапивинское, Моисеевское, Нижнепервомайское
Палеозой	15	Арчинское, Герасимовское, Северо-Калиновое, Урманское
Среднекаменноугольная, С ₂	2	Герасимовское, Неждановское
Вязкие нефти		
Нижнемеловая, К ₁	1	Оленье
Верхнеюрская, J ₃	4	Верхнесалатское, Восточно-Моисеевское, Нижне-Табаганское, Южно-Мыльджинское
Среднеюрская, J ₂	9	Восточно-Герасимовское, Герасимовское, Мыльджинское
Нижнеюрская, J ₁	3	Верхнесалатское, Герасимовское, Майское
Палеозой	13	Герасимовское, Северо-Калиновое, Урманское
Среднекаменноугольная, С ₂	2	Герасимовское, Неждановское
Парафинистые нефти		
Нижнемеловая, К ₁	5	Амбарское, Вартовско-Соснинское, Мыльджинское, Советское, Южно-Мыльджинское
Верхнеюрская, J ₃	69	Амбарское, Верхнесалатское, Горстовое, Дуклинское, Западно-Лугинецкое, Катылгинское, Квартовое, Колотушное, Крапивинское, Ломовое, Лонтыняхское, Лукашин-Ярское, Налимье, Нижне-Табаганское, Оленье, Павловское, Пинжинское, Полуденное, Поньжовое, Пуглалымское, Речное, Рыбальное, Северо-Карасевское, Советское, Средневасюганское, Средненирольское, Столбовое, Тагайское, Тамратское, Усть-Сильгинское, Федюшкинское, Чебачье, Южно-Мыльджинское
Среднеюрская, J ₂	24	Вартовское, Верхнесалатское, Восточно-Герасимовское, Западно-Останинское, Квартовое, Кулгинское, Медведевское, Мыльджинское, Нововасюганское, Черемшанское, Широтное
Нижнеюрская, J ₁	11	Верхнесалатское, Герасимовское, Казанское, Колпашевское, Майское, Медвежье, Сенькинское, Столбовое, Тамратское
Палеозой	45	Арчинское, Верхнекомбарское, Герасимовское, Глуховское, Колпашевское, Крыловское, Куль-Еганское, Назинское, Нижне-Табаганское, Останинское, Приколтогорское, Северо-Калиновое, Северо-Останинское, Советское, Солоновское, Тамбаевское, Урманское, Фестивальное, Чкаловское, Южно-Табаганское, Южно-Урманское
Нижнепермская, P ₁	1	Воскресенское
Среднекаменноугольная, С ₂	1	Герасимовское
Нижнекаменноугольная, С ₁	1	Герасимовское

Окончание табл. 2

Возраст, обозначение	Кол-во залежей	Месторождения
Высокосмолистые нефти		
Верхнеюрская, J ₃	1	Нижне-Табаганское
Среднеюрская, J ₂	3	Восточно-Герасимовское, Герасимовское
Нижнеюрская, J ₁	3	Верхнесалатское, Герасимовское, Майское
Палеозой	7	Герасимовское, Северо-Калиновое, Урманское
Среднекаменноугольная, C ₂	1	Герасимовское

В табл. 3 представлено распределение трудноизвлекаемой нефти Томской области по глубине залегания. Как видно из табл. 4, большинство тяжелых, вязких, парафинистых и высокосмолистых нефтей залегают в пластах глубиной 2 500 – 3 000 м. Так, 66 % образцов ТН, 69,7 % вязких нефтей, 53 % ПН и 50 % ВСН приурочено к данной глубине. Отметим, что ПН отсутствуют на малых глубинах до 1 500 м, а в Глуховском и Медвежьем месторождениях парафинистые нефти находятся в самых глубокозалегающих пластах – до 4 000 м.

Таблица 3

**Частота встречаемости залежей с трудноизвлекаемыми нефтями
по глубине залегания в Томской области**

Глубина залегания, м	Кол-во залежей	Месторождения
Тяжелые нефти		
1 000–1 500	3	Неждановское, Никольское, Северное
1 500–2 000	2	Олень, Северное
2 000–2 500	5	Горстовое, Катылгинское, Лонтыняхское, Мыльдзинское, Таежное
2 500–3 000	35	Восточно-Герасимовское, Восточно-Моисеевское, Герасимовское, Глуховское, Крапивинское, Ледовое, Ломовое, Моисеевское, Нижнепервомайское, Нижне-Табаганское, Нюльгинское, Озерное, Поньжевое, Фестивальное
3 000–3 500	8	Арчинское, Калиновое, Северо-Калиновое, Солоновское, Урманское
Вязкие нефти		
1 000–1 500	2	Неждановское, Никольское
1 500–2 000	1	Олень
2 000–2 500	2	Верхнесалатское, Мыльдзинское
2 500–3 000	23	Верхнесалатское, Восточно-Герасимовское, Восточно-Моисеевское, Герасимовское, Нижне-Табаганское, Нюльгинское
3 000–3 500	5	Майское, Северо-Калиновое, Урманское, Фестивальное
Парафинистые нефти		
1 500–2 000	1	Вартовско-Соснинское
2 000–2 500	41	Амбарское, Верхнесалатское, Горстовое, Западно-Лугинецкое, Катылгинское, Лонтыняхское, Лукашин-Ярское, Мыльдзинское, Назинское, Пуглалымское, Рыбальное, Сенькинское, Советское, Среднеवासюганское, Средненюрольское, Усть-Сильгинское, Фестивальное, Чебачье, Южно-Мыльдзинское
2 500–3 000	85	Вартовское, Верхнекомбарское, Восточно-Герасимовское, Герасимовское, Дуклинское, Западно-Останинское, Казанское, Квартовое, Колотушное, Колпашевское, Крапивинское, Крыловское, Кулгинское, Ломовое, Медведевское, Моисеевское, Мыльдзинское, Налимье, Нижне-Табаганское, Нововасюганское, Олень, Павловское, Пиндзинское, Поньжевое, Северо-Карасевское, Северо-Останинское, Советское, Столбовое, Тагайское, Тамратское, Федюшкинское, Чкаловское, Широтное

Окончание табл. 3

Глубина залегания, м	Кол-во залежей	Месторождения
3 000–3 500	31	Арчинское, Куль-Еганское, Майское, Поньжевое, Приколтогорское, Северо-Калиновое, Северо-Черталинское, Солоновское, Тамратское, Тамбаевское, Урманское, Фестивальное, Черемшанское, Южно-Табаганское, Южно-Урманское
3 500–4 000	2	Глуховское, Медвежье
Высокосмолистые нефти		
1 000–1 500	1	Неждановское
1 500–2 000	1	Оленье
2 000–2 500	–	–
2 500–3 000	4	Герасимовское, Нижне-Табаганское, Ньюлгинское, Фестивальное

В табл. 4 приведена общая характеристика информации из БД о физико-химических свойствах трудноизвлекаемых нефтей на территории Томской области. Установлено, что тяжелые нефти отличаются по своим характеристикам в следующем: имеют самую высокую плотность, отрицательную температуру застывания, относятся по классификации [6] к классу высоковязкой, среднесернистой, парафинистой, смолистой, асфальтеновой, с низким содержанием фракции н. к. 200 °С, со средним содержанием фракции н. к. 300 °С. В ТН наибольшая концентрация асфальтенов (в 2 раза по сравнению с ПН), имеют самое низкое содержание фракции н.к. 350 °С.

Таблица 4

Физико-химические свойства трудноизвлекаемых нефтей на территории Томской области

Показатели	Тяжелые нефти		Вязкие нефти		Парафинистые нефти		Высокосмолистые нефти	
	Объем выборки	Среднее значение	Объем выборки	Среднее значение	Объем выборки	Среднее значение	Объем выборки	Среднее значение
Физические показатели								
Плотность, г/см ³	58	0,8948	38	0,8750	185	0,8400	8	0,8906
Вязкость, мм ² /с	25	205,98	41	273,04	124	46,39	6	177,49
Темп. застывания, °С	17	–2,54	17	6,25	121	–4,06	12	1,07
Содержание химических компонентов								
Сера, мас. %	39	0,91	33	0,83	146	0,52	6	1,40
Парафины, мас. %	36	6,42	36	7,21	215	12,23	17	10,59
Смоли, мас. %	39	9,10	38	7,94	201	5,90	21	20,57
Асфальтены, мас. %	34	3,46	36	2,34	179	1,58	21	2,90
Фракция н.к. 200 °С, мас. %	6	13,77	8	12,71	80	21,28	–	–
Фракция н.к. 300 °С, мас. %	6	30,85	7	29,07	76	40,40	–	–
Фракция н.к. 350 °С, мас. %	3	36,79	1	37,30	26	52,31	–	–
Газосодержание в нефти, м ³ /т	15	71,21	10	127,95	73	91,79	1	42,00
Термобарические условия залегания								
Температура пласта, °С	98,64		101,38		94,21		99,00	
Пластовое давление, МПа	29,49		28,47		27,64		28,70	

Вязкие нефти Томской области имеют среднюю плотность, наиболее вязкие, имеют положительную и самую высокую температуру застывания, относятся к классу среднесернистой, парафинистой, малосмолистой, малоасфальтеновой нефти, с низким содержанием фракции н.к. 200 °С, со средним содержанием фракции н.к. 300 °С, обладают наибольшими концентрациями нефтяного газа.

ПН отличаются по своим характеристикам от ТН, ВН и ВСН тем, что являются самыми легкими, вязкими, но с наименьшей вязкостью по сравнению с другими рассматриваемыми нефтями. Температура застывания отрицательная и самая низкая. Содержание дизельных фракций и парафинов самое высокое, ПН относятся к классу высокопарафинистой, среднесернистой, малосмолистой, малоасфальтеновой нефти. Из вышесказанного следует, что по своим качественным и реологическим характеристикам парафинистые нефти требуют меньшего объема затрат при добыче, транспортировке и переработке.

Отметим, что термобарические условия мало отличаются для разных групп нефти, температура пластов изменяется от 94 °С для парафинистой нефти до 101 °С для вязкой нефти, аналогично пластовое давление изменяется от 27,6 МПа для ПН до 29,5 МПа для тяжелой нефти.

Таким образом, установлено, что трудноизвлекаемые нефти Томской области сосредоточены в основном в Васюганской и Каймысовской НГО, в которых большинство составляют месторождения с тяжелыми и парафинистыми нефтями, меньше всего месторождений с высокосмолистой нефтью. Парафинистые нефти находятся в 41 % томских месторождений, около 17 % томских месторождений содержат ТН, 11,6 % – вязкие нефти и 6,8 % месторождений с ВСН. Большинство тяжелых, вязких, парафинистых и высокосмолистых нефтей залегают в средне- и верхнеюрских пластах глубиной 2 500 – 3 000 м, парафинистые нефти отличаются тем, что не выявлены на малых и средних глубинах до 1 500 м, но есть в залежах до 4 000 м. Установлено при анализе и сравнении физико-химических свойств томских ТН, ВН, ПН и ВСН, что парафинистые нефти отличаются наиболее лучшими характеристиками: плотность и вязкость самые низкие, наименьшее содержание серы, смол и асфальтенов, содержание дизельных фракций высокое, температура застывания отрицательная.

Литература

1. Андрианов В. Лечебный эффект «нефтяной иглы» // Нефть России. 2012. № 3. С. 6–9.
2. Баскаев К. Ставить ли крест на Западной Сибири // Нефть России. 2011. № 2. С. 40–43.
3. О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2014 году : докл. / глав. ред. С. Я. Трапезников ; редкол. Ю. В. Лунёва, Н. А. Чатурова, В. А. Коняшкин ; Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томск. обл., ОГБУ «Облкомприрода». Томск : Дельтаплан, 2015. 156 с.
4. Осипов М. Есть 10 миллиардов! // Нефть России. 2012. № 3. С. 20–23.
5. Чернозубенко С. Положительных тенденций не ожидается // Недра и ТЭК. 2016. № 2. С. 10–11.
6. Яценко И. Г., Полищук Ю. М. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения / под ред. А. А. Новикова. Томск: В-Спектр, 2014. 154 с.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 539.32:536.2:620.22

Горынин Г. Л., Власко А. Ф.
Gorynin G. L., Vlasko A. F.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОБЖИМНОГО КОЛЬЦА, ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ КОМПОЗИТНОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА

TEMPERATURE FIELD FERRULE CALCULATION OF COMPOSITE FIBROUS MATERIAL

Используется метод ячейковых функций [1], позволяющий построить температурное поле в обжимном кольце, произведенном из волокнистого композитного материала. Метод основан на асимптотическом расщеплении пространственной задачи теории теплопроводности без построения моделей и введения дополнительных гипотез. Ячейковые функции являются решением семейства краевых задач, поставленных на единичной ячейке с периодическими граничными условиями. Единичная периодическая ячейка представляет собой один период функции свойств композита в плоскости сечения кольца.

Ключевые слова: математическое моделирование, макрохарактеристики теплопроводности, периодические композитные материалы, температура, тепловой поток.

Постановка задачи

Рассматривается трёхмерная задача теории теплопроводности о действии тепловых нагрузок на обжимное кольцо, выполненное из 2-периодического композитного материала (рис. 1). Предполагается, что волокна распределены периодически в плоскости сечения кольца (рис. 2). Плоскость сечения можно представить состоящей из множества одинаковых прямоугольников – ячеек (рис. 3). Считается, что для волокон и связующего справедливо стационарное уравнение теплового равновесия:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -Q. \quad (1)$$

где Q – объёмные источники тепла, q_α – компоненты вектора теплового потока внутри среды.

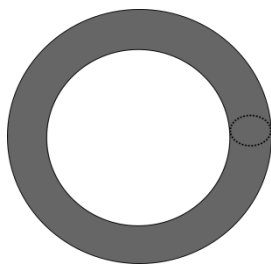


Рис. 1. Обжимное кольцо из композитного волокнистого материала под действием радиальных нагрузок

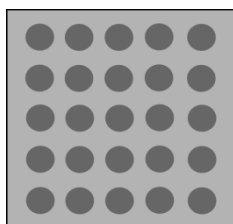


Рис. 2. Поперечное сечение кольца

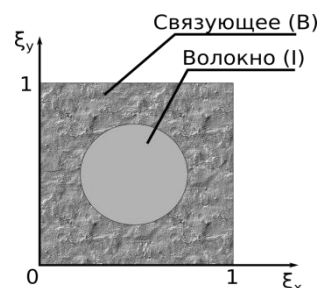


Рис. 3. Периодическая ячейка

Внутри среды действует анизотропный закон теплопроводности Фурье:

$$q_\alpha = - \sum_{\beta \in \{x, y, z\}} \lambda_{\alpha\beta} \frac{\partial T}{\partial \beta} \quad \alpha \in \{x, y, z\} \quad (2)$$

где $\lambda_{\alpha\beta}$ – коэффициентов теплопроводности, которые внутри каждой среды непрерывно меняются, а на границах сред претерпевает скачки. Уравнения (1)–(2) обезразмерены по правилам:

$$x \leftrightarrow x/L, \quad y \leftrightarrow y/L, \quad z \leftrightarrow z/L, \quad T \leftrightarrow T/T_* \\ \lambda_{\alpha\beta} \leftrightarrow \lambda_{\alpha\beta}/\lambda_*, \quad q_\alpha \leftrightarrow q_\alpha/q_*, \quad Q \leftrightarrow Qh/q_*, \quad q_* = \lambda_* T_*/h, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{h}{L} \ll 1 \quad (4)$$

где h – размер ячейки, L – характерный размер тела, T_* , λ_* , q_* – некоторые характерные значения температуры, коэффициента теплопроводности и теплового потока.

На границе перехода от одной среды к другой непрерывны тепловой поток и температура:

$$[q_n] = 0, \quad [T] = 0, \quad \alpha = \{x, y, z\}, \quad (5)$$

где q_n – контактный тепловой поток, которые по определению вычисляются по следующей формуле:

$$q_n = q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z. \quad (6)$$

На внутренней поверхности кольца заданы граничные условия: по внутреннему радиусу постоянная температура, равная 10, по внешнему радиусу постоянная температура, равная 1, торцы теплоизолированные.

После обезразмеривания уравнение (1) и закона теплопроводности (2) они примут вид:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} \varepsilon + \frac{\partial q_y}{\partial y} \varepsilon + \frac{\partial q_z}{\partial z} \varepsilon = -Q, \quad (7)$$

$$q_\alpha = - \sum_{\beta \in \{x, y, z\}} \lambda_{\alpha\beta} \frac{\partial T}{\partial \beta} \varepsilon, \quad \alpha \in \{x, y, z\}. \quad (8)$$

Для решения задачи (1)–(6) используется метод ячейковых функций. Решение представляется в виде асимптотического расщепления, для $\varepsilon \ll 1$:

$$T^{(n)} = \sum_{k=0}^n \left(\sum_{k_x+k_y+k_z=k} \Psi^{\bar{k}}(\bar{\xi}) \frac{\partial^k T_0^{(n)}}{\partial \bar{r}^{\bar{k}}} \varepsilon^k \right), \quad (9)$$

$$q_\alpha^{(n)} = \sum_{k=0}^n \left(\sum_{k_x+k_y+k_z=k} K_\alpha^{\bar{k}}(\bar{\xi}) \frac{\partial^k T_0^{(n)}}{\partial \bar{r}^{\bar{k}}} \varepsilon^k \right), \quad (10) \\ \alpha, \beta \in \{x, y, z\}$$

здесь n – номер асимптотического приближения решение макрозадачи, она аналогична задаче (1)–(6), но решается для кольца, состоящего из однородного анизотропного макроматериала, упругие константы для которого вычисляются по формуле (18); $\Psi^{\bar{k}}$ – решения для задач, поставленных на ячейке (10)–(14), \bar{k} – вектор, определяемый таким образом:

$$\bar{k} = (k_x, k_y, k_z) = k_x \bar{e}_x + k_y \bar{e}_y + k_z \bar{e}_z, \quad k = k_x + k_y + k_z, \\ \partial \bar{r}^{\bar{k}} = \partial x^{k_x} \partial y^{k_y} \partial z^{k_z}, \quad k_\alpha \geq 0, \quad k_\alpha \in Z.$$

В ячейке вводится локальная система координат $\xi_y, \xi_z \in [0, 1]$, координатные оси параллельны осям глобальной системы координат (рисунок 3) и ставится 3 задачи (в случае $k = 1$):

$$\frac{\partial K_x^{\bar{k}}}{\partial \xi_x} + \frac{\partial K_y^{\bar{k}}}{\partial \xi_y} + \frac{\partial K_z^{\bar{k}}}{\partial \xi_z} + K_x^{\bar{k}-\bar{\alpha}_x} + K_y^{\bar{k}-\bar{\alpha}_y} + K_z^{\bar{k}-\bar{\alpha}_z} = -\kappa(\bar{\xi}) \Lambda^{\bar{k}}, \quad (10)$$

теплопроводности внутри периодической ячейки:

$$K_\alpha^{\bar{k}}(\bar{\xi}) = - \sum_{\beta \in \{x, y, z\}} \lambda_{\alpha\beta} \left(\frac{\partial \Psi^{\bar{k}}}{\partial \xi_\beta} + \Psi^{\bar{k}-\bar{\alpha}_\beta} \right) - \lambda_{\alpha z} \Psi^{\bar{k}-\bar{\alpha}_z}, \quad (11)$$

условия сопряжения тепловых потоков и температур внутри ячейки:

$$[K_n^{\bar{k}}] = 0, \quad [\Psi^{\bar{k}}] = 0, \quad \alpha = \{x, y, z\}, \quad (12)$$

из условия периодичности ячейковых функций

$$\Psi^{\bar{k}}(\bar{\xi})|_{\xi_\alpha=0} = \Psi^{\bar{k}}(\bar{\xi})|_{\xi_\alpha=1}, \quad K_\alpha^{\bar{k}}(\bar{\xi})|_{\xi_\alpha=0} = K_\alpha^{\bar{k}}(\bar{\xi})|_{\xi_\alpha=1}, \quad \alpha \in \{x, y, z\}. \quad (13)$$

Выражения (10)–(13) для каждого фиксированного целочисленного вектора \bar{k} представляют собой краевую эллиптическую задачу на нахождение периодических ячейковых функций $\Psi^{\bar{k}}$. Необходимое условие разрешимости этой задачи имеет вид:

$$\Lambda^{\bar{k}} = - \left\langle K_x^{\bar{k}-\bar{\alpha}_x} + K_y^{\bar{k}-\bar{\alpha}_y} + K_z^{\bar{k}-\bar{\alpha}_z} \right\rangle. \quad (14)$$

При $k = 0$ решение задачи (10)–(14) имеет очевидное решение:

$$\Psi^{\bar{0}} = 1, \quad K_\alpha^{\bar{0}} = 0, \quad \alpha = \{x, y, z\}. \quad (15)$$

Формулы (1)–(6) с учетом равенств (15) принимают вид:

$$T^{(n)} = T_0^{(n)} + \sum_{k=1}^n \left(\sum_{k_x+k_y+k_z=k} \Psi^{\bar{k}}(\bar{\xi}) \frac{\partial^k T_0^{(n)}}{\partial \bar{r}^{\bar{k}}} \varepsilon^k \right), \quad q_\alpha^{(n)} = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{k_x+k_y+k_z=k} K_\alpha^{\bar{k}}(\bar{\xi}) \frac{\partial^k T_0^{(n)}}{\partial \bar{r}^{\bar{k}}} \varepsilon^k \right). \quad (16)$$

Величина $T_0^{(n)}$ имеет физический смысл, она является средним значением распределения температуры на ячейке, т. е. эта величина является температурой однородной макросреды:

$$T_0^{(n)} = \left\langle T^{(n)}(\bar{r}, \bar{\xi}) \right\rangle. \quad (17)$$

Макрохарактеристики теплопроводности определяются по формуле:

$$\tilde{\lambda}_{\alpha\varphi} = - \left\langle K_\alpha^{\bar{\alpha}_\varphi}(\bar{\xi}) \right\rangle, \quad \alpha, \varphi \in \{x, y, z\}, \quad (18)$$

где $\langle _ \rangle$ – интеграл от какой-то величины по ячейковым переменным, взятый по всей ячейке, усреднение этой величины по ячейке:

$$\langle _ \rangle = \int_0^1 \int_0^1 _ d\xi_x d\xi_y.$$

Результаты

Рассчитаны поля температуры и теплового потока для обжимного кольца. Ширина кольца 2, высота 1, внутренний диаметр 20. Сила, приложенная на внутреннюю поверхность колец равна 1. Все величины безразмерны. Теплопроводность волокон 10, теплопроводность связующего 1, материалы изотропные. Число волокон 5 x 5. На рис. 4 представлено поле температуры, возникающее в сечении кольца при $\theta = 0$. На рис. 5 представлено поле теплового потока в направлении оси X в том же сечении.

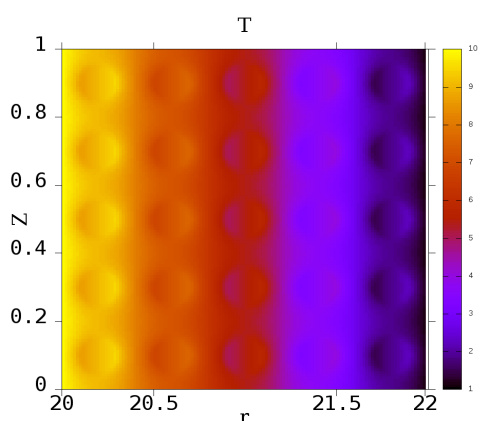


Рис. 4. Поле температуры

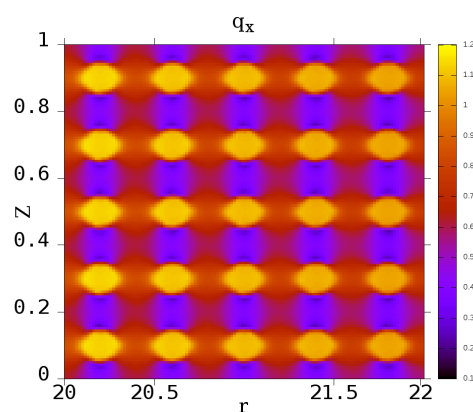


Рис. 5. Поле теплового потока
вдоль оси X

Литература

1. Горынин Г. Л., Власко А. Ф. Математическое моделирование упругих макрохарактеристик для волокнистых материалов при расчете конструкций транспортных сооружений // Вестн. СибАДИ. 2013. № 1 (29). С. 58–64.

УДК 691.116:620.1:539.3

Горынин Г. Л., Григорьев Ю. И.
Gorynin G. L., Grigoriev Yu.I.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ДРЕВЕСИНЫ И ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КЛЕЕНОГО ШПОНА

COMPARATIVE ANALYSIS OF ELASTICITY MODULE EXPERIMENTAL DATA OF WOOD AND UNIDIRECTIONAL SPLICING

Однонаправленный клееный шпон достаточно новый материал на строительном рынке и, несомненно, является достаточно перспективным в регионах с богатыми лесными ресурсами. Изучение данного материала в области использования его в качестве несущих кон-

струкций является весьма интересным направлением в современном строительстве. В данной работе продемонстрированы экспериментальные исследования древесины и однонаправленного клееного шпона на растяжение-сжатие. Определен модуль упругости материалов, построены диаграммы «Напряжение-деформация».

Ключевые слова: брус клееный из однонаправленного шпона, LVL-брус, испытания на растяжение-сжатие, композитные материалы, изделия из древесины.

Однонаправленный клееный шпон достаточно новый материал на строительном рынке и, несомненно, является достаточно перспективным в регионах с богатыми лесными ресурсами. Изучение данного материала в области использования его в качестве несущих конструкций является весьма интересным направлением в современном строительстве.

В данной работе представлены результаты испытаний образцов из древесины (сосны 1 сорта) и однонаправленного клееного шпона (LVL-бруса, завода ЛВЛ-Югра, сорт – UGRA S) на центральное сжатие (рис. 1, 2). Испытания проводились на испытательной машине ZWICK Z100 PROLINE. Цель экспериментов заключалась в определении модулей упругости древесины (сосны) и однонаправленного клееного шпона, а также проведении сравнительного анализа данных испытаний.

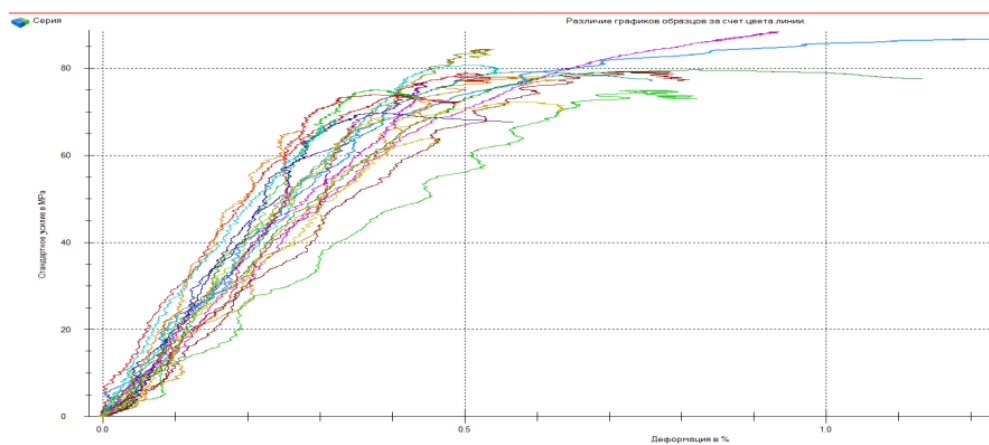


Рис. 1. Испытания древесины на сжатие (сосна 1 сорт)

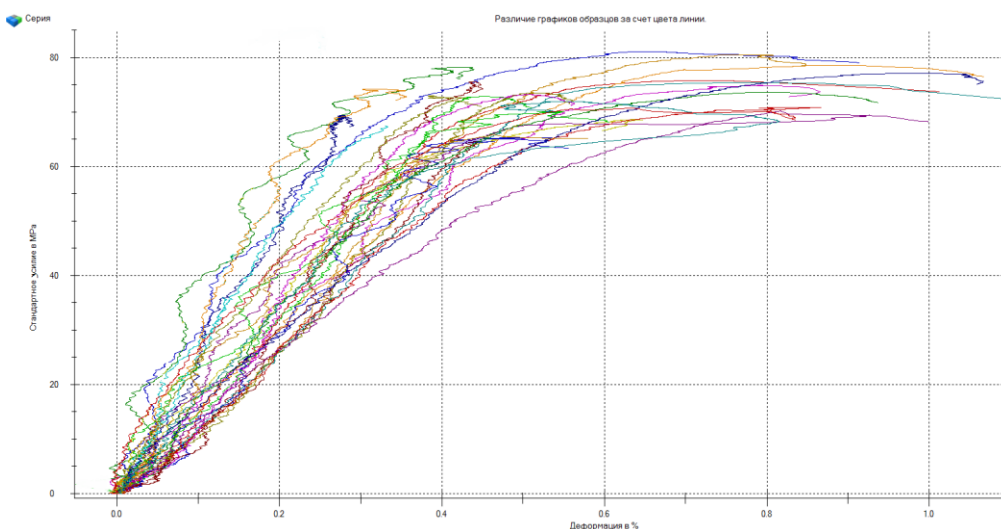


Рис. 2. Испытания однонаправленного клееного шпона на сжатие (UGRA S)

Обработанные результаты представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты испытаний древесины на сжатие

Обозначение	№	a, мм	b, мм	Емод, МПа	Fmax, Н	σм, МПа	dL при Fmax, мм	ηсж, сжк
	1	20	20	22900	31600	78.88	0.100	71.91
	2	20	20	22000	30000	75.00	0.075	81.08
	3	20	20	18700	34700	86.67	0.259	71.50
	4	20	20	25000	26300	65.70	0.055	44.10
	5	20	20	16500	35300	88.33	0.186	80.42
	6	20	20	18200	32300	80.66	0.104	61.26
	7	20	20	15900	25600	63.93	0.090	46.35
	8	20	20	15900	31700	79.16	0.145	68.55
	9	20	20	18100	31800	79.62	0.162	85.91
	10	20	20	25600	27900	69.73	0.076	48.57
	11	20	20	16400	31200	78.11	0.118	66.58
	12	20	20	17200	30600	76.61	0.090	49.93
	13	20	20	19700	31700	79.21	0.119	66.01
	14	20	20	19900	33700	84.35	0.104	72.40
	15	20	20	22800	29600	73.89	0.075	69.78
	16	20	20	12400	30000	74.96	0.146	77.97
	17	20	20	22100	24800	61.90	0.064	29.69
	18	20	20	17100	28700	71.79	0.090	40.35
	19	20	20	18500	29100	72.80	0.086	44.89
	20	20	20	23300	27300	68.37	0.064	52.92
	21	20	20	23000	28900	72.24	0.118	70.27

Таблица 2

Результаты испытаний однонаправленного клееного шпона на сжатие

Обозначение	№	a, мм	b, мм	Емод, МПа	Fmax, Н	σм, МПа	dL при Fmax, мм	ηсж, сжк
	1	20	20	18200	30300	75.78	0.144	44.80
	2	20	20	17700	29100	72.80	0.090	47.91
	3	20	20	24200	32400	81.07	0.127	45.70
	4	20	20	14800	31400	78.55	0.178	47.42
	5	20	20	14800	29900	74.85	0.158	50.86
	6	20	20	17500	27400	68.61	0.127	50.61
	7	20	20	15300	25800	64.58	0.089	38.00
	8	20	20	26900	31300	78.14	0.085	43.65
	9	20	20	26700	27700	69.34	0.055	53.97
	10	20	20	17000	32200	80.50	0.149	49.55
	11	20	20	17900	27800	69.41	0.185	40.77
	12	20	20	14600	30100	75.36	0.154	39.07
	13	20	20	16100	29400	73.48	0.104	50.61
	14	20	20	14700	28300	70.84	0.171	51.92
	15	20	20	15700	28100	70.14	0.106	49.47
	16	20	20	16900	26100	65.35	0.098	53.15
	17	20	20	23000	29300	73.20	0.102	46.03
	18	20	20	25700	27000	67.44	0.066	36.81
	19	20	20	20600	30200	75.55	0.088	46.03
	20	20	20	17000	29400	73.62	0.160	53.81
	21	20	20	12800	30800	77.07	0.193	63.06
	22	20	20	17600	26300	65.79	0.092	35.25
	23	20	20	12000	28100	70.19	0.163	41.60
	24	20	20	17500	28800	71.96	0.112	60.44
	25	20	20	20200	29200	72.97	0.078	42.75
	26	20	20	17400	28300	70.66	0.126	36.94

Следует отметить, что по результатам контрольной серии испытаний, представленных выше, средние значения модулей упругости древесины (сосны) составили 19 800 МПа, а однонаправленного клееного шпона – 18 100 МПа. Для сравнения по данным [1] значение для древесины модуля упругости вдоль волокон E=10000МПа для LVL-бруса – от 10 000 до 12 000 МПа в зависимости от сорта.

Однако в ходе испытаний при наборе образцов было выявлено, что LVL-брус имеет стабильные экспериментальные показатели независимо от выборки образцов, т. е. взятые образцы были заготовлены из балок, произведенных в разное время и из материала, поставленного различными партиями. У образцов из древесины ситуация абсолютно противоположная. При использовании образцов из древесины разных партий при одинаковом сорте и влажности основные показатели (напряжения, деформации) имеют достаточно большой диапазон значений, что не позволяет получить стабильные результаты о данном материале и ведет к занижению расчетных показателей в несколько раз.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что при дальнейшем исследовании однонаправленного клееного шпона, учитывая данные испытаний, имеются предпосылки для корректировки расчетных значений, приведенных в нормативных документах в большую сторону, что позволит сократить расход материала при проектировании и соответственно получить экономический эффект при использовании данного материала в строительстве.

Также были проведены испытания на растяжение древесины для выявления закономерностей характеристик упругости. На рис. 3 представлена диаграмма «Растяжение-сжатие древесины».

Из графика видно, что древесина является разномодульным материалом (модуль упругости при сжатии вдоль волокон – 19 800 МПа, при растяжении вдоль волокон – 10 100 МПа), что абсолютно противоречит данным нормативных документов (значение модуля упругости для древесины при растяжении и сжатии согласно [1] равно 10 000 МПа).

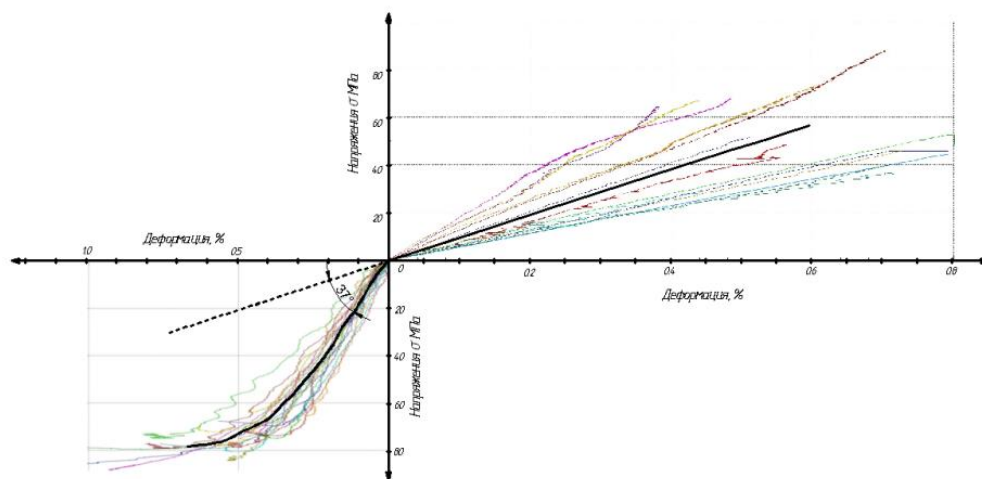


Рис. 3. Сравнительная диаграмма древесины при работе на растяжение-сжатие

Исходя из проделанной работы можно сделать вывод, что древесина – анизотропный разномодульный материал и принятые в действующих нормативах принципы расчетов и расчетные сопротивления имеют необоснованный запас прочности (в несколько раз) из-за принятых допущений. И исходя из этого композитные материалы на основе древесины, такие как фанера, ЛВЛ-брус, клееная древесина также являются анизотропными разномодульными материалами, а соответственно и принципы расчетов конструкций из данных материалов необходимо корректировать.

Литература

1. СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.

УДК 624.155.116:539.3/.6

Горынин Г. Л., Снигирева В. А.
Gorynin G. L., Snigireva V. A.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ РАСЧЕТ ТРУБОБЕТОННОЙ СВАИ-СТОЙКИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

DIMENSIONAL DESIGN OF TUBE CONFINED CONCRETE END-BEARING PILE DUE TO NONLINEAR CONCRETE DEFORMATION DIAGRAM

Рассмотрены вопросы расчета напряженно-деформированного состояния труботонных свай-стоек. Рассмотрены и проанализированы задачи о сжатии бетонной сваи в стальной обойме с учетом нелинейности диаграммы деформирования бетона. Получены формулы пространственного расчета данных конструкций. Проанализирована несущая способность бетонной сваи в стальной обойме с учетом нелинейности диаграммы деформирования бетона.

Ключевые слова: труботонные конструкции, бетонная свая в стальной обойме, диаграмма деформирования бетона.

В ранних работах было представлено решение пространственной задачи о сжатии труботонной сваи-стойки традиционной конструкции и выявлен недостаток данных конструкций, связанный с нарушением совместной работы стальной трубы и бетона уже на начальных стадиях загрузки, в связи с чем было предложено использование бетонной сваи в стальной обойме [2].

Считаем, что труботонная свая-стойка находится под действием осевой сжимающей силы P . Предполагается, что при этом напряженно-деформированное состояние конструкции обладает осевой симметрией, и продольные перемещения W зависят только от координаты z , а радиальные перемещения U – от r , где z, θ, r – цилиндрическая система координат (рис. 1). В этом случае одно из уравнений равновесий [5] выполняется тождественно, а остальные два упрощаются и имеют вид:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

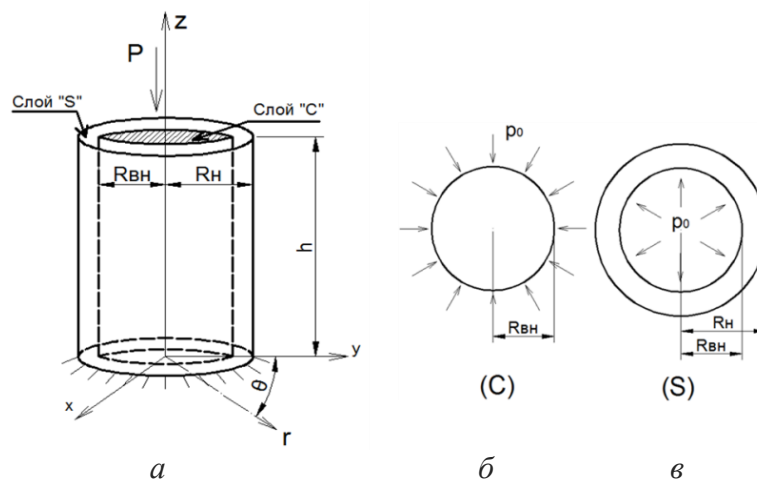


Рис. 1. а – труботонная свая; б – сечение бетонного ядра сваи;
в – сечение стальной оболочки сваи

Известно, что бетон является нелинейно-деформируемым материалом. Для учета этой особенности рассмотрим трехлинейную диаграмму зависимости осевых напряжений от относительных осевых деформаций (рис. 2), согласно [4]. При $\sigma_{zz} < 0,6R_b$: $\sigma_{zz} = E\varepsilon$ (случай 1); при $0,6R_b \leq \sigma_{zz} < R_b$: $\sigma_{zz} = E_1(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{zz}^*)$ (случай 2), где E, ν и E_1, ν_1 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона бетона при случаях 1 и 2 соответственно $\varepsilon_{zz}^* = 0,6R_b \cdot \frac{(E_1 - E)}{E_1 \cdot E}$.

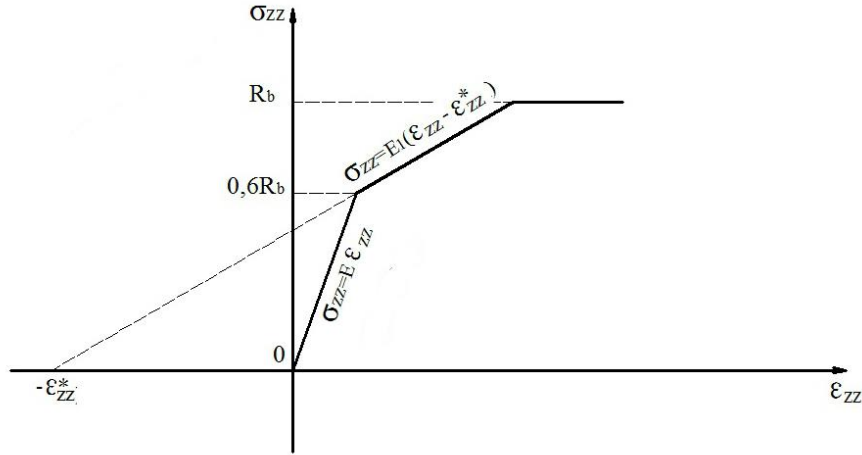


Рис. 2. Трехлинейная диаграмма деформирования сжатого бетона

Деформации в радиальном и тангенциальном направлениях считаются существенно меньше осевых, тогда обобщенные соотношения относительных деформаций имеют вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr} = \frac{\sigma_{rr}}{E} - \nu \frac{\sigma_{\theta\theta}}{E} - \nu_1 \left(\frac{\sigma_{zz}}{E_1} + \varepsilon_{zz}^* \right); \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{\theta\theta}}{E} - \nu \frac{\sigma_{rr}}{E} - \nu_1 \left(\frac{\sigma_{zz}}{E_1} + \varepsilon_{zz}^* \right); \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\sigma_{zz}}{E_1} + \varepsilon_{zz}^* - \nu_2 \frac{\sigma_{\theta\theta}}{E} - \nu_2 \frac{\sigma_{rr}}{E}. \end{cases}$$

Считаем, что

$$\frac{\nu_1}{E_1} = \frac{\nu_2}{E}.$$

Тогда пространственное напряженно-деформированное состояние бетонного ядра подчиняется закону:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \hat{\varepsilon}_{rr} \left(\frac{E}{1 - \nu^2} + \frac{E^2 \nu_1^2}{(1 - \nu)(E_1(1 - \nu) - 2\nu_1^2 E)} \right) + \\ + \hat{\varepsilon}_{\theta\theta} \left(\frac{E\nu}{1 - \nu^2} + \frac{E^2 \nu_1^2}{(1 - \nu)(E_1(1 - \nu) - 2\nu_1^2 E)} \right) + \hat{\varepsilon}_{zz} \frac{EE_1 \nu_1}{E_1(1 - \nu) - 2\nu_1^2 E}; \\ \sigma_{\theta\theta} = \hat{\varepsilon}_{\theta\theta} \left(\frac{E}{1 - \nu^2} + \frac{E^2 \nu_1^2}{(1 - \nu)(E_1(1 - \nu) - 2\nu_1^2 E)} \right) + \\ + \hat{\varepsilon}_{rr} \left(\frac{E\nu}{1 - \nu^2} + \frac{E^2 \nu_1^2}{(1 - \nu)(E_1(1 - \nu) - 2\nu_1^2 E)} \right) + \hat{\varepsilon}_{zz} \frac{EE_1 \nu_1}{E_1(1 - \nu) - 2\nu_1^2 E}; \\ \sigma_{zz} = \frac{E_1^2(1 - \nu)}{E_1(1 - \nu) - 2\nu_1^2 E} \left(\hat{\varepsilon}_{zz} + \frac{E\nu_1}{E_1(1 - \nu)} (\hat{\varepsilon}_{rr} + \hat{\varepsilon}_{\theta\theta}) \right), \end{cases} \quad (2)$$

где $\hat{\varepsilon}_{rr} = \varepsilon_{rr} + \nu_1 \cdot \varepsilon_{zz}^*$, $\hat{\varepsilon}_{\theta\theta} = \varepsilon_{\theta\theta} + \nu_1 \cdot \varepsilon_{zz}^*$, $\hat{\varepsilon}_{zz} = \varepsilon_{zz} - \varepsilon_{zz}^*$.

Напряженно-деформированное состояние материала стальной трубы подчиняется обобщенному закону Гука [5]:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} ((1-\nu)\varepsilon_{rr} + \nu\varepsilon_{zz} + \nu\varepsilon_{\theta\theta}); \\ \sigma_{zz} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} ((1-\nu)\varepsilon_{zz} + \nu\varepsilon_{rr} + \nu\varepsilon_{\theta\theta}); \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} ((1-\nu)\varepsilon_{\theta\theta} + \nu\varepsilon_{rr} + \nu\varepsilon_{zz}), \end{cases} \quad (3)$$

В дальнейшем для обозначения физических величин, относящихся к стальной трубе, будем использовать верхний индекс «S» (steel), к бетону – верхний индекс «C» (concrete).

На бетонное ядро сваи передается нагрузка P , а на нижнем торце сваи отсутствуют продольные перемещения точек, что связано с жестким защемлением торца (рис. 1а), поэтому краевые условия на торцах сваи имеют вид:

$$W = 0 \text{ (при } z = 0); \int_{FC} \sigma_{zz} dF = -P \text{ (при } z = h). \quad (4)$$

Считаем, что отсутствует боковое давление на наружную цилиндрическую поверхность стальной трубы. Тогда справедливо краевое условие на боковой поверхности (рис. 1 б, в):

$$\sigma_{rr}^S = 0 \text{ (при } r = R_H) \quad (5)$$

В рассматриваемом варианте отсутствует совместная работа бетонного ядра и стальной трубы в продольном направлении, а взаимодействие в поперечном направлении основывается на выполнении следующих условий сопряжения слоёв:

$$\sigma_{rr}^C = \sigma_{rr}^S, U^C = U^S \text{ (при } r = R_{BH}) \quad (6)$$

Путем вычислений, согласно известным методам [1], получаем аналитическое решение задачи (1)–(5) без учета совместной работы слоёв, которое справедливо как при линейной [2], так и при трехлинейной диаграмме деформирования бетона:

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^S = \frac{p_0 \cdot R_{BH}^2 \cdot (r^2 - R_H^2)}{(R_H^2 - R_{BH}^2) \cdot r^2}; \\ \sigma_{zz}^S = 0; \\ \sigma_{\theta\theta}^S = \frac{p_0 \cdot R_{BH}^2 \cdot (r^2 + R_H^2)}{(R_H^2 - R_{BH}^2) \cdot r^2}. \end{cases} \quad \begin{cases} \sigma_{rr}^C = -p_0; \\ \sigma_{zz}^C = -\frac{P}{FC}; \\ \sigma_{\theta\theta}^C = -p_0. \end{cases} \quad (7)$$

В дальнейшем для обозначения величин, относящихся к решению задачи с учетом нелинейности диаграммы деформирования бетона, будем использовать верхний индекс «'»

Из учета условий сопряжения слоёв (6) и решений, полученных для независимо работающих стальной обоймы и бетонного цилиндра (7), получаем решение нелинейной задачи (1)–(7):

$$p'_0 = \left(\frac{P}{\pi R_{BH}^2} \cdot \frac{\nu_1^C}{E_1^C} - \nu_1^C \cdot \varepsilon_{zz}^* \right) \cdot \frac{E^C E^S (R_H^2 - R_{BH}^2)}{E^S (1 - \nu^C) (R_H^2 - R_{BH}^2) + E^C ((1 - \nu^S) R_{BH}^2 + (1 + \nu^S) R_H^2)} \quad (8)$$

Решение для случая, когда бетон рассматривается как линейно деформируемый материал в соответствии с обобщенным законом Гука (3), было получено ранее [2]:

$$p_0 = \frac{P}{\pi \cdot R_{\text{BH}}^2} \cdot \frac{E^S \cdot \nu^C \cdot (R_{\text{H}}^2 - R_{\text{BH}}^2)}{E^C \cdot (R_{\text{BH}}^2 \cdot (1 - \nu^S) + R_{\text{H}}^2 \cdot (1 + \nu^S)) + E^S \cdot (R_{\text{H}}^2 - R_{\text{BH}}^2) \cdot (1 - \nu^C)} \quad (9)$$

Проанализируем увеличение несущей способности бетонной сваи в стальной обойме за счет упрочнения бетонного ядра. Наиболее распространенной формой записи зависимости прочности бетона в условиях трехосного сжатия является формула, предложенная Ф. Рихардом, А. Брауном и А. Брандраегом [6]:

$$R_{b,3} = R_b + K \cdot p_0,$$

где $R_{b,3}$ – предел прочности бетона в обжатом состоянии, R_b – предел призмочной прочности бетона, p_0 – радиальные напряжения обжатия бетонного ядра стальной обоймой, K – коэффициент упрочнения бетона ядра $K \approx 4$.

Таким образом, выражение для определения прочности бетона в условиях трехосного сжатия имеет вид:

$$R_{b,3} = R_b + 4 \cdot p_0.$$

Значение сжимающей нагрузки должно соответствовать условию $P_1 \leq F \cdot R_b$ в случае одноосного сжатия бетона (без обоймы) и $P_3 \leq F \cdot R_{b,3}$ в случае трехосного сжатия бетона.

При учете нелинейности деформирования бетона

$$P'_3 \leq \frac{F(R_b - 4 \hat{\alpha}')}{1 - 4 \alpha'} \quad (10)$$

Увеличение несущей способности в данном случае определяется отношением

$$\beta' = \frac{P'_3}{P_1} = \frac{(R_b - 4 \hat{\alpha}')}{(1 - 4 \alpha') R_b} \quad (11)$$

где
$$\hat{\alpha}' = \frac{\nu_1^C \varepsilon_{zz}^* E^C E^S (R_{\text{H}}^2 - R_{\text{BH}}^2)}{E^S (1 - \nu^C) (R_{\text{H}}^2 - R_{\text{BH}}^2) + E^C ((1 - \nu^S) R_{\text{BH}}^2 + (1 + \nu^S) R_{\text{H}}^2)},$$

$$\alpha' = \frac{\nu_1^C}{E_1^C} \cdot \frac{E^C E^S (R_{\text{H}}^2 - R_{\text{BH}}^2)}{E^S (1 - \nu^C) (R_{\text{H}}^2 - R_{\text{BH}}^2) + E^C ((1 - \nu^S) R_{\text{BH}}^2 + (1 + \nu^S) R_{\text{H}}^2)}.$$

При рассмотрении бетона как линейно деформируемого материала:

$$P_3 \leq \frac{F R_b}{1 - 4 \alpha} \quad (12)$$

Увеличение несущей способности в данном случае определяется отношением

$$\beta = \frac{P_3}{P_1} = \frac{1}{1 - 4 \alpha} \quad (13)$$

где
$$\alpha = \frac{\nu^C E^S (R_{\text{H}}^2 - R_{\text{BH}}^2)}{E^S (1 - \nu^C) (R_{\text{H}}^2 - R_{\text{BH}}^2) + E^C ((1 - \nu^S) R_{\text{BH}}^2 + (1 + \nu^S) R_{\text{H}}^2)}.$$

Проанализируем пространственную работу бетонной сваи в стальной обойме, рассмотрев примеры с учетом нелинейного деформирования бетона и без. Принимаем размеры стальной трубы $R_{\text{H}}=0,265\text{м}$, $R_{\text{BH}}=0,26\text{м}$. Деформационно-прочностные характеристики материалов принимаем согласно нормативной документации [3; 4]: $E^C=24\,000$ МПа, $E_I^C=6\,850$

МПа, $\nu^C = 0,2$, $\nu_I^C = 0,25$, $R_b = 14,5$ МПа (бетон В 25) и $E^S = 206\,000$ МПа, $\nu^S = 0,3$ (сталь Ст3сп5). Принимаем предельную величину приложенной нагрузки согласно (12) и (10) $P_3 = 3,48$ МН и $P'_3 = 7,55$ МН. В результате решения получаем: $p_o = 0,47$ МПа (9), $\beta = 1,13$ (13) – линейная задача; $p_o = 5,26$ МПа (8), $\beta' = 2,45$ (11) – нелинейная задача.

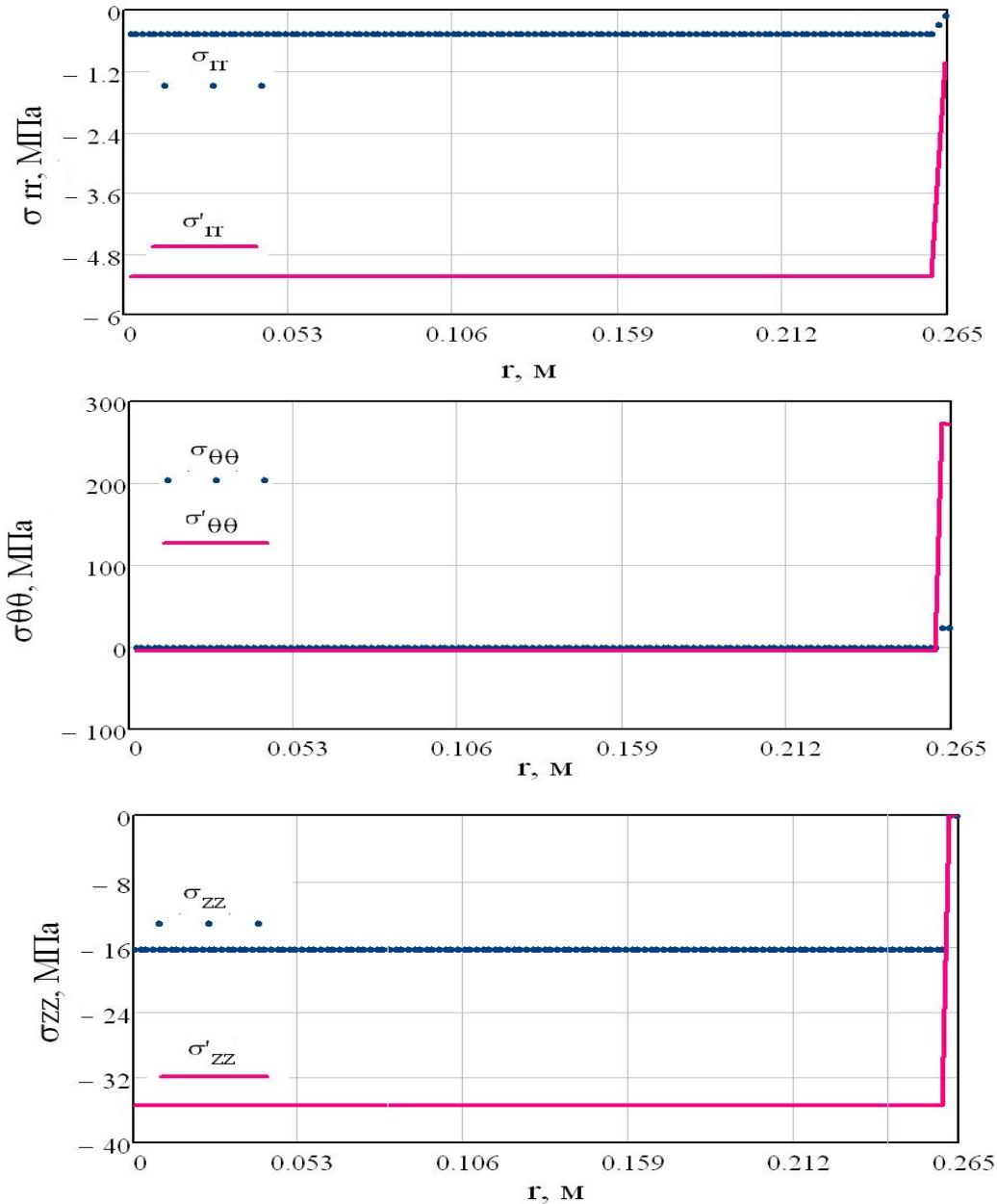


Рис. 3. Графики функций распределения напряжений по поперечному сечению бетонной сваи в стальной обойме

На рис. 3 представлены графики распределения напряжений по сечению сваи в случае учета нелинейности деформирования бетона и при рассмотрении бетона как линейно деформируемого материала.

Выводы

1. Рассмотрена задача о сжатии бетонной сваи-стойки в стальной обойме с учетом нелинейности диаграммы деформирования бетона, получены формулы, позволяющие провести пространственный расчет конструкции с учетом характеристик материалов, геометрических параметров и взаимодействия слоёв.

2. Выведены формулы определения увеличения несущей способности бетонной сваи в стальной обойме за счет упрочнения бетонного ядра, находящегося в условиях трехосного сжатия, при расчете бетона по линейной и нелинейной диаграмме.

3. При учете нелинейности диаграммы деформирования бетона расчетная несущая способность бетонной сваи в стальной обойме увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с бетонной свайей.

Литература

1. Горынин Г. Л., Немировский Ю. В. Пространственные задачи изгиба и кручения слоистых конструкций. Метод асимптотического расщепления. Новосибирск : Наука, 2004. 409 с.
2. Горынин Г. Л., Снигирева В. А. Пространственный расчет трубобетонной свайстойки // Северный регион. Наука, образование, культура. Вып. № 2 (32). Том II. Сургутск. гос. ун-т. Сургут : ИЦ СурГУ, 2015. С. 141–147.
3. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М., 2011. 173 с.
4. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М., 2012. 147 с.
5. Теребушко О. И. Основы теории упругости и пластичности. М. : Наука, 1984. 320 с.
6. Richart F., Brown A., Brandraeg A. A study of failure of concrete under combined compressive stresses // Eng Exper Station Bull University Illinois. 1928. № 185. 105 p.

УДК 678.067.5-043.92:681.7.068: 551.571

*Далинкевич А. А., Михеев П. В., Гусев С. А., Игонин Т. Н.,
Максаева Л. Б., Ненашева Т. А.
Dalinkevich A. A., Mikheev P. V., Gusev S. A., Igonin T. N.,
Maksaeva L. B., Nenasheva T. A.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭПОКСИДНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ

RESEARCH OF LONG TIME WATER ABSORPTION OF CONSTRUCTIONAL EPOXY FIBREGASSES BY MEANS OF FIBRE-OPTICAL SENSORS

В данной работе исследована возможность применения встроенных оптоволоконных датчиков (датчиков Брэгга) деформации для контроля состояния полимерных стеклопластиков на связующем горячего отверждения ЭД-И. Датчики были в разных слоях слоистого пластика, армированного биаксиальной стеклотканью. Пакет имел квазиизотропную структуру. Изготовленный методом вакуумной пропитки образец подвергался воздействию горячей 90 °С воды в течение 6 месяцев. В результате была показана работоспособность системы измерения и зафиксированы параметры набухания в разных слоях стеклопластика.

Ключевые слова: оптоволоконные датчики, полимерный стеклопластик.

Введение

Воздействие атмосферной влаги является важнейшим из климатических факторов, воздействию которых подвергаются полимерные композиционные материалы (ПКМ) при эксплуатации изделий из них в природных условиях.

В результате диффузионного проникновения воды в полимерную матрицу и на границу раздела в ПКМ часть молекул воды иммобилизуется на полярных группах полимера, ослабляя тем самым межцепное взаимодействие в матрице и адгезионное взаимодействие на границе раздела полимер – наполнитель. При этом высвобождается молекулярная подвижность (эффект пластификации) и протекают релаксационные процессы, приводящие к структурным перестройкам на молекулярном и надмолекулярном уровне.

Высококочувствительные волоконно-оптические датчики деформаций успешно применяются для оценки внешних и внутренних механических и термических напряжений в различных материалах и элементах конструкций [1–4; 6–8].

Цель работы состояла в выяснении возможностей применения оптоволоконных датчиков Брэгга для изучения микромеханических влажностных деформаций, возникающих в ПКМ при ускоренном тепловлажностном воздействии, широко применяемом для моделирования климатического старения ПКМ.

Для изготовления образца использована биаксиальная стеклоткань (ТУ 1916-033-61664530-2013, производитель ЗАО «Препрег-СКМ») с поверхностной плотностью 860 г/м² и направлением волокон 0°/90° (СМ-42019 (+0/90°)).

Связующее эпоксидное марки ЭД-И (ТУ ВЗ-774-2010) представляло собой композицию из эпоксидной смолы ЭД-20 (100 м.ч.) отвердителя ИМТГФА (изометилтетрагидрофталевого ангидрида, 20 м. ч.) и ускорителя УП 606/2 (2,4,6, трис (диметиламинометил) фенола).

Образцы стеклопластика на основе биаксиальной ткани и связующего ЭД-И получали методом инфузии. Связующее отверждалось при 120 °С.

Полноту отверждения связующего контролировали методом дифференциальной сканирующей калориметрии, температура стеклования образца отвержденного связующего (без наполнителя) составила 132 °С.

Параметры оптических решеток датчиков производства «Инверсия сенсор» были следующие:

- верхний слой (маркировка №1341). Длина волны – 1542,28;
- второй слой (маркировка №1380). Длина волны – 1550,23;
- средний слой (маркировка № 1340). Длина волны 1554,06.

Измерения производились экспериментальной измерительной системой, разработанной в НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана и прибором Astro A312 производства «Инверсия сенсор». Данные, полученные с помощью обеих систем измерения, сопоставлены между собой и внесены корректировки для их использования в одной системе измерений.

В табл. 1 приведена схема укладки датчиков. Чтобы выявить пространственную неравномерность проникновения воды в образец, датчики закладывались на разную глубину (слои 1, 2 и 3).

Таблица 1

Укладка датчиков в слоях стеклопластика

№ слоя стеклоткани	Укладка
1	+0/90°
Оптический датчик 1	Измерительный слой
2	+45/-45°
Оптический датчик 2	Измерительный слой
3	+0/90°
Оптический датчик 3	Измерительный слой
4	+0/90°
5	+45/-45°
6	+0/90°

Параллельно был изготовлен образец-свидетель на том же связующем и ткани, но без датчиков. Из него были вырезаны образцы для определения плотности (гидростатическим взвешиванием) и некоторых физико-механических характеристик (табл. 2).

Изготовленный образец стеклопластика, содержащий датчики, был подвергнут тепловлажностному старению в испытательной климатической камере при температуре 80 °С и относительной влажности 95 %. Точность поддержания параметров испытаний составляла ± 1 °С для температуры и $\pm 1,5$ % для влажности. Влагосодержание в исследуемом образце стеклопластика контролировали методом периодического взвешивания с точностью до 10^{-3} г.

Таблица 2

Свойства изготовленного стеклопластика

№	Свойство	Значение
1	Модуль упругости при изгибе, ГПа	2,84
2	Прочность при изгибе, МПа	428
3	Прочность при сдвиге (режим 120), МПа	38,3
4	Плотность пластика, г/см ³	1,6

Результаты и обсуждение

Из рис. 1 видно, что сорбция паров воды стеклопластиком имеет аномальный характер и не подчиняется закону Фика. Наличие максимума и ступени на кинетической кривой сорбции свидетельствует о протекании в образце релаксационных процессов, т. е. об изменении внутренних микроструктурных напряжений и соответственно деформаций, которые, в свою очередь, вызваны диффузионно-сорбционным проникновением и взаимодействием воды с полимером [1; 5].

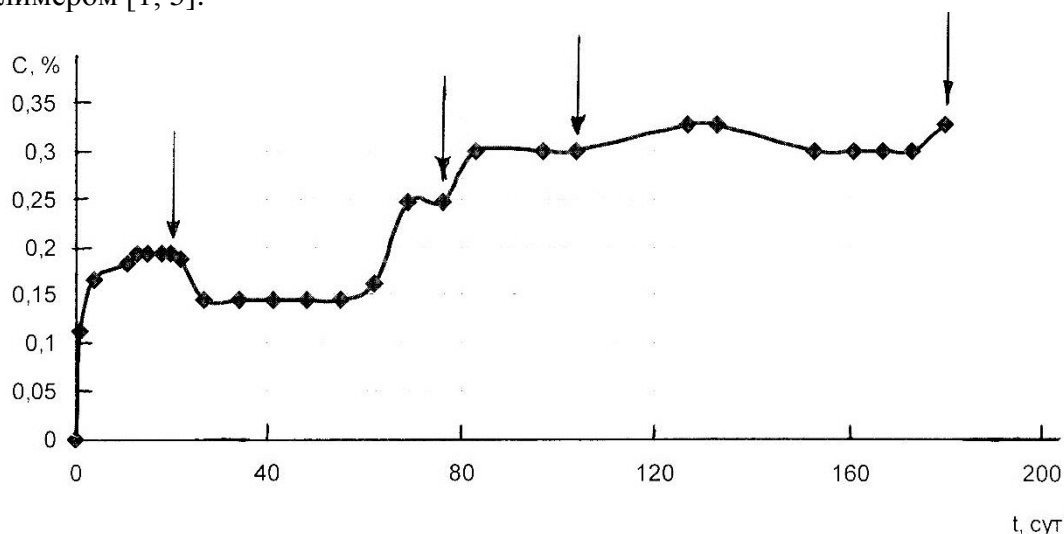


Рис. 1. Сорбция воды стеклопластиком:
стрелками показаны моменты измерения деформаций

Высокая чувствительность к деформации брэгговской решетки позволяет использовать ее в качестве чувствительного элемента и для измерения влажностных микродеформаций в образце композита после длительного его пребывания во влажной среде. Зависимость центральной отраженной длины волны от деформации может быть представлена в следующем виде [8]:

$$\Delta\lambda_6 = \lambda_6 (1 - p_e) \cdot \varepsilon_z, \quad (2)$$

где λ_6 и $\Delta\lambda_6$ – длина волны датчика и ее изменение, ε_z – деформация оптической решетки, p_e – константа деформации оптического волокна, определяемая из следующего выражения:

$$p_e = \frac{n_{эф}^2}{2} \cdot [p_{12} - \nu \cdot (p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

где p_{11} и p_{12} – коэффициенты Поккельса в тензоре оптических напряжений, ν – коэффициент Пуассона. Для типового волокна $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ и $n_{эф} = 1,4682$ [4]. Исходя из этих значений чувствительность для длины волны $\lambda_6 = 1550$ нм составляет 12 нм на 1 % деформации. Деформация датчиков после выдержки в воде, рассчитанные на основе (3), приведена в табл. 3.

Таблица 3

Приращение деформации с момента отверждения пластика

Деформация от момента отверждения, %	15.июл.15	10.сен.15	09.окт.15	23.дек
Верхний слой	0,007	-0,017	-0,014	-0,074
Второй слой	0,013	0,003	0,007	-0,001
Средний слой	0,015	0,003	0,009	-0,006

На рис. 2 представлены изменения деформации слоев в виде гистограммы.

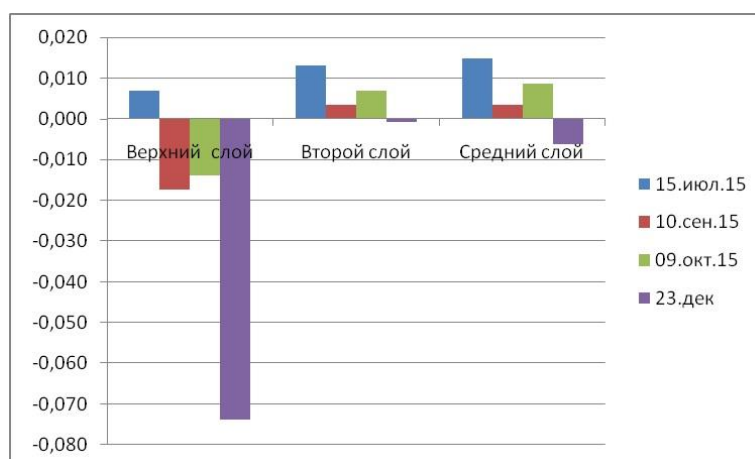


Рис. 2. Деформации слоев стеклопластика при выдержке во влажной атмосфере

Выводы

Показана возможность фиксации термовлажностных деформаций в стеклопластике квазиизотропной структуры в течение длительного времени. Использованы два типа измерительной аппаратуры: экспериментальная система МГТУ им Н. Э. Баумана на основе белого света и система Astro A312 на основе перестраиваемого лазера.

Зафиксированы деформации набухания в разных слоях стеклопластика. В целом связующее ЭД-И показало высокую стойкость при воздействии температуры и влаги.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 16-08-00445.

Литература

1. Бэр Э. Конструкционные свойства пластмасс (физико-химические основы применения) / пер. с англ. М. : Химия, 1967. С. 231–235.
2. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток : Дальнаука, 1999. С. 115–118.
3. Михеев П. В., Артемьев А. В., Лазарев В. А., Пнев А. Б., Нелюб В. А. Опыт создания системы встроенного контроля состояния конструкции на основе волоконно-оптических

брэгговских датчиков // сб. докл. Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов ТЕСТМАТ – 2013. М. : Всерос. науч.-исслед. ин-т авиацион. материалов, 2013. С. 28.

4. Сарбаев Б. С., Смердов А. А., Таирова Л. П., Селезнев В. А., Соколов С. В., Буй-мистрюк Г. Я., Изотов В. И., Рогов А. М. Исследование деформированного состояния конструкций из композиционных материалов с помощью волоконно-оптических датчиков // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Номер SP. С. 39–51.

5. Современные физические методы исследования полимеров / под ред. Г. Л. Слонимского. М. : Химия, 1982. С. 198–208.

6. Шишкин В. В., Чуринов А. Е., Харенко Д. С., Шелемба И. С. Система мониторинга несущих конструкций футбольного манежа на основе волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. 2013. № 6 (110). С. 22–23.

7. Cusano A., Cutolo A., Albert J. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation. Editors : Bentham Science Publishers, 2010. P. 35–52.

8. Shishkin V.V., Churin A. E., Kharenko D. S., Zheleznova M. A, Shelemba I. S. Structural health monitoring system of soccer arena based on optical sensors // Proc. SPIE, 23rd: International Conference on Optical Fibre Sensors, 9157. D3 (2 June 2014).

УДК 678.067.5-043.92:681.7.068:620.1

*Далинкевич А. А., Михеев П. В., Гусев С. А., Игонин Т. Н.,
Максаева Л. Б., Ненашева Т. А.
Dalinkevich A. A., Mikheev P. V., Gusev S. A., Igonin T. N.,
Maksaeva L. B., Nenasheva T. A.*

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭПОКСИДНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ СТАРЕНИЯ

DEFORMATIONS FIBER OPTICAL SENSORS USAGE FOR RESEARCH OF MICROSTRUCTURAL CHANGES IN CONSTRUCTIONAL EPOXY FIBREGLASSES UNDER INFLUENCE OF NATURAL FACTORS OF AGEING

В данной работе исследована возможность применения встроенных оптоволоконных датчиков (датчиков Брэгга) деформации для контроля состояния полимерных стеклопластиков на связующем горячего отверждения ЭД-И. Датчики были в разных слоях слоистого пластика, армированного биаксиальной стеклотканью. Пакет имел квазиизотропную структуру. Изготовленный методом вакуумной пропитки образец подвергался воздействию горячего 90 °С насыщенного пара в течение 6 месяцев. В результате была показана работоспособность системы измерения и зафиксированы параметры набухания в разных слоях стеклопластика, используемого для изготовления труб.

Ключевые слова: стеклопластик, мультиаксиальная ткань, волоконнооптические датчики деформаций, поглощение влаги.

Введение

При эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в природных условиях они подвергаются воздействию различных климатических факторов,

важнейшим из которых является воздействие атмосферной влаги. В настоящее время широко внедряются в промышленность трубы из стеклопластика благодаря их низкому удельному весу и высокой коррозионной стойкости. Однако важно знать каков ресурс таких труб. В данной работе мы использовали волоконно-оптические датчики Брэгга для изучения влагопоглощения конструкционных стеклопластиков.

Влагостойкость и влагоемкость полимерных композитов на основе умеренно полярных эпоксидных полимеров являются важными характеристиками их эксплуатационной, и в т. ч. климатической стойкости. Это особенно важно для прогноза длительной прочности продуктопроводов, изготовленных из стеклопластика.

В результате диффузионного проникновения воды в полимерную матрицу и на границу раздела в ПКМ часть молекул воды иммобилизуется на полярных группах полимера, ослабляя тем самым межцепное взаимодействие в матрице и адгезионное взаимодействие на границе раздела полимер – наполнитель. При этом высвобождается молекулярная подвижность (эффект пластификации) и протекают релаксационные процессы, приводящие к структурным перестройкам на молекулярном и надмолекулярном уровне [1; 5].

Эти перестройки, в свою очередь, будут приводить к появлению влажностных микроструктурных деформаций вследствие изменения уровня изначально имеющихся в материале внутренних микроструктурных напряжений.

Высокочувствительные волоконно-оптические датчики деформаций успешно применяются для оценки внешних и внутренних механических и термических напряжений в различных материалах и элементах конструкций [2–4; 6; 7; 9; 11].

Цель работы состояла в выяснении возможностей применения оптоволоконных датчиков Брэгга для изучения микромеханических напряжений, возникающих в ПКМ при ускоренном тепловлажностном воздействии, широко применяемом для моделирования климатического старения ПКМ.

Методика

Для изготовления образца использована биаксиальная стеклоткань (ТУ 1916-033-61664530-2013, производитель ЗАО «Препрег-СКМ») с поверхностной плотностью 860 г/м² и направлением волокон 0°/90° (СМ-42019 (+0/90°)).

Связующее эпоксидное марки ЭД-И (ТУ В3-774-2010) представляло собой композицию из эпоксидной смолы ЭД-20 (100 м.ч.) отвердителя ИМТГФА (изометилтетрагидрофталевого ангидрида, 20 м. ч.) и ускорителя УП 606/2 (2,4,6, трис-(диметиламинометил) фенола).

Образцы стеклопластика на основе биаксиальной ткани и связующего ЭД-И получали методом инфузии. Связующее отверждалось при 120 °С.

Полноту отверждения связующего контролировали методом дифференциальной сканирующей калориметрии, температура стеклования образца отвержденного связующего (без наполнителя) составила $T_{\text{стекл}} = 132$ °С.

Параметры оптических решеток датчиков производства «Инверсия сенсор» были следующие:

- верхний слой (маркировка № 1341), длина волны – 1542,28;
- второй слой (маркировка № 1380), длина волны – 1550,23;
- средний слой (маркировка № 1340), длина волны – 1554,06.

Измерения производились экспериментальной измерительной системой, разработанной в НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана и прибором Astro A312 производства «Инверсия сенсор». Данные, полученные с помощью обеих систем измерения, сопоставлены между собой и внесены корректировки для их использования в одной системе измерений. Система МГТУ им. Н. Э. Баумана использует в работе сверхяркий светодиод, а Astro A312 основана на перестраиваемом лазере.

В табл. 1 приведена схема укладки датчиков. Чтобы выявить пространственную неравномерность проникновения воды в образец, датчики закладывались на разную глубину (между слоями 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4).

Параллельно был изготовлен образец-свидетель на том же связующем и ткани, но без датчиков. Из него были вырезаны образцы для определения плотности (гидростатическим взвешиванием) и некоторых физико-механических характеристик, представленных в табл. 2. Объемная доля армирующих волокон определена из толщины образца, числа слоев ткани и объемной плотности стеклянных волокон $2,55 \text{ г/см}^3$.

Изготовленный образец стеклопластика, содержащий датчики, был подвергнут тепловлажностному старению в испытательной климатической камере при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности 95% . Точность поддержания параметров испытаний составляла $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ для температуры и $\pm 1,5 \%$ для влажности. Влагосодержание в исследуемом образце стеклопластика контролировали методом периодического взвешивания с точностью до 10^{-3} г . Для проведения оптических измерений образец стеклопластика извлекали из камеры после определенного времени влажностного старения. Далее в течение $2\text{--}2,5 \text{ ч}$ он остывал при комнатной температуре ($20\text{--}22 \text{ }^\circ\text{C}$), и затем проводили оптические измерения.

Таблица 1

Укладка датчиков в слоях стеклопластика

№ слоя стеклоткани	Укладка
1	+0/90°
Оптический датчик 1	Измерительный слой
2	+45/-45°
Оптический датчик 2	Измерительный слой
3	+0/90°
Оптический датчик 3	Измерительный слой
4	+0/90°
5	+45/-45°
6	+0/90°

Таблица 2

Механические свойства стеклопластика

№	Свойство	Значение показателя
1	Модуль упругости при изгибе, ГПа	21,7
2	Модуль упругости при растяжении, ГПа	20,6
3	Прочность при изгибе, МПа	397
4	Прочность при сдвиге, МПа	38,3
5	Плотность пластика, г/см^3	1,9
6	Объемная доля армирующих волокон, %	55

Результаты и обсуждение

Из рис. 1 видно, что сорбция паров воды изученным композитом имеет аномальный характер и не подчиняется закону Фика. Наличие максимума и ступени на кинетической кривой сорбции четко свидетельствует о структурных превращениях, связанных с протеканием релаксационных процессов, которые, в свою очередь, вызваны диффузионно-сорбционным проникновением и взаимодействием воды с полимером. Эти микроструктурные превращения связаны с релаксацией внутренних напряжений, имеющих на молекулярном и надмолекулярном уровне в исходном полимере и эволюционирующих в результате взаимодействия полимер – вода в ходе процессов диффузии и сорбции [1; 5].

Появление максимума на кривой сорбции связано с тем, что в условиях эксперимента ($T_{\text{эксп}} < T_{\text{стекл}}$) скорость диффузии выше скорости конфигурационных изменений в полимере. Со временем, в результате протекания релаксационных перестроек, приводящих к уплотнению структуры (релаксация свободного объема) часть сорбированных молекул воды высвобождается («отжимается»), и на кинетической кривой сорбции фиксируется максимум. Далее

в течение некоторого времени ($30 \leq t \leq 50$ сут.) образец находится в квазиравновесном состоянии и влагосодержание не меняется. При дальнейшем увеличении времени выдержки образца во влажной атмосфере ($t > 50$ сут.) вновь начинается сорбция паров воды, что свидетельствует о протекании релаксационных или химических гидролитических процессов, приводящих в данном случае к увеличению свободного объема и, соответственно, к увеличению количества сорбируемой воды.

Таким образом, аномальный характер сорбционной кривой однозначно указывает на наличие релаксационных перестроек, вызванных сорбцией воды и, соответственно, на изменение внутренних микроструктурных напряжений в материале в процессе сорбции воды.

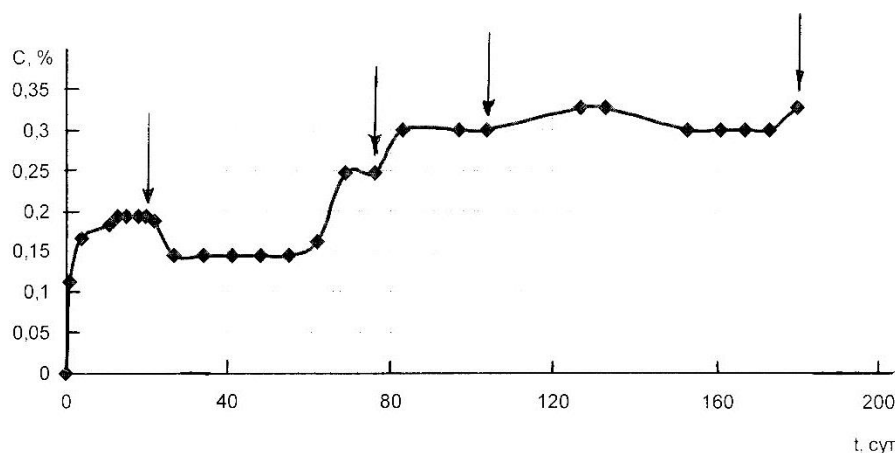


Рис. 1. Сорбция воды стеклопластиком:
стрелками показаны моменты измерения деформаций

Для количественной оценки изменения этих напряжений мы сделали попытку использовать оптоволоконные датчики, введенные в образец при его изготовлении, как это описано выше в методической части, и отслеживали деформации этих датчиков на разных этапах сорбции. Результаты измерения деформаций датчиков приведены в табл. 3 в соответствии с формулами из работ [8; 10].

Таблица 3

**Деформации датчиков (в % от паспортной длины)
в ходе влажностного старения стеклопластика**

Деформация от базы датчика, %	Время тепловлажностного старения, сут.				
	0	20	75	104	180
Датчик 1 (между слоями 1 и 2)	-0,034	-0,027	-0,051	-0,048	-0,108
Датчик 2 (между слоями 2 и 3)	-0,137	-0,124	-0,134	-0,130	-0,138
Датчик 3 (между слоями 3 и 4)	-0,098	-0,083	-0,094	-0,089	-0,104

Из данных табл. 3 можно видеть следующее:

1. Деформации датчиков во всех трех слоях отрицательны, т. е. они находятся под действием сжимающих напряжений как в исходном образце, так и в ходе тепловлажностного воздействия.

2. С удалением от поверхности деформация датчиков (величина сжимающего напряжения) в исходном образце изменяется немонотонно. Немонотонность сохраняется и в ходе тепловлажностного воздействия.

Сжимающий характер напряжений, действующих на датчик в образце, мы связываем с действием усадочных напряжений, возникающих в результате отверждения полимерной матрицы. Эти напряжения действуют как в плоскости прослойки связующего, так и в перпендикулярном направлении. График деформации приведен на рис. 2.

С увеличением времени тепловлажностного старения деформации датчиков (и соответственно напряжения) эволюционируют сложным образом. Это происходит, по-видимому, вследствие конкуренции релаксационных процессов, способных привести к снижению внутренних напряжений, и появления новых напряжений, обусловленных сорбцией воды в прослойке связующего, т. н. напряжений набухания или влажностных напряжений.

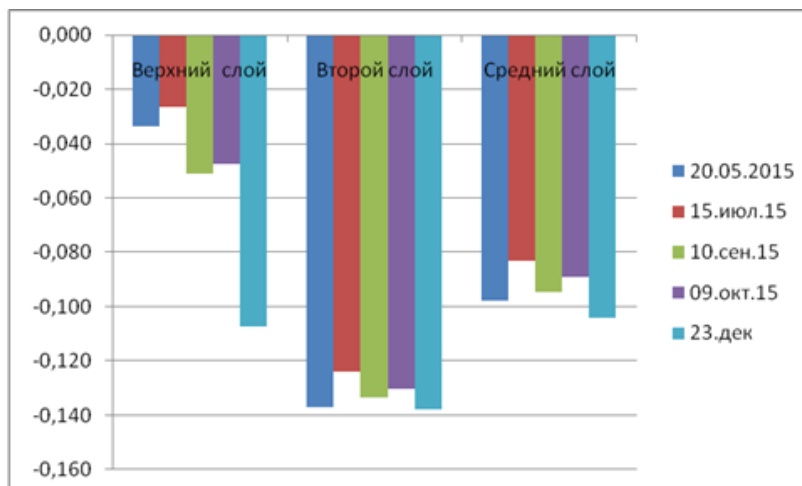


Рис. 2. Изменения микродеформации датчиков, расположенных в разных слоях композита со временем тепловлажностного старения

В наибольшей мере влияние влажностного воздействия на внутренние напряжения проявляется в области расположения первого датчика (между первым и вторым слоями ткани) (табл. 3).

На начальном этапе влажностного старения (сорбции паров H_2O) напряжения на всех трех датчиках уменьшаются (табл. 3), и это уменьшение наиболее выражено для области первого датчика.

Как было отмечено выше, каждый датчик в образце изначально находился под действием сжимающих усадочных напряжений. По мере развития сорбции возникают т. н. напряжения набухания, растягивающее действие которых противоположно действию усадочных напряжений. Поэтому наблюдаемое в эксперименте снижение деформации датчика можно связать со взаимным ослаблением имеющихся в образце микроструктурных напряжений, а точнее, их компонент, действующих вдоль оси датчика.

Далее с увеличением времени тепловлажностного воздействия (соответственно ростом влагосодержания) деформации сжатия датчиков вновь увеличиваются (табл. 3), что указывает на рост напряжений в области расположения датчика.

Причины такого немонотонного изменения внутренних микронапряжений (при сохранении их знака) неясны и требуют дальнейшего более детального изучения. Здесь же, исходя из имеющихся данных, можно предложить следующее объяснение наблюдаемой немонотонности. Сорбция воды в свободном образце полимера приводит к его набуханию (микроувеличению размеров вдоль осей образца) и, соответственно, к появлению в нем растягивающих влажностных напряжений и деформаций. Прослойка связующего между слоями ткани в композите, в которой находится датчик, в отличие от свободного образца находится в несвободном состоянии. Развитие в ней влажностных растягивающих деформаций вдоль оси датчика в некоторой мере возможно только на начальном этапе сорбции. На поздних этапах влажностного воздействия возможности для развития растягивающих влажностных деформаций вдоль оси датчика будут исчерпаны из-за ограничивающего влияния выше- и нижерасположенных слоев ткани и сил адгезионного взаимодействия полимер – волокно.

На позднем этапе тепловлажностного старения ($t > t_{\max} > 75$ сут.) рост концентрации влаги в образце будет способен приводить к увеличению растягивающих напряжений набу-

хания в плоскости, перпендикулярной плоскости слоя и оси датчика. В этой плоскости ограничивающее действие твердых поверхностей будет проявляться в меньшей степени, чем в направлении оси датчика. Растягивающие влажностные напряжения в прослойке полимера, действующие перпендикулярно к оси датчика сопровождаются появлением поперечных напряжений и деформаций сжатия, направленных вдоль оси датчика. Это может вновь приводить к увеличению деформации сжатия датчика на поздней стадии сорбции, что и фиксируется в эксперименте (табл. 3).

Выводы

Показана возможность фиксации влажностных деформаций в стеклопластике квазиизотропной структуры в течение длительного времени тепловлажностного воздействия.

Использование мультиаксиальной ткани имитирует намотку. Показана работоспособность системы измерения и зафиксированы влажностные деформации набухания в разных слоях стеклопластика. Таким образом, с помощью встроенных датчиков можно изучить и прогнозировать поведение стеклопластиковых труб.

Показано, что связующее ЭД-И слабо подвержено деформациям при влагопоглощении.

Найдено, что сорбция влаги в композите происходит по релаксационному механизму и сопровождается немонотонным изменением деформации набухания в разных слоях эпоксидного стеклопластика.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 16-08-00445.

Литература

1. Бэр Э. Конструкционные свойства пластмасс: физико-химические основы применения / пер. с англ. М. : Химия, 1967. С. 231–235.
2. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток : Дальнаука, 1999. С. 115–118.
3. Михеев П. В., Артемьев А. В., Лазарев В. А., Пнев А. Б., Нелюб В. А. Опыт создания системы встроенного контроля состояния конструкции на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков // Сб. докл. Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов ТЕСТМАТ – 2013. М. : Всерос. науч.-исслед. ин-т авиацион. материалов, 2013. С. 28.
4. Сарбаев Б. С., Смердов А. А., Таирова Л. П., Селезнев В. А., Соколов С. В., Буймистряк Г. Я., Изотов В. И., Рогов А. М. Исследование деформированного состояния конструкций из композиционных материалов с помощью волоконно-оптических датчиков // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Номер SP. С. 39–51.
5. Современные физические методы исследования полимеров / под ред. Г. Л. Слонимского. М. : Химия, 1982. С. 198–208.
6. Шишкин В. В., Чурин А. Е., Харенко Д. С., Шелемба И. С. Система мониторинга несущих конструкций футбольного манежа на основе волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. 2013. № 6 (110). С. 22–23.
7. Cusano A., Cutolo A., Albert J. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation. Editors: Bentham Science Publishers, 2010. P. 35–52.
8. Kersey A. D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology // Optical fiber technology. 1996. V. 2. № 3. P. 291–317.
9. Mathijsen D. Structural health monitoring: composite skins are getting a nervous system // Reinforced Plastics. 2015. V.59. № 3. 2015. P. 139–142.
10. Othonos A., Kalli K. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. London : Artech House Inc., 1999. 422 p.
11. Shishkin V. V., Churin A. E., Kharenko D. S., Zheleznova M. A., Shelemba I. S. Structural health monitoring system of soccer arena based on optical sensors // Proc. SPIE 9157, 23rd. International Conference on Optical Fibre Sensors, 9157D3 (2 June 2014).

УДК 693.5.057:624.94.012.4:620.1

*Дорф В. А., Красновский Р. О., Кроль И. С., Капустин Д. Е.
Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Krol I. S., Kapustin D. E.*

СБОРНО-МОНОЛИТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗДАНИЙ С НЕСЪЕМНОЙ СТАЛЕФИБРОБЕТОННОЙ ОПАЛУБКой

PREFABRICATED – CAST-IN-PLACE TECHNOLOGY OF BUILDING CONSTRUCTION USING NONDETACHABLE STEEL-FIBRE-CONCRETE FORM

В статье описана сборно-монолитная технология строительства промышленных и гражданских зданий и сооружений с использованием несъемной несущей сталефибробетонной опалубки. Представлены результаты работы АО «Институт „Оргэнергострой“» в области исследований физико-механических характеристик сталефибробетона и опытно-конструкторских разработок армоопалубочных блоков с несъемной сталефибробетонной опалубкой, позволяющих значительно повысить качество и сократить сроки строительства.

Ключевые слова: сталефибробетон, несъемная опалубка, сборно-монолитный метод строительства.

Актуальной проблемой строительной отрасли является совершенствование архитектурного облика города, что, в первую очередь, связано с возведением зданий переменной этажности и с различными архитектурно-планировочными решениями. В то же время при массовой застройке, как правило, предпочтение отдается крупнопанельной технологии строительства, одним из основных достоинств которой является скорость возведения зданий. В первую очередь она достигается за счет практически параллельного ведения работ по изготовлению панелей стен и перекрытий и их монтажу без устройства подмостей, установки и разборки опалубки, как при монолитном строительстве.

В настоящее время в России мощности домостроительных предприятий используются на 26–30 %, а доля крупнопанельного жилья составляет примерно 18 % [7]. К числу причин, ограничивающих крупнопанельное строительство, можно отнести недостаточную гибкость принимаемых архитектурных объемно-планировочных решений и недостаточную надежность межпанельных стыков.

Принимаемые при проектировании зданий из сборного железобетона архитектурные объемно-планировочные решения в большинстве случаев определяются парком имеющихся на предприятиях стройиндустрии достаточно дорогостоящих стальных форм с ограниченной номенклатурой.

Проблемы надежности межпанельных стыков элементов строительных конструкций с точки зрения их прочности при аварийных ситуациях и в отношении их плотности при эксплуатации могут быть решены при использовании технологии сборно-монолитного строительства, которая позволяет возводить здания, близкие по конструктивному решению к крупнопанельному строительству, что одновременно дает возможность устранять присущие им недостатки [4]. При этом армоопалубочные блоки внешних и внутренних стен и перекрытий, так же, как и при крупнопанельном строительстве, изготавливают на предприятиях стройиндустрии. Листы опалубки изготавливают без применения стальных форм, что позволяет варьировать их размеры. На объекте выполняют монтаж сборных элементов с последующей укладкой в них монолитного бетона. При этом решается вопрос как прочности, так и плотности стыков.

Такой метод возведения зданий и сооружений в последнее время разрабатывается АО «Институт „Оргэнергострой“» для энергетического строительства и был детально отработан

на примере фрагмента помещения обстройки реакторного отделения АЭС (рис. 1). Учитывая имеющийся опыт и результаты проведенных экспериментально-теоретических исследований, его целесообразно распространить и на область гражданского и промышленного строительства.



Рис. 1. Фрагмент помещения обстройки реакторного отделения АЭС

Армоопалубочные блоки представляют собой жесткую конструкцию, состоящую из металлического каркаса с жестко прикрепленными к нему листами несъемной опалубки. Они соединяются между собой различными видами стыков, например, бессварочными петлевыми или сварными.

Как показали результаты исследований, в качестве несъемной опалубки наиболее эффективно применять сталефибробетонные листы толщиной 20–30 мм, обладающие даже при столь малых толщинах достаточной прочностью, обеспечивающей жесткость объемного элемента [6; 8].

Сталефибробетон для опалубки изготавливают с использованием в качестве матрицы высокопрочной самоуплотняющейся цементно-песчаной смеси, дисперсно армированной стальными волокнами.

В мировой практике сталефибробетоны, как правило, применяют при изготовлении относительно массивных конструкций, таких, например, как дорожные плиты, плиты фундаментов, свайные ростверки, элементы тоннельной обделки. При этом содержание фибры, как правило, варьируют в пределах от 0,5 до 1,5 % по объему [8], что обеспечивает получение трещиностойких сталефибробетонов, обладающих требуемой для этого типа конструкций прочностью.

Как показали предварительные расчеты и испытания, для изготовления несъемной опалубки требуется увеличение объемного содержания фибры в сталефибробетоне до 1,5–3,0 %, а для обеспечения надежной заделки в матрице волокон стальной фибры прочность матрицы должна быть не менее соответствующей классу В80. Сталефибробетон такого состава обладает улучшенными, по сравнению с традиционным тяжелым бетоном, прочностными, деформационными и эксплуатационными характеристиками. Так, например, прочность сталефибробетона достигает на сжатие 120 МПа, на растяжение – 12 МПа, на растяжение при изгибе – 30 МПа, при модуле упругости – до 60 000 МПа, морозостойкости – F1000 и более, водонепроницаемости – W20 и более, ударной вязкости – 65 кДж/м² [5]. Приведенные показатели способствуют значительному повышению прочности и долговечности конструкций с несъемной сталефибробетонной опалубкой в условиях агрессивных климатических воздействий.

За счет обеспечения достаточной прочности контактной поверхности между сталефибробетонной опалубкой и монолитным бетоном [2] опалубка способна эффективно воспринимать сжимающие и растягивающие усилия без нарушения контактной поверхности с

бетоном в условиях статического, динамического и многоциклового нагружения. Способность опалубки воспринимать растягивающие усилия позволяет частично или полностью отказаться от традиционного стержневого армирования.

За счет разработанной технологии изготовления сталефибробетонных листов опалубки с использованием реконфигурируемой линии удалось значительно сократить стоимость выпускаемой продукции, а также обеспечить широкую номенклатуру выпускаемых изделий [1].

Разработанный АО «Институт „Оргэнергострой“» состав сталефибробетона на основе высокопрочной цементно-песчаной матрицы с использованием суперпластифицирующих добавок позволяет отказаться от применения щебня и песка с высоким модулем крупности, обеспечивая получение высокоподвижной сталефибробетонной смеси с расплывом конуса 70 см и более, не требующей виброуплотнения. При этом при температуре термообработки не выше 40 °С распалубку изделий можно проводить уже через четыре часа после бетонирования. Выпускаемая продукция обладает высоким качеством лицевой поверхности, позволяющей нанести различные защитные и декоративные покрытия без предварительной подготовки.

Гражданское строительство, в отличие от энергетического, не требует мощного армирования. Как показали оценочные расчеты, возможен полный отказ от стержневой арматуры при строительстве жилых домов до 25 этажей [4]. Применение данной технологии в гражданском строительстве обеспечивает сокращение срока возведения зданий и широкую вариацию архитектурно-планировочных решений, а также высокое качество строительно-монтажных работ.

Для жилых зданий армоопалубочный блок стен (рис. 2) состоит из двух панелей опалубки с различной толщиной. При этом внутренней слой, толщиной 25–30 мм, выполняет функцию несущего элемента (позиция 1), а внешней, толщиной 5–10 мм, обеспечивает защиту от внешних атмосферных воздействий и эстетические функции (позиция 2). Оконные и дверные проемы ограждаются доборными элементами (позиция 3). Листы опалубки объединяются в блок за счет крепежных шпилек (позиция 4). По контуру листов проходят металлические уголки (позиция 5), обеспечивающие возможность стыковки смежных армоопалубочных блоков и выполняющие функции опорных площадок для установки панелей перекрытия.

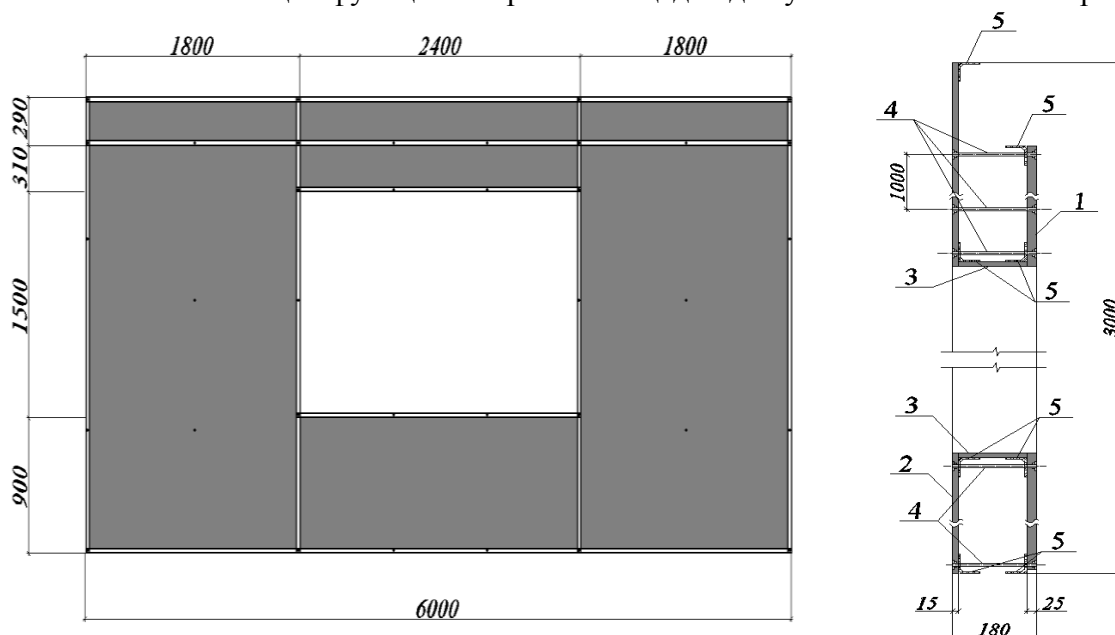


Рис. 2. Пример стенового армоопалубочного блока жилого здания

В установленные в проектное положение армоопалубочные блоки укладывают монолитный бетон, причем для жилищного строительства целесообразно применение легких бетонов, выполняющих функции теплоизоляционного и шумопоглощающего материала.

Благодаря близким акустическим характеристикам сталефибробетона опалубки и монолитного бетона контроль качества его укладки можно осуществлять с использованием стандартизованных средств неразрушающего ультразвукового контроля [3].

Для обеспечения в жилых зданиях возможности свободной планировки целесообразно применять несущий каркас в виде колонн и безбалочных перекрытий.

Безбалочные многопустотные перекрытия позволяют снизить их собственный вес и повысить несущую способность. В гражданских зданиях они могут быть выполнены без применения рабочей и конструктивной стержневой арматуры. Многопустотная панель перекрытия состоит из верхнего и нижнего сталефибробетонных листов и стенок, геометрические размеры которых подбирают по расчету на восприятие, соответственно, момента и поперечной силы (рис. 3). Их объединение в единую конструкцию можно осуществлять различными методами, например, путем омоноличивания или с помощью сомонарезных анкеров типа Hilti, обеспечивающих достаточную прочность при длительном и многоцикловом нагружении. Описанные предположения экспериментально подтверждены АО «Институт „Оргэнергострой“».

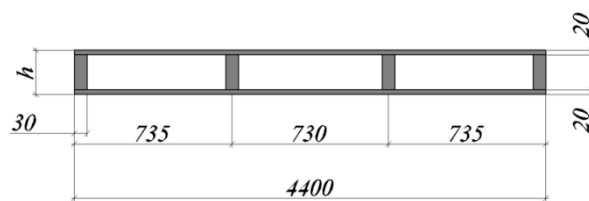


Рис. 3. Пример армоопалубочного блока перекрытия

Безбалочное перекрытие (рис. 4, 5) в зданиях с рамным несущим каркасом можно выполнять путем раскладки на листах несъемной сталефибробетонной опалубки арматурных сеток (при необходимости по расчету) и пустотообразователей с последующей укладкой монолитного бетона.

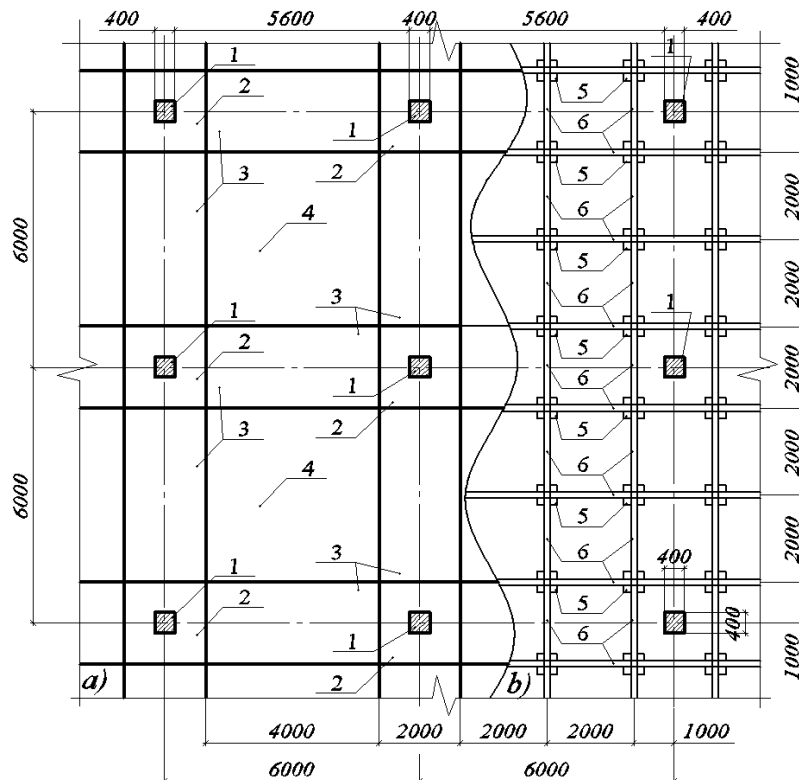


Рис. 4. Пример фрагмента безбалочного перекрытия:

- а) раскладка опалубки, б) схема расстановки стоек и балок инвентарной опалубки; 1 – колонна; 2 – опалубочный лист капители; 3 – опалубочный лист колонной полосы; 4 – лист опалубки; 5 – инвентарные стойки; 6 – инвентарные балки

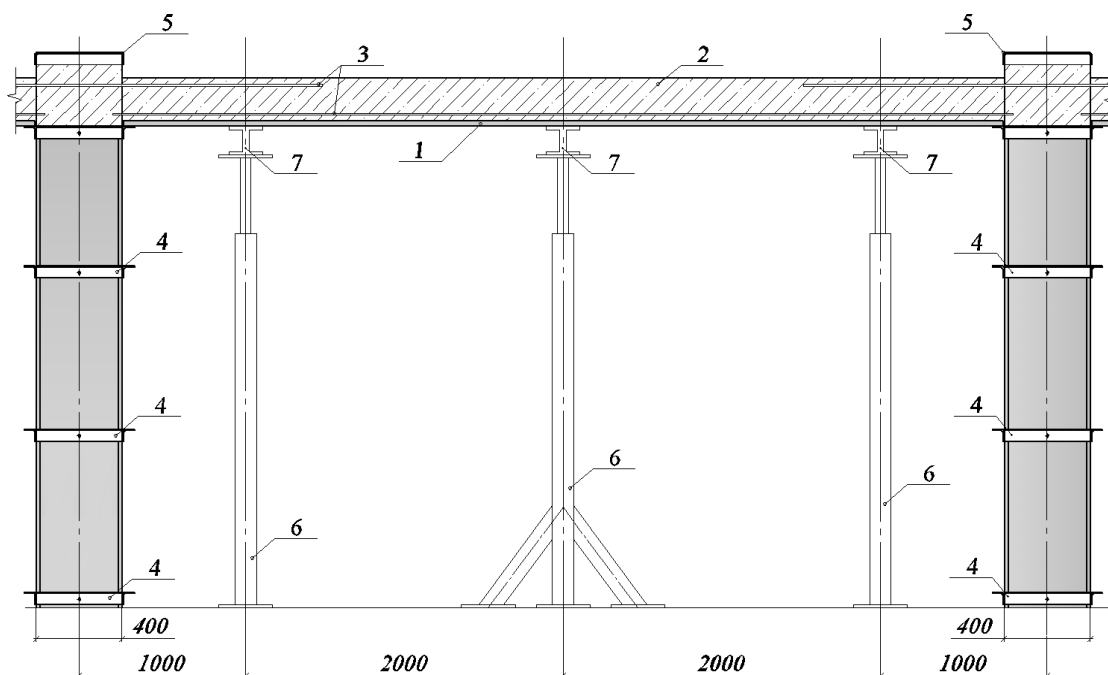


Рис. 5. Схема монтажа здания с несущими колоннами и безбалочным перекрытием:
1 – лист сталефибробетонной опалубки; 2 – монолитный бетон; 3 – арматурная сетка;
4 – съемный бандаж; 5 – оголовок колонны; 6 – инвентарные стойки опалубки;
7 – инвентарные балки опалубки

Армоблоки колонн с несущей сталефибробетонной опалубкой без стержневой арматуры можно применять в гражданских и промышленных зданиях, где расчетный процент армирования, как правило, не превышает 1 % (рис. 6).

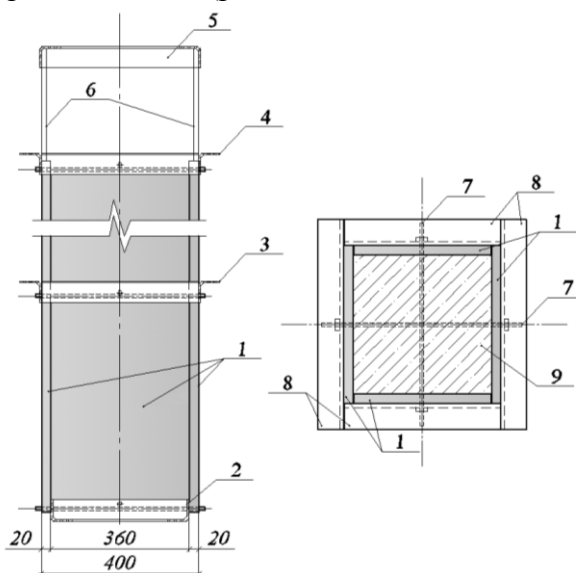


Рис. 6. Армоблок колонны с несущей несъемной сталефибробетонной опалубкой:
1 – сталефибробетонная опалубка; 2 – опорная площадка колонны; 3 – съемный бандаж;
4 – опорная площадка перекрытия; 5 – оголовок колонны; 6 – стойки оголовка;
7 – крепежная шпилька; 8 – металлический профиль; 9 – монолитный бетон

Изготовление армоблоков с несъемной сталефибробетонной опалубкой можно осуществлять на предприятиях стройиндустрии (заводах сборного железобетона) после относительно небольшой их модернизации. При этом на бетоносмесительном узле дополнительно

устанавливают питатель для подачи фибры в бетоносмеситель. В формовочных цехах изготавливают листы несъемной опалубки. При этом арматурный цех существенно уменьшается, а на высвободившихся площадях проводится сборка армоблоков.

Применение армоблоков с несъемной сталефибробетонной опалубкой позволяет обеспечить скорость возведения зданий, соответствующую скорости крупнопанельного домостроения, а также обеспечить долговечность строительных конструкций в климатических условиях северных регионов России, получая значительный экономический эффект за счет:

- повышения прочности и плотности узлов соединения армоблоков и сокращая трудозатраты на ремонтные работы при эксплуатации зданий;
- отказа от стальных форм при выпуске армоопалубочных блоков с широкой номенклатурой типоразмеров и исключения затрат на ремонт и обновление форм;
- использования сталефибробетонной опалубки в качестве несущего элемента конструкции, что дает возможность исключить или существенно уменьшить расход стержневой арматуры и затраты на изготовление армокаркасов;
- высокого качества лицевой поверхности сталефибробетонной опалубки, уменьшающего расходы на подготовку лицевых поверхностей изделий к окраске.

Высокие прочностные и эксплуатационные характеристики сталефибробетона позволяет применять его также в качестве фундаментной плиты и/или свайного ростверка, а также в качестве кровельного покрытия.

Литература

1. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е. Заводское изготовление элементов крупнопанельных сборно-монолитных конструкций энергетического строительства // ЖБИ и конструкции. 2014. № 1. С. 50–53.
2. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Нуриев Р. Р. Несъемная сталефибробетонная опалубка как несущий элемент железобетонных конструкций // Север России: наука, образование, культура. Сургут. № 2 (32), Том II. С. 148–154.
3. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Нуриев Р. Р. Способ контроля укладки бетонной смеси. Патент на изобретение №2572103.
4. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Рогачев К. В. Перспективы развития одного из направлений сборно-монолитного строительства при возведении жилых и общественных зданий // Архитектура и строительство России. 2013. № 12. С.10–15.
5. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Рогачев К. В., Денисов А. В., Горбунов И. А. Влияние типа и содержания стальной фибры на прочностные характеристики сталефибробетонов с цементно-песчаной матрицей // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : сб. тр III всерос. (II междунар.) конф. по бетону и железобетону. Москва, 2014. Том III. С. 257–266.
6. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М. : АСВ, 2011. 637 с.
7. Сапачева Л. В., Юмашева Е. И. Развитие крупнопанельного домостроения // Строительные материалы : III междунар. науч.-практич. конф. 2013. № 7. С. 3–7.
8. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete // Concrete Society Technical Report 63. 2007. P. 76.

УДК 721.011:551.5

Ефремова И. И., Жиренков А. Н.
Efremova I. I., Zhirenkov A. N.

АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ ЭКСКЛЮЗИВНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ АДАПТАЦИЯ НА СЕВЕРЕ РОССИИ

ARCHITECTURAL SOLUTIONS OF CONSTRUCTIONS AND THEIR ADAPTATION IN THE NORTH OF RUSSIA

В статье рассматриваются современные архитектурные решения строений, имеющих нетрадиционный облик, позволяющий гармонично соответствовать ландшафту окружающей среды. Подобные строительные решения являются признаком авангарда и используются как при новом строительстве, так и при реконструкции сооружений. Практика подобных решений применяется во всем мире, однако в условиях северных территорий РФ, при повышенном ветровом воздействии, дополнительно необходим учет их ориентации на местности с целью снижения ветровых нагрузок, а также требуется экспериментальная апробация предлагаемого к строительству решения.

Ключевые слова: архитектурные решения, нетрадиционный облик, Север РФ, ветровые нагрузки.

Проблемы урбанизации городов мира, в частности и города Сургута, вызваны как стремлением к совершенству – авангарду строительных решений, так и другими факторами, влияющими на комфортность жизнеобеспечения территории. Например, повальная автомобилизация застройки приводит к ограничению свободного пространства жителей, на их долю остается только 20 %...30 % уличного и дворового пространства. При неудачном расположении и ориентации жилых и общественных зданий, особенно высотных, на застроенной территории по отношению к господствующим ветрам и солнечной радиации, качество жизни проживающих резко ухудшается: уровень аэрации застройки становится низким. Поэтому при планировании строительства застройки необходим учет требований архитектурно-строительной аэродинамики, изучающей движение воздушных потоков, для снижения негативного эффекта, вызванного этими воздействиями. Например, здания, имеющие обтекаемую форму либо имеющие пространство для беспрепятственного движения воздуха, изменяют характер течения воздушных потоков, способствуя улучшению условий нахождения и проживания жителей в этой зоне. Учет влияния ветровых воздействий на сооружения существенно важен, особенно «в районах с экстремальными условиями: Сибирь, Дальний Восток... Для создания комфорта, труда, быта в районах сильных ветров при действии на здания больших величин скоростного напора и т. д.» [5; 6]. К примеру, в г. Сургуте (II район) нормативное давление ветра составляет $w_0 = 0,30$ кПа, а в г. Салехарде (IV район) $w_0 = 0,48$ кПа, далее к Северу ветровое давление дополнительно возрастает. На побережье Ямала – до $w_0 = 0,85$ кПа (VII-й район). Конструктивные решения строительных сооружений, спроектированных с учетом изменения ветровых давлений, представлены на рис. 1, 2, 3, 4.



Рис. 1. а – «Ворота Востока» (74 эт.); б – Деловой центр «Москва-Сити»;
в – Отель «Шератон Хучжоу»



Рис. 2. Новый и Старый Сургут



Рис. 3. Собор, Испания Церковь, Лондон Танцующий дом, Чехия (Реконструкция)



Рис. 4. Мемориал «Родина Мать зовет» на Мамаевом кургане в Волгограде (1967 г.)

Воплощение стремления к гармоничному учету взаимосвязи среды пребывания людей и формы возводимых сооружений должно быть выполнено с учетом климатических условий местной среды. При этом, особенно важно учитывать возможный эффект внешнего ветрового воздействия на сооружаемое строение. В случае его недооценки возможно «обрушение мостов, высоких зданий, опор электропередач, радиомачт» [4]. Однако в современных условиях тенденция строительства высоких или очень протяженных сооружений только нарастает, и случаи отказов и аварий возводимых сооружений сохраняются [1]. Местные условия строительства в нормативных источниках обычно отражены недостаточно ввиду их многообразия, особенно это относится к характеру ветрового воздействия. На ветровые нагрузки, помимо влияния облучения Солнцем земной поверхности и вращения Земли, одновременно влияют и другие, местные факторы, такие как: наличие большой водной поверхности (85 % территории Югры – болота), лесных массивов, городской застройки, конструктивные формы сооружения (оцениваемые аэродинамическими характеристиками) и другое [2; 3]. Например, так как г. Сургут расположен на реке Обь, то следует учитывать, что «на берегах больших рек... скорость ветра повышается на 4...5 м/сек, это объясняется гладью

водной поверхности [4]. На основе учета местных специфических данных в различных географических районах можно предусмотреть оптимальные варианты городских застроек и микрорайонов с учетом изменения скорости ветра как по величине, так и по направлению, анализируя их исходя из значений определяемых на основе розы ветров, принятой при проектировании в строительстве. При расчете на прочность и деформативность высоких сооружений ветровая нагрузка является основной, следовательно, в прочностных расчетах должны учитываться ее особенности, получаемые по данным экспериментальных исследований моделей и натурным испытаниям сооружений. В основных исходных данных предусматриваются: значения аэродинамических сил и моментов, частот и декрементов собственных колебаний конструкций, величина амплитуд автоколебаний сооружений и динамических напряжений в конструкциях. Ветер рассматривается в расчетах как динамическая нагрузка, так как скорость его все время меняется. Величину скорости ветра определяют с помощью стационарных приборов (флюгера, анеометров и др.), а в свободной атмосфере на больших высотах – с помощью радиозондов, шаропилотных наблюдений и аэростатов. Реакция сооружения на действия ветрового давления различна: *жесткие* конструктивные решения воспринимают ее как статическую, реакция *гибких* конструктивных решений должна определяться с учетом частоты свободных (собственных) колебаний, рассматривая движение воздуха в атмосфере как турбулентное. Дополнительно при объективной оценке ветрового воздействия должны быть учтены сведения его параметров по направлению, скорости, порывистости, продолжительности, частоты появления ветра различной скорости, с учетом местных метеорологических условий должны быть и сведения по температуре, влажности, атмосферным осадкам. История изучения эффекта ветрового воздействия на работоспособность сооружений началась с Леонардо да Винчи (1500 г.). Характеристики профиля ветра, определяемые по интенсивности распределения по вертикали, могут быть определены по различным формулам. Наиболее распространена степенная зависимость скорости ветра с высотой: $V_z = V_\phi(z/z_0)^n$ и логарифмическая $V_z = V_\phi (\ln z/z_0)/(\ln z_\phi/z_0)$. С увеличением высоты, влияние сил трения воздуха о поверхность земли снижается, поэтому движение воздуха становится равномерным, ветер дует по изобаре. Изобары циклонов и антициклонов имеют замкнутый вид. Градиентное движение воздушных масс по замкнутым линиям в виде эллипсов и окружностей дополнительно приводит к проявлению центробежной силы, поэтому при действии циклона, вызывающего вихрь, характерна большая порывистость и сильные осадки. Циклоны (тайфуны) могут привести к ураганам со скоростью ветра более 50 м/сек. Они причиняют колоссальные разрушения и уносят сотни, а иногда и тысячи человеческих жизней. В прибрежных зонах морей и океанов при высокой скорости ветра действуют вихри-смерчи, на суше – тромбы со скоростью около 100 м/сек. В этих зонах восходящие и нисходящие токи воздуха могут вызвать вихрь с горизонтальной осью – шквал, когда ветер усиливается от слабого до ураганного при скорости 30 м/сек и больше. Негативные разрушительные последствия шквала значительны. Например, в 1937 г. шквал в Москве, продолжавшийся 3–4 мин причинил огромные разрушения. В зависимости от рельефа местности и ее расположения местные ветра имеют названия: «бор» – долинный и «фен» – горный. Известна «Новороссийская борда», она хорошо изучена: «скорость ветра в ней достигает 50 м/сек., а в порывах – и более» [4]. Учет силы ветрового воздействия в настоящее время используется в практических целях, например, в альтернативных источниках энергии – в ветровых энергетических установках (ВЭУ). Они выпускаются в 2 видах конструктивного решения: горизонтальной и вертикальной осью ведущего вала – ротора. ВЭУ устанавливаются на морских побережьях, на возвышенностях и в горах. Анализ влияния ветрового воздействия на работоспособность эксклюзивных сооружений, спроектированных по нормативным документам, действующим в период их проектирования и строительства, выявил необходимость их дальнейшего совершенствования с целью обеспечения требуемой надежности и работоспособности эксплуатируемых объектов. Данные по ветровым воздействиям могут быть получены по действующим нормативным документам и проведению мониторинга по натурным замерам.

Примером объекта, при проектировании и строительстве которого были проведены дополнительные исследования, о которых шла речь выше, является меч статуи мемориала «Родина Мать зовет» (рис. 4). Меч был подвергнут испытаниям в аэродинамической трубе (АДТ) и на основе численного моделирования [1]. Такие подходы были реализованы при исследовании работы мемориала, выполненного по проекту Евгения Вучетича с соавторами, инженерной группой руководил Н. В. Никитин, он же спроектировал и Останкинскую телевизионную башню (рис. 4). Результаты многократно повторяющихся исследований выявили некоторые отклонения реальных данных, полученных при эксплуатации монумента от планируемых проектных решений. Выполненные изменения начального конструктивного решения показали необходимость совершенствования памятника с целью снижения парусности Меча, то есть сильного раскачивания при действии ветровых нагрузок, которое вызывало избыточное напряжение в месте крепления руки, держащей Меч [1]. Совершенствование начального конструктивного решения статуи, по исследованиям, направленным на отыскание эффективных способов снижения колебаний Меча, происходило многократно при участии ЦАГИ, ЦНИИПСК, ВОИ НИС Гидропроекта. Первоначально натурные исследования стального Меча были выполнены в 1966/1967 гг., в результате меч был усилен с помощью канатной затяжки, однако это не решило проблемы образования и роста усталостных трещин в Мече, поэтому дополнительно в мае 1969 г. Меч был оборудован сквозными каналами кругового поперечного сечения. Затем, в 1970 г., для гашения колебаний в Мече был установлен динамический гаситель. Одновременно проводились и исследования моделей Меча новой конструкции в аэродинамических трубах, полученные данные сравнивались с результатами колебаний натурального Меча прежней конструкции. В 1972 г. Меч демонтировали, и в 1973 г. смонтировали Меч новой конструкции. В 2010 г. вновь начались работы по обеспечению безопасности статуи.

Инженерные характеристики статуи «Родина Мать зовет»

1. Скульптура выполнена на основе предварительно напряженного железобетона – 5 500 тонн; металлические конструкции – 2 400 т (без учета расхода материалов на устройство основания).
2. Высота скульптуры – 85–87 м; фундамент имеет глубину – 16 м; высота женской фигуры – 52 м; длина руки – 20 м.
3. Длина меча – 33 м; вес – 14 т.

Вывод

Для исключения аварий и разрушений сооружаемых строительных объектов, протяженных, высотных, эксклюзивных и других, необходим учет не только нормативных данных по скоростям ветра и давлению в районах строительства, но и дополнительных факторов, влияющих на интенсивность изменения давления ветра в зоне строительства, таких как: ландшафт местности, наличие водных ресурсов, метеорологические факторы и архитектурно-строительная аэродинамика.

Литература

1. Беспозванная И. М., Соколов А. Г., Фомин Г. М. Воздействие ветра на высокие сплошностенчатые сооружения. М. : Стройиздат, 1976. 185 с.
2. Мизун И. Г. Космос и погода. М.: Наука, 1986. 144 с. Сер. :Человек и окружающая среда.
3. Ретгер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М. : Стройиздат, 1984. 294 с.
4. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. М. : Стройиздат, 1972. 103 с.
5. СНиП 23-01-99 Строительная климатология. Госстрой России ; ГУП ЦПП, 2000.
6. СП 20.13330. 2011. Нагрузки и воздействия : актуализир. редакция СНиП 2.0107-85*.

УДК 691:699.8:539.8

Жиренков А. А.
Zhirenkov A. A.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕПЛО- И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИХ СЕВЕРА РОССИИ

BASIC REQUIREMENTS FOR PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTION THERMOINSULATION AND WATERPROOF MATERIALS FOR THEIR USE IN THE NORTH OF RUSSIA

В данной работе исследуются и приводятся основные характеристики современных тепло- и гидроизоляционных материалов, которые в настоящее время имеют самое широкое распространение в строительстве. Рассматриваются системы вентфасадов, системы гидроизоляции фундаментов.

Ключевые слова: современные тепло- и гидроизоляционные материалы, вентфасады, гидроизоляция фундаментов.

Округ ХМАО – Югра находится в суровых климатических условиях. Здесь происходят большие перепады температуры наружного воздуха, а также значительное ветровое давление на строительные конструкции (согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия»). В этих условиях системы утепления жилых зданий приходят в полную негодность (рис. 1). Системы гидроизоляции строительных конструкций (кровля здания) приходится менять раз в несколько лет (рис. 2).

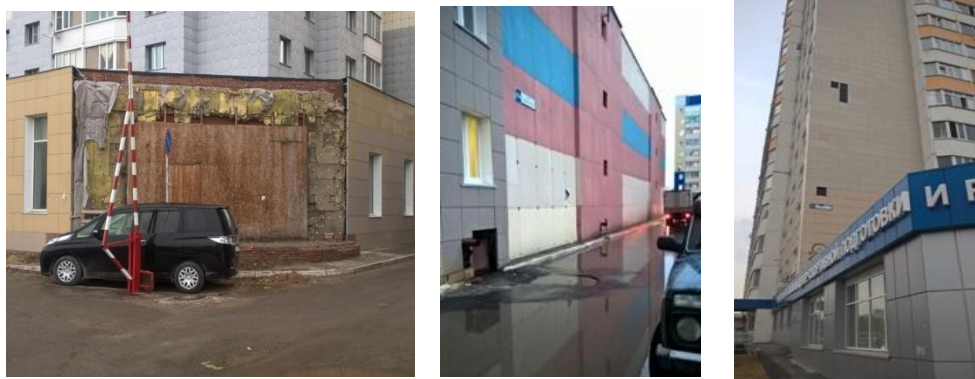


Рис. 1. Повреждения вентфасадов жилых зданий

В настоящее время в действующей нормативной документации: СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», СП 131.13330.2012 «Строительная климатология», СанПиН 2.2.3.1384-03 «Гигиенические требования к организации строительного производства и строительных работ», Федеральный Закон от 22.07.08. № 123-ФЗ (в ред. 22.07.12) «Технический регламент о требования пожарной безопасности», ГОСТ 9573-2012 «Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные. Технические условия», СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» – по сравнению с предшествующим периодом времени, ужесточаются требования к строительным тепло- и гидроизоляционным материалам. Это требования к показателю теплопроводности, паропроницаемости, огнестойкости, механической прочности и долговечности, химической стойкости, водонепроницаемости.

Кроме этого, на рынке существует жесткая конкуренция этих материалов, что вынуждает компании производителей постоянно улучшать качество своей продукции. Сравнительная характеристика физико-механических свойств современных теплоизоляционных материалов (ГОСТ 9573-2012) в сравнении с ранее использованными материалами (ГОСТ 9573-96) приведена в табл. 1.



Рис. 2. Повреждения рулонной кровли

Таблица 1

**Сравнительная характеристика физико-механических свойств
теплоизоляционных материалов**

Физико-математические свойства		Единицы измерения	Современные тепл. материалы			П-75	
Технические условия			ТУ 5762-010-74182181-2012			ГОСТ 9573-96	
Сжимаемость, не более		%	30	30	10	20	
Горючесть		степень	НГ	НГ	НГ	НГ	
Теплопроводность	λ_{10}	Вт/м · С	0,036	0,033	0,034	0,047	
	λ_{25}		0,038	0,037	0,036	0,077	
	λ_A		0,039	0,039	0,038	–	
	λ_B		0,041	0,041	0,039	–	
Паропроницаемость		мг/(м·ч·Па)	0,3	0,3	0,3	–	
Влажность по массе, не более		%	0,5	0,5	0,5	1	
Водопоглощение по объему, не более		%	1,5	1,5	1,5	–	
Содержание органических веществ, не более		%	2,5	2,5	2,5	3	
Плотность		кг/м ³	30–35	37–42	45	до 75	
						П-125	П-175
Предел прочности при растяжении, не менее		кПа	5	6	8	–	–
Горючесть		степень	НГ	НГ	НГ	НГ(Г1)	НГ(Г1)
Теплопроводность	λ_{10}	Вт/м · С	0,033	0,035	0,034	0,049	0,052
	λ_{25}		0,036	0,036	0,037	0,072	0,070
	λ_A		0,037	0,037	0,044	–	–
	λ_B		0,038	0,039	0,047	–	–
Сжимаемость, не более		%	2	2	2	12	4
Прочность на сжатие при 10 % деформации, не менее		кПа	10	12	15	–	–
Паропроницаемость, не менее		мг/(м·ч·Па)	0,3	0,3	0,3	–	–
Влажность по массе, не более		%	0,5	0,5	0,5	1	1
Водопоглощение по объему, не более		%	1,5	1,5	1,5	–	–
Содержание органических веществ, не более		%	3	3	3	4	5
Плотность		кг/м ³	72–88	81–99	90–110	До 125	До 175

Экономический эффект от использования современных утеплителей и дополнительного утепления дома приведен на рис. 3 с учетом роста тарифов на 15 %. Срок окупаемости – порядка 10 лет.

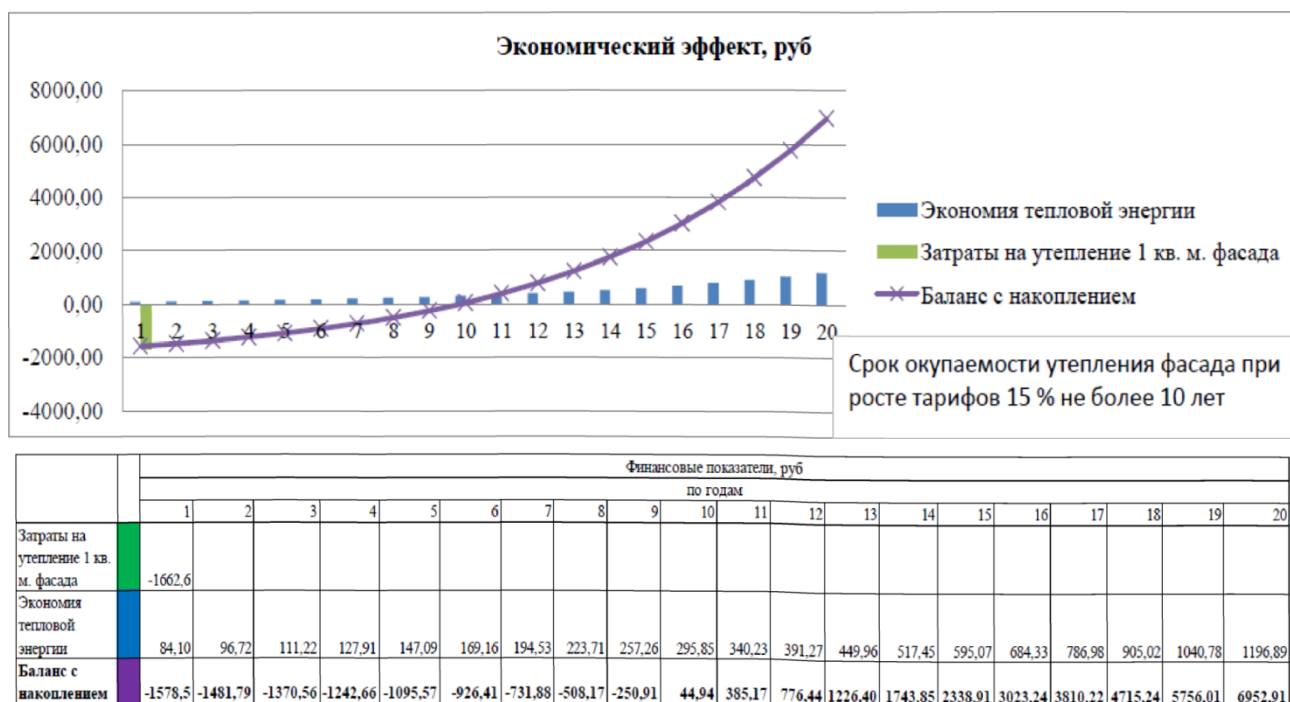


Рис. 3. Расчет экономической эффективности замены утеплителя

В этой связи необходимо использовать самые современные теплоизоляционные материалы с улучшенными физико-механическими свойствами, что увеличит срок их службы и приведет к экономической выгоде за счет экономии средств на коммунальные платежи.

Гидроизоляционные материалы и методы их испытаний должны соответствовать ГОСТ 30547-97. «Материалы рулонные кровельные и гидроизоляционные. Общие технические условия».

Для сокращения издержек по ремонту и замене рулонных гидроизоляционных материалов необходимо использовать материалы с основой из химически инертных материалов (полиэфиров (рис. 4) для химически агрессивных средств, в остальных случаях в качестве основы возможно использовать стеклоткань и стеклохолст. Использование их с такой подосновой позволяет значительно повысить срок эксплуатации.

Пример физико-механических свойств современного гидроизоляционного материала «Техноэласт» приведен ниже в табл. 2.

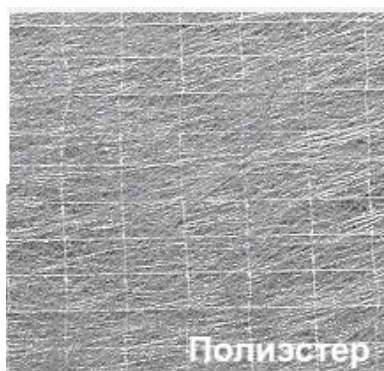


Рис. 4. Основа (армировка) битумно-полимерного рулонного материала полиэстер

Таблица 2

**Физико-механические свойства современного
гидроизоляционного материала «Техноэласт»**

Наименование показателя	Техноэласт ТЕРРА	Техноэласт ЭПП	Техноэласт БАРЬЕР БО	Техноэласт АЛЬФА
Масса 1 м ² , кг, (±0,25 кг)	5,0	4,95	1,5	4,95
Разрывная сила в продольном/поперечном направлении, Н, не менее полиэфир	1000/900	600/400	Условная прочность 1,0 МПа	600/400
Масса вяжущего с наплавляемой стороны, кг/м ² , не менее	2,0	2,0	-	2,0
Температура хрупкости вяжущего, °С, не выше	минус 35	минус 35	минус 35	минус 30
Температура гибкости на брусе R=25 мм, °С, не выше	минус 25	минус 25	минус 25	минус 20
Теплостойкость, °С, не менее	100	100	85	
Тип защитного покрытия верхняя сторона наплавляемая сторона	песок	пленка с логотипом	пленка с логотипом	пленка с логотипом
	пленка с логотипом	пленка с логотипом	антиадгезионная пленка	пленка с логотипом
Длина / ширина, м	10x1	10x1	20x1	10x1
Упаковка поддона	термоусадочный пакет белый с логотипом			

Литература

1. СанПиН 2.2.3.1384-03. Гигиенические требования к организации строительного производства и строительных работ : санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М. : Федер. центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. 60 с.
2. СП 131.13330.2012. Строительная климатология : актуализир. редакция СНиП 23-01-99* (с изм. № 2). М. : Минрегион России, 2012. 112 с.
3. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий : актуализир. редакция СНиП 23-02-2003. М. : Минрегион России, 2012. 96 с.

УДК 621.182-62:65.011:004.896

Занин А. О.
Zanin A. O.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГИТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВЫХ
ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЕЛЬНЫХ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ
АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ**

**ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF GAS WATER BOILERS THROUGH
AUTOMATIC CONTROL PROCESS OPTIMIZATION**

В статье рассмотрены основные показатели энергетической эффективности работы газовых водогрейных котельных. Описан процесс сжигания топливного газа в котельных. Определено направление разработки алгоритма автоматического процесса регулирования параметров газовых водогрейных котельных для повышения их энергетической эффективности. Определены направления разработки алгоритмов автоматического регулирования параметров и предупреждения достижения экстремальных критических значений этих параметров, приводящих к аварийной остановке работы котельных.

Ключевые слова: автоматический процесс управления, горение, показатели энергетической эффективности, удельный расход газа.

Впервые категория «энергетическая эффективность» была использована в основополагающих документах на IV Конференции министров «Окружающая среда для Европы» (Дания, 23–25 июня 1998 г.). В декларации, принятой на конференции, заявлено, что политика в области энергоэффективности является одним из важнейших элементов, обеспечивающих достижение стоящих перед нами национальных и международных задач в области экономики, охраны окружающей среды, устойчивого энергоснабжения и технологий, оказывающих воздействие на качество жизни.

Законодательство Российской Федерации дает следующее определение рассматриваемому понятию: «Энергетическая эффективность – характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю» [5].

В настоящее время актуальность повышения энергетической эффективности энергоресурсов ни у кого не вызывает сомнения. Указом Президента Российской Федерации от 04.06.2008 № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» [3] определены основные направления государственной политики в сфере повышения энергоэффективности. Одним из таких направлений является повышение эффективности функционирования энергоустановок и использование энергосберегающих технологий. В данной работе рассматривается повышение энергоэффективности газовых водогрейных котельных. Для исследования вопросов повышения энергоэффективности рассматривается процесс производства тепловой энергии котельными установками. Схема преобразования ресурсов в процессе работы газовой котельной представлена на рис. 1.



Рис 1. Схема преобразования ресурсов в процессе работы газовой котельной

В настоящее время для управления процессами повышения энергоэффективности котельных используют информацию об отклонениях технологических показателей от их удельных норм. По газовым котельным нормируются следующие показатели эффективности работы котельной [4]:

1. Удельный расход топливного газа на отпуск тепловой энергии, (м.куб/Гкал).

$$b_{\text{нат}} = (V_{\text{нат}} \cdot 10^3) / Q_{\text{отпуск в сеть}},$$

где $V_{\text{нат}}$ – расход газа (тыс. м куб.) согласно показаниям счетчика топлива за учетный период; $Q_{\text{отпуск в сеть}}$ – количество тепловой энергии за учетный период, отпущенной от источника тепла в тепловую сеть, принимаемое согласно показаниям узла учета тепловой энергии (Гкал).

2. Удельный расход электроэнергии на отпуск тепловой электроэнергии, (кВт·ч/Гкал).

$$H_3 = W/Q_{\text{отпуск в сеть}},$$

где W – расход электроэнергии по котельной за учетный период, кВт·ч. Учет потребления электрической энергии ведется по приборам, расположенным непосредственно в котельной либо на каждом ее вводе.

3. Удельный расход воды на отпуск тепловой энергии, м куб./Гкал.

$$H_B = V_B/Q_{\text{отпуск в сеть}},$$

где V_B – расход воды на выработку тепловой энергии котельной за учетный период (м куб.); $Q_{\text{отпуск в сеть}}$ – количество тепловой энергии за учетный период, отпущенной от источника тепла в тепловую сеть, принимаемое согласно показаниям узла учета тепловой энергии (Гкал). Расход воды на выработку тепловой энергии котельной принимается по показаниям счетчиков воды на вводе в котельную.

Цель данной работы – повысить энергетические показатели газовых водогрейных котельных за счет оптимизации автоматического процесса управления.

Основными задачами автоматизации котельных является: обеспечение надежной и безопасной работы котельных; обеспечение энергосбережения и повышения эффективности систем теплоснабжения и теплопотребления.

Основные требования, предъявляемые к автоматическому процессу управления котельными, изложены в своде правил СНиП II-35-76 «Котельные установки. Актуализированная редакция» [2].

На удельный расход топливного газа в котельных влияет эффективность процесса горения газа. Горение – это процесс химической реакции соединений горючих элементов газа с кислородом, способствовавшему повышению температуры и происходящему с выделением тепла. Процесс горения газообразного топлива состоит из образования горючей смеси (газ/воздух) при нагревании ее до температуры воспламенения и горения [1].

К горелке котла подводятся газ и воздух. Воздух подается дутьевым вентилятором. Горючая смесь, которая образуется в горелке, воспламеняется и отдает тепло в топочную камеру. В результате процесса горения образуются газообразные продукты – дымовые газы. Их отсасывает дымосос, а затем выбрасывает в атмосферу через дымовую трубу. Сжигание осуществляется факельным способом. При сжигании газового топлива необходимо обеспечить: хорошее предварительное перемешивание газа с воздухом, ведение процесса с малыми избытками воздуха, разделение потока смеси на отдельные струи. Для процесса горения дымососом создается необходимое разряжение и обеспечивается полное удаление продуктов сгорания через дымовую трубу.

Эффективность процесса горения, в свою очередь, обеспечивается путем поддержания на требуемом уровне отношения «топливо – воздух». Идеальное соотношение для горения газ/воздух – 1/10, но реально используют 1/8–1/7, а из-за ручной настройки может сбиваться до 1/3, что приводит к большим топливным потерям и к повышению содержания вредных газов в выбросах. Для поддержания концентрации соотношения газ/воздух на оптимальном уровне необходимо автоматизировать регулирование подачи топлива и давления дутьевого воздуха.

Основной идеей оптимизации автоматического процесса управления горением в данной работе является динамическое автоматическое регулирование зависимости соотношения газ/воздух в зависимости от концентрации кислорода в проходящих через дымовую трубу продуктах сгорания. Для опытного измерения кислорода в отходящих газах предлагается использовать стационарный газоанализатор.

Изучение зависимости соотношения газ/воздух от концентрации кислорода в проходящих через дымовую трубу продуктах сгорания осуществляется путем модельных исследований. Поэтому вопросам усовершенствования практических методов моделирования в работе уделено большое внимание. Научную новизну работы представляют результаты исследова-

дований в области моделирования автоматических процессов управления газовыми водогрейными котельными.

Разработка математической модели данной зависимости и обоснование ее адекватности является одной из основных задач данной работы. В работе также будет представлена расчетная оценка влияния данной зависимости на показатели энергетической эффективности. На основании исследований в области моделирования данной зависимости будет разработан алгоритм автоматического регулирования соотношения газ/воздух в зависимости от концентрации кислорода в проходящих через дымовую трубу продуктах сгорания.

Предполагается, что создание автоматической системы регулирования подачи топлива и воздуха в топку котла в зависимости от концентрации кислорода в отходящих газах существенно понизит удельный расход газа, повысит эффективность его сжигания и, как следствие, понизит вредоносные выбросы в атмосферу.

В работе также рассматриваются основные проблемы, влияющие на надежность работы котельной, а именно ее бесперебойного функционирования. Выявлены основные и второстепенные технические причины остановки работы газовых водогрейных котельных: повышение или понижение давления газообразного топлива перед горелками; понижение давления воздуха перед горелками с принудительной подачей воздуха; уменьшение разрежения и/или повышение давления в топке; погасание факелов горелок, отключение которых при работе котла не допускается; повышение температуры воды на выходе из котла; повышение или понижение давления воды на выходе из котла; уменьшение установленного наименьшего расхода воды через котел; остановка ротора форсунки; неисправность цепей защиты.

Оптимизация автоматического процесса управления, направленная на повышение бесперебойности функционирования работы котельных, приведет, как следствие, к повышению энергоэффективности их работы.

Литература

1. Зельдович Я. Б., Франк-Каменецкий Д. А. Теория теплового распространения пламени // Журн. физической химии. 1938. Т. 12. № 1. С. 100–105.
2. СП 89.13330.2012. Котельные установки : актуализир. редакция СНиП II-35-76 ; утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 30 июня 2012 г. № 281 и введен в действие с 1 января 2013. Зарегистрирован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт).
3. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики : Указ Президента Российской Федерации от 04.06.2008 № 889.
4. Фокин В. М. Энергосбережение в производственных и отопительных котельных : моногр. М. : Машиностроение-1, 2004. 180 с.
5. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 28.12.2013) с изм. и доп., вступ. в силу с 01.07.2014.

УДК 624.138.2.014-026.564.2

Матвеев С. А., Губская О. А.
Matveev S. A., Gubskaya O. A.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНОЙ ГЕОРЕШЕТКОЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГОГО СЛОЯ

ASSESSMENT OF REINFORCEMENT INFLUENCE BY CELLULAR CONFINED SYSTEM ON ELASTIC LAYER PHYSICOMECHANICAL CHARACTERISTICS

В статье изложена методика вычисления физико-механических характеристик упругого слоя, армированного объемной георешеткой. Приведены численные оценки эффекта армирования для различных соотношений геометрических размеров характерной ячейки армирующей структуры.

Ключевые слова: упругий слой, армирование, объемная георешетка, физико-механические характеристики, эффект армирования.

Рассмотрим упругий слой толщиной h с модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν , армированный объемной георешеткой с упругими характеристиками E_0 и ν_0 . Характерная ячейка армирующей структуры имеет форму ромба (рис. 1).

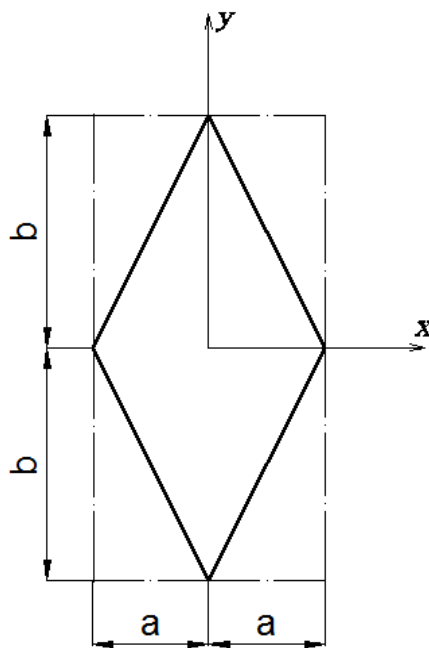


Рис. 1. Армирующая структура в форме ромба

Полагая, что все элементы ячейки находятся в упругом состоянии, заменим армированный слой эквивалентной композитной анизотропной средой. Выразим закон упругого деформирования эквивалентной композитной анизотропной среды в следующем виде:

$$\bar{\sigma} = A \cdot \bar{\varepsilon} \quad (1)$$

Здесь $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$ – векторы-столбцы напряжений и деформаций; A – матрица упругих постоянных композитного слоя.

Выражение для определения упругих постоянных (компонент матрицы A) эквивалентной композитной анизотропной среды имеет вид [1; 2]:

$$A = \Omega B_0 + \sum \omega_k C_k^T B_k C_k, \quad (2)$$

где Ω , ω_k – постоянные, определяемые из выражений

$$\omega_k = \frac{l_k \delta_k}{4ab}; \quad \Omega = 1 - \sum \omega_k. \quad (3)$$

Матричное произведение $C_k^T B_k C_k$, необходимое для вычисления матрицы A постоянных композита «упругий слой – георешётка», имеет вид:

$$C_k^T B_k C_k = \begin{bmatrix} E_1 \sin^4 \varphi & \frac{E_1}{4} \sin^2 2\varphi & E_1 \nu_{12} \sin^2 \varphi & E_1 \sin^3 \varphi \cos \varphi & 0 & 0 \\ \frac{E_1}{4} \sin^2 2\varphi & E_1 \cos^4 \varphi & E_1 \nu_{12} \cos^2 \varphi & E_1 \sin \varphi \cos^3 \varphi & 0 & 0 \\ E_2 \nu_{21} \sin^2 \varphi & E_2 \nu_{21} \cos^2 \varphi & E_2 & \frac{E_2 \nu_{21}}{2} \sin 2\varphi & 0 & 0 \\ E_1 \sin^3 \varphi \cos \varphi & E_1 \sin \varphi \cos^3 \varphi & \frac{E_1 \nu_{12}}{2} \sin 2\varphi & \frac{E_1}{4} \sin^2 2\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \cos^2 \varphi & \frac{G_{12}}{2} \sin 2\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G_{12}}{2} \sin 2\varphi & G_{12} \sin^2 \varphi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь φ – угол поворота нормали к армирующему элементу относительно оси x , взятый против часовой стрелки.

Матрица упругих постоянных композитного слоя имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Матрица A в форме (5) является матрицей жёсткости ортотропного тела. Физический смысл элементов матрицы A следующий: A_{11} , A_{22} , A_{33} – упругие постоянные при растяжении-сжатии в направлении осей x , y , z соответственно; A_{44} , A_{55} , A_{66} – то же, при сдвиге в плоскостях xy , yz , zx соответственно; A_{12} – коэффициент пропорциональности между напряжением σ_x и деформацией ε_y ; A_{13} – коэффициент пропорциональности между напряжением σ_x и деформацией ε_z ; A_{23} – коэффициент пропорциональности между напряжением σ_y и деформацией ε_z .

Заменим физические постоянные A_{ij} на технические, используя зависимости

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= \frac{E_1}{\Delta}(1 - \nu_{23}\nu_{32}); & A_{22} &= \frac{E_2}{\Delta}(1 - \nu_{13}\nu_{31}); \\
 A_{33} &= \frac{E_3}{\Delta}(1 - \nu_{12}\nu_{21}); \\
 A_{12} &= \frac{E_1}{\Delta}(\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}) = \frac{E_2}{\Delta}(\nu_{21} + \nu_{13}\nu_{23}); \\
 A_{13} &= \frac{E_1}{\Delta}(\nu_{13} + \nu_{23}\nu_{12}) = \frac{E_3}{\Delta}(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}); \\
 A_{23} &= \frac{E_2}{\Delta}(\nu_{23} + \nu_{13}\nu_{21}) = \frac{E_3}{\Delta}(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}); \\
 A_{44} &= G_{12}; & A_{55} &= G_{23}; & A_{66} &= G_{31}; \\
 \Delta &= 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{12}\nu_{23}\nu_{31}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Здесь E_1, E_2, E_3 – модули упругости в направлении осей x, y, z соответственно; ν_{12} – коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение размеров тела в направлении оси x при растяжении в направлении оси y ; ν_{23} – коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение размеров тела в направлении оси y при растяжении в направлении оси z ; ν_{31} – коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение размеров тела в направлении оси z при растяжении в направлении оси x ; G_{12}, G_{23}, G_{31} – модули сдвига в плоскостях соответственно xy, yz, zx .

В результате обращения матрицы жёсткости ортотропного тела A получим матрицу податливости A^{-1} , имеющую следующий вид:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix}, \tag{7}$$

где

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{1}{E_1}; & a_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_2}; & a_{13} &= -\frac{\nu_{13}}{E_3}; \\
 a_{22} &= \frac{1}{E_2}; & a_{23} &= -\frac{\nu_{23}}{E_3}; & a_{33} &= \frac{1}{E_3}; \\
 a_{44} &= \frac{1}{G_{12}}; & a_{55} &= \frac{1}{G_{23}}; & a_{66} &= \frac{1}{G_{31}}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Эти зависимости более просты по сравнению с выражениями (6) и дают возможность определять модули упругости и коэффициенты Пуассона ортотропного слоя, если известны компоненты его матрицы податливости a_{11}, \dots, a_{33} .

Оценим влияние армирования объемной георешеткой на физико-механические характеристики упругого слоя. Используя выражения (5)–(8) вычислим модули упругости E_1, E_2, E_3 эквивалентного ортотропного слоя для разных соотношений геометрических размеров характерной ячейки b/a .

В качестве исходных данных рассмотрим упругий слой толщиной $h = 0,2$ м с физико-механическими характеристиками материала слоя и материала армирующей структуры соответственно $E = 60$ МПа; $\nu = 0,35$ и $E_0 = 393$ МПа; $\nu_0 = 0,4$. Размеры характерной ячейки армирующей структуры: $a = 0,1$ м; $b = 0,1 \div 0,2$ м. Толщина армирующих элементов $\delta = 0,00127$ м.

Для различных соотношений геометрических размеров характерной ячейки армирующей структуры ($b/a = 1,0; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0$) были вычислены матрицы A упругих постоянных для каждого соотношения b/a . Для тех же соотношений b/a также были вычислены матрицы A^{-1} , обратные матрицам A . Используя компоненты обратных матриц A^{-1} и зависимости (8), были определены модули упругости и коэффициенты Пуассона ортотропного армированного слоя для различных соотношений геометрических размеров характерной ячейки армирующей структуры. Изменение модулей упругости E_1, E_2, E_3 в зависимости от соотношения b/a представлено на рис. 2.

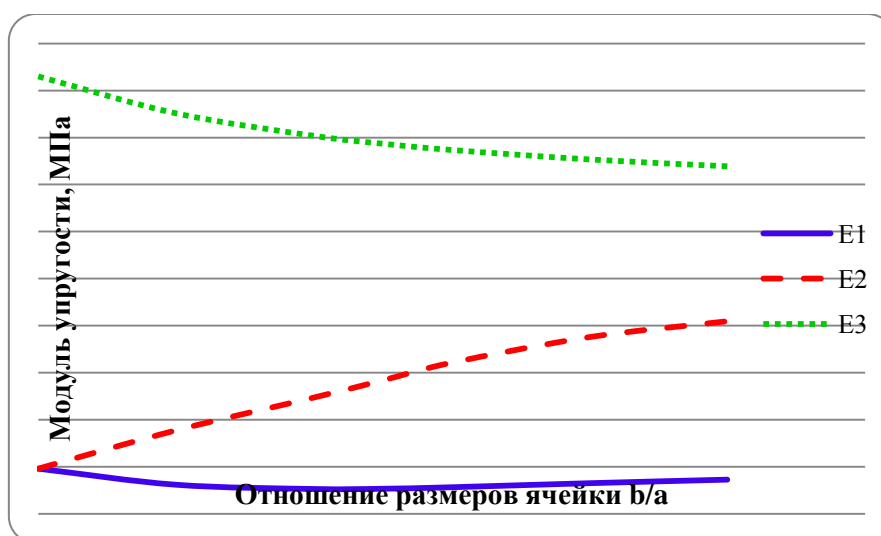


Рис. 2. Изменение модулей упругости в зависимости от соотношения b/a

Из анализа представленных графиков следует, что армирование изотропного упругого слоя объемной георешеткой превращает его в слой ортотропный. При этом происходит увеличение модулей упругости E_1, E_2, E_3 в направлениях осей x, y, z соответственно по сравнению с исходным модулем упругости E неармированного изотропного слоя. Наибольший эффект армирования получен при соотношении $b/a = 1$ для модуля E_3 и достигает 8 %. С увеличением данного соотношения до $b/a = 2$ эффект армирования для модуля E_3 снижается до 6 %, а для E_2 возрастает с 1 % до 3,4 %. На модуль E_1 армирование не оказывает существенного влияния.

Литература

1. Матвеев С. А., Немировский Ю. В. Армированные дорожные конструкции: моделирование и расчет. Новосибирск : Наука, 2006. 348 с.
2. Немировский Ю. В., Матвеев С. А. Построение расчетной модели грунта, армированного объемной георешеткой // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 9. С. 95–101.

УДК 629.36.027.72.084:625.084

Мухеев П. В., Савельев С. В.
Mikheyev P. V., Savelyev S. V

О КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВИБРОУПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ КАТКАМИ С АДАПТИВНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

EFFICIENCY CRITERION FOR VIBRATORY SOIL COMPACTION BY ROLLERS WITH ADAPTIVE WORK TOOLS

В статье рассматривается задача выбора критерия эффективного уплотнения грунтов адаптивным рабочим органом катка в процессе динамического нагружения, величина которого зависит от времени по гармоническому закону. Выявлен характер накопления пластических деформаций в грунте, и показана зависимость величины пластической деформации от частоты приложения нагрузки и возможность регулирования его протекания варьированием характеристик рабочего органа. Предложен критерий эффективности процесса уплотнения, регулируемый выбором характеристик адаптивного рабочего органа.

Ключевые слова: уплотнение грунтов, эффективность уплотнения, деформируемые рабочие органы, механический импеданс, коэффициент уплотнения.

Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений интенсификации процессов уплотнения грунтов в транспортном и гражданском строительстве как у нас в стране, так и за рубежом является применение катков с адаптивными рабочими органами [11]. Характеристики таких катков, например, частота приложения силы, величина ее модуля, пятно контакта, жесткость рабочего органа могут автоматически или принудительно изменяться таким образом, чтобы уплотнение ими грунта протекало наиболее эффективно с точки зрения затрат времени и материальных ресурсов на процесс уплотнения до требуемых по стандартам значений плотности [3]. Отсюда становится понятна важность задачи о выборе доступных для регулирования характеристик рабочего органа, соответствующих свойствам грунта, в общем случае, меняющихся в процессе уплотнения [2].

Грунт под воздействием рабочего органа традиционно рассматривается как упруго-вязко-пластичная среда, оказывающая внешней силе сопротивление пропорциональное как смещению грунта относительно устойчивого состояния, так и величинам скорости этого смещения и ускорения [1, 12], зависящее также от времени приложения силы. Остаточная деформация, обусловленная вязко-пластичными свойствами грунта, накапливаемая грунтом под воздействием нагружения, выступает в качестве величины, характеризующей течение процесса уплотнения.

В качестве условия эффективного протекания процесса уплотнения выступает динамическое соотношение на контактные напряжения /6/

$$\sigma_{pl}(t) < \sigma(t) < \sigma_{destr}(t), \quad (1)$$

где σ_{pl} – предел текучести грунта, $\sigma(t)$ – текущее значение контактного напряжения, σ_{destr} – предел прочности грунта.

При этом условии грунт испытывает упругую и пластическую деформацию, не разрушаясь. В отличие от тел, обладающих непрерывной структурой, например кристалличе-

ской, сыпучая среда грунта с накоплением пластической деформацией изменяет свою плотность. Наряду с увеличивающейся плотностью, при уплотнении существенно изменяются механические свойства слоя грунта (вязкость и жесткость), что приводит к возрастанию прочности по отношению к внешнему воздействию.

Сила внешнего воздействия, обеспечивающая контактное напряжение, соответствующее выполнению условия (1), должна действовать в течение определённого времени для того, чтобы неупругие деформации стали необходимой величины для достижения требуемых значений плотности. Наиболее эффективно процесс уплотнения будет протекать в том случае, когда доля времени, в течение которого грунт находится в состоянии, соответствующем условию (1), в полном времени воздействия будет максимальной. При этом в случае воздействия переменной силы верхняя граница контактных напряжений не должна превышать предела прочности, а нижняя, по возможности, не быть меньше предела текучести.

Контактное напряжение зависит от силы воздействия и площади пятна контакта $\sigma(t) = F(t)/S(t)$ и может регулироваться изменением обеих величин. Однако для реального грунта диапазон допустимых напряжений – от предела текучести до предела прочности – настолько велик (составляет от десятков до сотен килопаскалей) и, кроме этого, зависит от текущей плотности грунта, что требуется дополнительный анализ процесса накопления неупругих деформаций для выявления критериев, влияющих на его эффективность.

Традиционно величиной, описывающей протекание процесса уплотнения выступает коэффициент уплотнения – отношение текущей плотности грунта к номинальной

$k_y = \rho(t) / \rho_{iii}$. В качестве дополнительных величин, характеризующих процесс виброуплотнения, могут выступать величина остаточных деформаций на каждом цикле и скорость дорожной машины (при фиксированном режиме динамического воздействия), требуемая для уплотнения грунта от рыхлого состояния до номинальной плотности. Величина остаточных деформаций Δx за один цикл виброуплотнения или трамбования определяется коэффициентом восстановления грунта, который зависит от соотношения модуля Юнга грунта, модуля пластической деформации и амплитуды деформации грунта. Скорость дорожной машины, в свою очередь, может быть вычислена по времени достижения номинальной плотности Δt и длине пятна контакта y : $v = y / \Delta t$.

В рамках многочисленных исследований [7, 9] было показано, что варьированием параметров рабочего органа дорожной машины может быть достигнуто значительное повышение скорости уплотнения с учётом выполнения условия (1). В рамках такого подхода параметры рабочего органа являются более удобными и приемлемыми для принудительного и автоматического регулирования и контроля процесса уплотнения, в отличие от характеристик грунта, часто известных лишь приблизительно и варьирующихся весьма широко в зависимости от гранулометрического состава и влажности даже для известного типа грунта.

В связи с этим возникает вопрос выбора режима работы уплотняющих машин (катков) и характеристик рабочего органа, позволяющих достичь требуемого коэффициента уплотнения грунта при минимальном времени и затратах ресурсов [10]. Для этого необходимо выбрать величины, характеризующие процесс уплотнения, контроль которых позволил бы сделать выводы об эффективности последнего. Коэффициент уплотнения k_y , несущий информацию о протекании процесса, в случае воздействия переменной силы не является удобным для контроля уплотнения в реальном времени. Это происходит, например, в ситуации, когда поверхность грунта смещается, а коэффициент уплотнения не изменяется (например в случае, когда условие (1) не выполнено), то есть при упругом деформировании. Кроме этого, коэффициент уплотнения весьма сложным образом, в основном неявно, зависит от параметров грунта и рабочего органа, так что его регулирование варьированием этих параметров представляет собой сложную задачу. Ниже будет показано, что в качестве критерия эффективного уплотнения гармонической силой в реальном времени возможно использовать

величину амплитуды вынужденных колебаний грунта, позволяющую судить о накоплении пластической деформации.

Моделирование оптимального режима уплотнения

Рассмотрим упрощенную ситуацию виброуплотнения грунта с известными реологическими свойствами под воздействием внешней гармонической силы и исследуем, как параметры рабочего органа влияют на эффективность процесса уплотнения и насколько управление этими параметрами позволяет повысить его качество. Движение рабочего органа рассматривается неявно, его влияние на процесс уплотнения будет учтено изменением параметров пятна контакта и динамического воздействия.

В качестве уплотняемого объема грунта рассмотрим призму высоты h , длины y и ширины l , где h – толщина слоя грунта, l и y – длина и ширина пятна контакта рабочего органа соответственно (рисунок 1). Площадь пятна контакта $S = ly$, а масса грунта $m = \rho V = \rho l(y + h \tan \varphi)l$, где φ – угол внутреннего трения грунта. Выбор в качестве модельной указанной формы грунта позволяет лучше учесть распределение напряжений в грунте в процессе динамического воздействия, отличающегося от случая статического уплотнения, и вовлекающего в процесс уплотнения больший объем грунта [5].

Будем моделировать движение грунта исходя из подхода сосредоточенных параметров, считая движущуюся массу грунта материальной точкой массы m , находящейся в центре масс грунта, распределенные жесткость и вязкость объема грунта промоделируем соответственно сосредоточенными вязкостью и жесткостью b и жесткостью c . Пластическая деформация учитывается зависимостью $c = c_{pl} + c_{el}$, где c_{pl} – жесткость по отношению к пластической деформации, c_{el} – жесткость по отношению к упругой деформации.

Считаем гармоническую силу внешнего воздействия, направленную вертикально вниз, имеющей вид

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) = F_0 \sin(2\pi f t).$$

Кроме этой силы необходимо учитывать долю веса катка массой M , приходящегося на уплотняемый грунт и обеспечивающего постоянство контакта рабочего органа с его поверхностью и вес самого грунта. Предполагается, что отрыва грунта от поверхности грунта не происходит. Уравнение движения грунта с учетом диссипативных сил может быть получено исходя из Лагранжева формализма с функцией Лагранжа

$$L(\Delta x, \Delta \dot{x}_1, t) = \frac{m_1 (\Delta \dot{x})^2}{2} + \frac{c(\Delta x)(\Delta x)^2}{2} - (\Delta x)F(t) - (Mg + mg)\Delta x \quad (2)$$

и диссипативной функцией

$$D(\Delta x, \Delta \dot{x}) = \frac{b(\Delta x)(\Delta \dot{x})^2}{2},$$

ответственной за вязкое трение, сила которого считается пропорциональной скорости движения. Здесь Δx – смещение сосредоточенной массы грунта относительно текущего положения равновесия. Ниже будет показано, как это смещение зависит от величины смещения, получаемого границей грунта при динамическом воздействии.

В общем случае полагаем вязкость $b(\Delta x)$ и жесткость $c(\Delta x)$ зависящими от смещения грунта. Уравнение Эйлера – Лагранжа [4] для грунта выглядит следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L(\Delta x, \Delta \dot{x}_1, t)}{\partial \Delta \dot{x}} = \frac{\partial L(\Delta x, \Delta \dot{x}_1, t)}{\partial \Delta x} - \frac{\partial D(\Delta x, \Delta \dot{x}_1, t)}{\partial \Delta \dot{x}},$$

включая в себя нелинейный член, учитывающий зависимость свойств грунта от величины деформации:

$$m\Delta\ddot{x} + b(\Delta x)\Delta\dot{x} + c(\Delta x)\Delta x + \frac{\partial c(\Delta x)}{\partial \Delta x} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \frac{\partial b(\Delta x)}{\partial \Delta \dot{x}} \frac{(\Delta \dot{x})^2}{2} = F(t) + Mg + mg, \quad (3)$$

явный вид зависимостей $b(\Delta x)$ и $c(\Delta x)$ здесь не существенен, важно то, что они достаточно медленно меняются со смещением грунта и изменением его скорости, так что для качественного анализа процесса смещения и накопления деформаций производными $\frac{\partial c(\Delta x)}{\partial \Delta x}$ и $\frac{\partial b(\Delta x)}{\partial \Delta \dot{x}}$ можно пренебречь, считая вязкость и жесткость константами. При более детальном анализе зависимости деформации от времени такое приближение не будет правомерным. Окончательный вид уравнения движения грунта:

$$m\Delta\ddot{x} + b(\Delta x)\Delta\dot{x} + c(\Delta x)\Delta x = F(t) + Mg + mg. \quad (4)$$

Его решение представляет собой экспоненциально затухающие собственные колебания грунта, происходящие с собственной частотой системы $\omega_{\text{собст}} = \sqrt{(b/2m)^2 - c/m}$ и вынужденные колебания с частотой вынуждающей силы ω . Реальный грунт обладает очень высокой вязкостью по сравнению с жесткостью, в силу чего практически сразу (после того, как предварительное смещение под воздействием пригрузки достигнуто) начинает совершать вынужденные колебания вида:

$$\Delta x(t) = \frac{F_0 \sin(\omega t + \phi)}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + k^2\omega^2}}, \quad \phi = \arctan\left(\frac{k\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right),$$

где ϕ – фазовый сдвиг, $\omega_0^2 = c/m$ – собственная частота системы при отсутствии вязкого трения, $k = b/m$. Амплитуда вынужденных колебаний, таким образом, есть

$$\Delta x_{\text{max}} = \frac{F_0}{m\sqrt{((\omega_0(y, \Delta x))^2 - \omega^2)^2 + k(y, \Delta x)^2\omega^2}}. \quad (5)$$

Здесь учтена зависимость собственной частоты (жесткости) и коэффициента k от смещения и длины пятна контакта.

Остаточная деформация на одном цикле виброуплотнения зависит от коэффициента восстановления уплотняемого объема грунта α , описывающего долю энергии пластической деформации в полной энергии деформации, так что после половины одного периода действия гармонической вынуждающей силы грунт приобретает остаточную деформацию величиной

$$\Delta x_{\text{res}} = \alpha \Delta x_{\text{max}} = \frac{\alpha F_0}{m\sqrt{((\omega_0(y, \Delta x))^2 - \omega^2)^2 + k(y, \Delta x)^2\omega^2}},$$

такую же деформацию грунт будет приобретать на каждом последующем цикле в предположении того, что его жесткость не зависит от деформации. Для случая реального грунта и значительных величин деформации это не совсем верно, поскольку наблюдается насыщение деформации, выходящей на постоянное значение, не зависящее от времени воздействия при неизменных параметрах нагружения, так что дальнейшее уплотнение возможно только при их изменении. Однако для проводимой ниже качественной оценки будем рассматривать процесс уплотнения на временах, когда режим вынужденных колебаний уже установился, а насыщение еще не достигнуто.

Неупругая часть деформации, определяемая коэффициентом α , возникает только в случае, когда выполнено условие (1), причем после начала его выполнения грунт деформируется только под действием той части силы внешнего воздействия, которая превышает необходимую для достижения условия. При этом упругая сила сопротивления деформирования равна нулю. Соответственно, неупругая деформация будет тем выше, чем дольше времени будет происходить пластичное сжатие объема грунта. Величина коэффициента α может быть найдена из условия того, какую долю половины периода будет выполняться условие (1).

Таким образом, полная остаточная деформация, накопленная на i -м цикле воздействия представляет собой сумму

$$\Delta x_{res}^{(i)} = \sum_{k=1}^i \Delta x_{res,k} \quad (6)$$

Так что задача интенсификации уплотнения сводится к максимизации этой величины при минимальном полном времени общего динамического воздействия с помощью принудительного или автоматического изменения параметров воздействия – частоты вынуждающей силы и длины пятна контакта. Последнее возможно лишь для адаптивного рабочего органа.

Выбор оптимального режима уплотнением варьированием параметров рабочего органа. Далее будем предполагать зависимости величин в выражениях (4), (5), (6) от смещения Δx слабыми, так что производными по смещению можно пренебречь. Такое предположение с точки зрения моделирования эквивалентно тому, что на каждом цикле виброуплотнения жесткость и вязкость грунта меняются настолько слабо, что могут считаться постоянными. Однако при накоплении грунтовым слоем пластической деформации в результате уплотнения, зависимость жесткости и вязкости от изменившихся модуля упругости и динамической вязкости набравшего прочность грунта не могут игнорироваться.

Выражение (4), максимизация которого требуется для решения задачи, представляет собой амплитуду вынужденных колебаний гармонического осциллятора с диссипацией под воздействием вынуждающей силы, хорошо известное из теории дифференциальных уравнений. Его знаменатель

$$|Z| = \sqrt{((\omega_0(y))^2 - \omega^2)^2 + k(y)^2 \omega^2}$$

традиционно называется импедансом и характеризует сопротивление системы приложенной силе [8].

Нахождение экстремума амплитуды (5) как функции многих переменных, в рассматриваемом случае зависящего от длины пятна контакта рабочего органа и частоты вынуждающей силы, требует выполнения двух условий:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta x_{\max}}{\partial \omega} &= 0 \\ \frac{\partial \Delta x_{\max}}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Первое из них дает выражение резонансной частоты, стандартной для теории колебаний, при постоянной величине пятна контакта (постоянном объеме уплотняемого грунта)

$$\omega_{res} = \sqrt{\omega_0^2 - k^2/2}.$$

Второе условие отвечает за влияние длины пятна контакта на амплитуду, однако его рассмотрение невозможно без учета явной зависимости жесткости и вязкости уплотняемого

объема грунта от величины пятна контакта. В случае предложенной формы уплотняемого объема несложные выкладки приводят к результату для жесткости $c(y)$:

$$\frac{1}{c} = \int_0^h \frac{dx}{ES(x)} = \int_0^h \frac{dx}{El(y + 2x \tan \varphi)} = \frac{1}{2El \tan \varphi} \ln \left(\frac{y + 2h \tan \varphi}{y} \right) \quad (8)$$

Так что окончательно жесткость уплотняемого объема грунта есть

$$c = \frac{2El \tan \varphi}{\ln \left(\frac{y + 2h \tan \varphi}{y} \right)},$$

и, соответственно, частота собственных колебаний грунта имеет вид:

$$\omega_0^2 = \frac{c}{m} = \frac{2 \left(\frac{E}{\rho} \right) \tan \varphi}{h(y + h \tan \varphi) \ln \left(\frac{y + 2h \tan \varphi}{y} \right)}, \quad (9)$$

где известное соотношение $\frac{E}{\rho} = v_{ac}^2$ – скорость распространения акустических волн в грунте.

Как нетрудно проверить, при стремлении $\tan \varphi$ к нулю в результате предельного перехода получается хорошо известное выражение для жесткости параллелепипеда ширины y , длины l и высоты h . Полученный результат может быть использован в качестве исходного для расчета жесткости областей грунта под пятном контакта произвольной формы, в том числе и неплоским на любой стадии уплотнения, если зависимость жесткости от плотности (величины накопленной пластической деформации) известна.

Вязкое сопротивление грунта деформированию в модели с сосредоточенными параметрами, учитывающееся коэффициентом k , с деформацией изменяется незначительно. Сила вязкого сопротивления при движении уплотняемого объема грунта есть

$$F_{visc} = \eta \frac{dv}{dy} S,$$

где $S = 2lh/\cos \alpha$ – площадь боковой поверхности выбранного объема грунта, η – коэффициент динамической вязкости грунта, а $\frac{dv}{dy}$ – градиент скорости в направлении, перпендикулярном

скорости смещения боковой поверхности грунта, также определяемый углом внутреннего трения. В процессе внешнего воздействия, например при виброуплотнении, амплитуда рабочего органа, а следовательно, и верхней границы грунта составляет порядка 1 мм [5]. Эта величина пренебрежимо мала по сравнению с толщиной слоя грунта $h \approx 0,2 - 0,3$ м, соответственно, при этом незначительно меняется и площадь боковой поверхности, кроме этого, последнее явление связано с тем, что при уплотнении меняется и угол внутреннего трения, убывая [3]. Это приводит к выводу о том, что вязкость упруго вязкого элемента в модели с сосредоточенными параметрами практически остается постоянной, а при разбиении объема грунта на слои по толщине является аддитивной величиной.

Минимизация импеданса, также максимизация величины времени накопления неупругой деформации для заданных вязкости и модуля упругости грунта технически может быть достигнута изменением как величины модуля силы внешнего воздействия и его частоты, влияющих на выполнение условия (1), так и длины пятна контакта, от которой зависит и

выполнение условия (1), и собственная частота колебаний уплотняемого грунта (9), варьирование которой позволяет выполнить условие минимума импеданса (7).

Моделирование поведения объема уплотняемого грунта под воздействием внешней нагрузки в рамках подхода с точки зрения сосредоточенных параметров требует точной оценки соотношения смещения поверхности грунта и смещения сосредоточенной массы. В случае рассматриваемой призмы грунта его центр масс находится на высоте

$$\bar{x} = \frac{h \left(\frac{y}{2} + \frac{h \tan \varphi}{3} \right)}{(y + h \tan \varphi)}$$

относительно основания грунта. Нетрудно показать, что на величину \bar{x} выполняется условие

$$\frac{h}{3} \leq \bar{x} \leq \frac{h}{2},$$

что приводит к выводу о том, что скорость смещения центра масс ниже скорости смещения верхней границы объема уплотняемого грунта, что не может не учитываться при определении величины коэффициента уплотнения для заданной величины высоты грунта и длины пятна контакта.

В заключение следует отметить, что точное решение даже упрощенного уравнения (3), а тем более, уравнения без модельных упрощений (4), крайне затруднительно, если вообще возможно. Причинами этого являются, во-первых, нелинейность задачи, выражающаяся в сложных зависимостях параметров грунта от деформации и характера сил сопротивления грунта внешней силе, обеспечивающая накопление деформаций и в итоге уплотнение, во-вторых, изменяющиеся в процессе уплотнения начальные условия, поскольку верхняя граница объема грунта в процессе уплотнения смещается. Это приводит к тому, что если условие (1) не выполняется, то массой грунта совершаются затухающие гармонические колебания, релаксирующие не к первоначальному недеформированному состоянию, а к состоянию с накопленной неупругой деформацией. Таким образом, детальное рассмотрение задачи требует численного моделирования.

Заключение

В работе рассматривается проблема обоснования выбора критерия эффективного уплотнения грунтов рабочими органами дорожных машин с точки зрения модели с сосредоточенными параметрами. Предполагается, что рабочий орган дорожной машины является адаптивным с возможностью регулирования как силы воздействия, так и площади пятна контакта рабочего органа с поверхностью уплотняемого грунта.

Известно, что уплотнение в результате накопления неупругих деформаций наступает лишь при выполнении условия (1), которое может быть достигнуто подбором силы внешнего воздействия и величины площади контакта. Уплотнение происходит наиболее эффективно в случае минимального общего времени воздействия, при этом с максимальным временем неупругого деформирования и величиной неупругой деформации. В статье предлагается критерий, позволяющий учесть это и добиться максимального накопления неупругих деформаций подбором параметров рабочего органа, обеспечивающих максимальную величину смещения верхней границы грунта и время неупругого деформирования, уменьшая его сопротивление деформированию (импеданс) при вынужденных колебаниях, сохраняя выполнение критерия (1) неизменным.

Смысл минимума импеданса состоит в том, что при этом амплитуда вынужденных колебаний грунта максимальна, соответственно максимальна пластическая деформация, приобретаемая грунтом при выполнении условия (1). Практическое использование этого подхода при вибрационном нагружении может быть реализовано следующим образом:

1. Зависимость длины пятна контакта y рабочего органа от его характеристик при взаимодействии с жесткой поверхностью известна.
2. Для заданной величины модуля вынуждающей силы F_0 подбирается такое значение длины пятна контакта y , чтобы условие (1) на контактные напряжения выполнялось на как можно большей доле периода, но не было превышено.
3. По известным характеристикам грунта и пятна контакта вычисляется его вязкость и жесткость в рамках модели с сосредоточенными параметрами, а также собственная частота $\omega_0(y)$.
4. Подбирается частота динамического воздействия ω , минимизирующая импеданс, соответственно увеличивающая смещение поверхности грунта и итоговую остаточную деформацию.
5. Для меняющихся в процессе уплотнения характеристик грунта и скорости уплотнения повторяем пункты 2–4 с возможным изменением модуля вынуждающей силы, обеспечивающим выполнение условия (1).

Литература

1. Батраков О. Т. Соппротивление грунтов при уплотнении : материалы совещания по закреплению и уплотнению грунтов. Киев : Изд-во Акад. стр-ва и архит., 1962. С. 12–15.
2. Захаренко А. В., Савельев С. В. Обоснование амплитуды колебаний вибраторов и рабочих скоростей дорожных катков // Актуальные проблемы повышения надёжности и долговечности автомобильных дорог и искусственных сооружений на них : сб. тр. всероссийской научно-практ. конф. (22–25 апр. 2003 г.). Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2003. С. 165–168.
3. Калужский Я. А., Батраков О. Т. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд : учеб. пособие. М. : Транспорт, 1970. 160 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика : изд. 3-е, испр. и доп. М. : Наука, 1973. Т. I. 208 с. («Теоретическая физика»).
5. Михеев В. В., Савельев С. В. Исследования напряженно-деформируемого состояния упруго-вязкой среды при вибрационном нагружении // Вестн. СиБАДИ. 2012. № 3 (25). С. 83–86.
6. Пермяков В. Б. Совершенствование теории, методов расчёта и конструкций машин для уплотнения асфальтобетонных смесей : дис. ... д-ра техн. наук. Сиб. автомоб.-дорожн. ин-т. Омск, 1990. 485 с.
7. Пермяков В. Б., Захаренко А. В., Савельев С. В. Обоснование выбора параметров вибрационных катков // Известия вузов. Сер. Строительство. 2003. № 2. С. 100–103.
8. Пиппард А., Матвеев А. Н. Физика колебаний. М. : Высш. шк., 1985. 456 с.
9. Савельев С. В., Захаренко А. В. Проблемы уплотнения дорожных материалов и возможности их решения при строительстве автомобильных дорог // Машины и процессы в строительстве : сб. науч. тр. № 3. Омск : Изд-во СиБАДИ, 2000. 247 с.
10. Савельев С. В. Уплотнение грунтов катками с адаптивными рабочими органами : моногр. Омск : СиБАДИ, 2010. 122 с.
11. Уплотнение и укладка дорожных материалов. Теория и практика / под ред. А. З. Апарцева и др. СПб. : Тест-Принт, 1995. 86 с.
12. Яркин В. В., Петраков А. А., Таран Р. А., Казачек Т. В. Механика грунтов : учеб. пособие / под ред. А. А. Петракова. Макеевка : ДонНАСА, 2004. 164 с.

УДК 624.138.22:629.36.027.72

Мухеев В. В., Савельев С. В.
Mikheyev V. V., Saveliev S. V.

**ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ПНЕВМОШИННЫХ
КАТКОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГРУНТОВЫХ НАСЫПЕЙ С ПОМОЩЬЮ
ПРИМЕНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА**

**EFFICIENT USE OF VIBRATORY PNEUMOWHEEL ROAD ROLLERS FOR DIRT
FILL COMPACTION BY APPLICATION OF WORK TOOLS
OF SPECIAL DESIGN**

В статье обсуждаются перспективные конструкции рабочих органов пневмошинных вибрационных катков, применяемых для уплотнения грунтов в дорожном строительстве. Предлагается новое техническое решение, позволяющее существенно расширить возможности использования пневмошинных катков за счет изменения и регулирования физико-механических характеристик пневмошин при помощи дополнительных металлических бандажей переменного натяжения. Предложенное решение, защищенное патентом РФ, позволяет регулировать жесткость пневмовальцов и осуществлять уплотнение грунтов на всех этапах одной дорожной машиной.

Ключевые слова: уплотнение грунтов, пневмошинный каток, регулируемая жесткость, стальные бандажи.

При строительстве автомобильных дорог и других инфраструктурных объектов отдельное внимание необходимо уделять операциям по уплотнению грунтовых насыпей. Земляное полотно автомобильных дорог и другие насыпи являются основной несущей конструкцией не только для дорожных покрытий, но и различных зданий и инженерных сооружений. Операция по уплотнению грунтов обеспечивает их прочность и устойчивость, и если в процессе этой операции грунтовые слои не приобретают требуемую плотность, то такая насыпь в процессе эксплуатации сооружения будет разрушаться, что приведёт к возникновению убытков и опасных ситуаций. Можно вкладывать сколько угодно финансовых средств и применять самые совершенные технологии при устройстве оснований и покрытий верхних слоёв автодорог, но, если уплотнение грунтовых слоёв земляного полотна было проведено некачественно, вся дорожная конструкция прослужит недолго.

Основные строительные машины, осуществляющие операцию уплотнения, – это дорожные катки различных типов. Основной проблемой для таких машин является то, что существует большое разнообразие типов грунтов, и для их эффективного уплотнения необходимо использовать различные конструктивные типы дорожных катков.

Наиболее простыми уплотняющими машинами являются статические гладковальцовые катки. Их основное преимущество – это простота конструкции. Недостаток – такие катки обладают низкой производительностью.

Более эффективными являются кулачковые статические катки, которые эффективно прорабатывают глинистые грунты, способны частично изменять контактные напряжения за счёт изменяемой глубины погружения кулачков. Несмотря на это производительность таких катков также недостаточно высокая, и в некоторых случаях наблюдается неудовлетворительная ровность уплотнённой поверхности.

Наиболее эффективными из статических катков являются катки на пневматических шинах. Эти машины способны достаточно широко изменять контактные давления за счёт

регулирования площади пятна контакта при изменении давления воздуха в шинах. Данные катки обладают значительными габаритно-массовыми характеристиками, а их производительность несколько ниже, чем у вибрационных катков.

Наиболее производительными катками являются вибрационные катки. За счёт использования вибрации они обладают высоким уплотняющим эффектом при меньших, по сравнению с пневмокатками, габаритно-массовых характеристиках. Основным недостатком вибрационных катков является недостаточный диапазон изменения контактных давлений, поэтому виброкатки также используются совместно с катками других типоразмеров.

Катки комбинированного действия совмещают в себе достоинства разных способов уплотнения, т. к. в них применяется несколько различных рабочих органов. Они обладают высокой производительностью, могут использовать вибрацию и достаточно широко регулировать контактные напряжения при наличии пневматических шин, но и здесь диапазон контактных давлений недостаточен для того, чтобы уплотнять грунты от начальной до требуемой плотности одним катком.

Авторами предлагаются новые технические решения, позволяющие объединить в одном рабочем органе катка преимущества пневматических шин и вибрации. Основная идея в том, чтобы регулировать не только параметры вибрации катка, но и жёсткость самих шин [3–5]. Анализ исследований катков на пневматических шинах показывает, что жёсткость серийных шин лежит в пределах от 500 кН/м до 1000 кН/м. Этого диапазона недостаточно для эффективной работы вибрационных катков с пневматическими шинами, потому что при низкой жёсткости энергия вибровозбудителя вхолостую тратится на деформацию шин [6].

Было установлено, что при увеличении жёсткости пневмошин до 6000 кН/м и выше эффективность использования вибрации существенно возрастает. Возрастает и эффективность уплотнения грунтов вибрационными катками с пневмошинными рабочими органами [1]. Для проведения исследований процесса уплотнения вибрационным пневмошинным катком при строительстве грунтовой насыпи был создан экспериментальный образец такого катка с увеличенным диапазоном жёсткости (рис. 1, 2).



Рис. 1. Испытания вибрационного пневмошинного катка при уплотнении суглинистого грунта в грунтовом канале



Рис. 2. Полевые испытания вибрационного пневмошинного катка при уплотнении супесчаного грунта

Исследования процесса уплотнения различных грунтов выявили существенное отличие рационального диапазона значений жёсткости пневмовальцов для связанных и несвязанных грунтовых сред. На рис. 3, 4 представлены зависимости напряжений от глубины при различной жёсткости рабочего органа [1; 2].

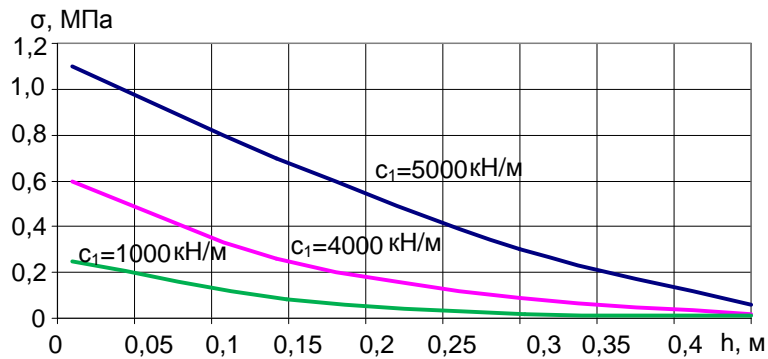


Рис. 3. Зависимость напряжений в суглинистом грунте от глубины слоя грунта при различной жёсткости рабочего органа

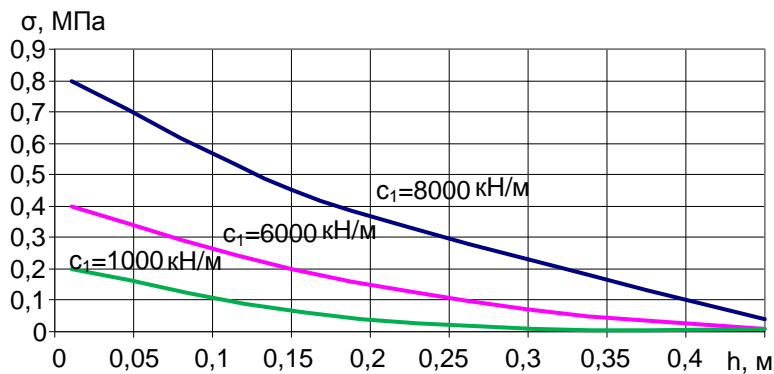


Рис. 4. Зависимость средних напряжений в супесчаном грунте от глубины слоя грунта при различной жёсткости рабочего органа

Для уплотнения суглинистого грунта оптимальной влажности с числом пластичности 7 рациональный диапазон максимальных значений жёсткости вальца составил от 4 000 до 5 000 кН/м, при скорости катка около 4 км/ч. Значения вынуждающей силы вибровозбудителя в этом случае должны быть достаточно высокими: 80–100 кН.

Для уплотнения супесчаного грунта оптимальной влажности процесс интенсивного деформирования соответствует максимальной жёсткости вальца не менее 6 000 кН/м, при скорости катка около 5 км/ч. Значения вынуждающей силы вибровозбудителя в этом случае составляют около 50 кН.

Ещё одна проблема состоит в том, что жёсткость рабочего органа в процессе уплотнения грунтовой насыпи не должна оставаться постоянной, т. к. в начале уплотнения грунт обладает низкой прочностью, т. е. контактные давления не должны быть высокие. Это можно обеспечить деформацией шин – увеличением площади пятна контакта за счёт низкой жёсткости пневмошин. В конце процесса уплотнения грунт становится более прочным, поэтому жёсткость вальца должна обеспечивать высокие контактные давления и эффективность использования вибрации. В результате экспериментальных и теоретических исследований были получены рекомендации жёсткости вибрационных пневмошинных катков для супесчаного и суглинистого грунтов (табл.) [2].

Таблица

Значения жёсткости рабочего органа на разных стадиях процесса уплотнения

Этап процесса уплотнения	Жёсткость РО, кН/м	
	Несвязанный грунт	Связанный грунт
Начальная, $k_v=(0,85 - 0,90)$	600 – 1 000	600 – 1 000
Средняя, $k_v=(0,90 - 0,95)$	4 000 – 5 000	3 000 – 4 000
Заключительная, $k_v = (0,95 - 1,0)$	6 000 – 8 000	4 000 – 5 000

Этапы процесса уплотнения разделены в соответствии с общепринятым показателем качества уплотнения грунтов – коэффициентом уплотнения, который характеризуется отношением текущей плотности к нормативной плотности, полученной стандартным методом.

Изготовлен экспериментальный образец вибрационного катка с пневмошинным рабочим органом, способный изменять жёсткость в диапазоне 500–6 000 кН/м (за счёт изменения давления воздуха в шинах и установки дополнительных металлических бандажей), удельные контактные напряжения – в диапазоне 0,045 – 0,125 МПа.

Получены рациональные значения жёсткости пневмошинных вальцов, обеспечивающие эффективное уплотнение грунтовых насыпей одним катком. Рациональные значения жёсткости рабочего органа при уплотнении суглинистых грунтов до нормативной плотности должны соответствовать от 1 000 до 5 000 кН/м при количестве проходов по одному следу – 10 и скорости катка около 4 км/ч. Значения жёсткости при уплотнении супесчаного грунта должны соответствовать жёсткости от 1 000 до 7 000 кН/м при количестве проходов по одному следу – 6 и скорости движения 5 км/ч.

Работа проводилась в рамках государственных исследований по теме «Развитие теории взаимодействия рабочих органов уплотнителей с деформируемыми средами. Разработка энергоэффективных конструкций дорожных катков» № 1192.

Литература

1. Савельев С. В. Анализ эффективности применения адаптивных катков при уплотнении грунта // Вестн. СибАДИ. Омск : СибАДИ. 2013. № 2 (30). С. 47–51.
2. Савельев С. В., Михеев В. В. Механизация уплотнения грунтовых насыпей вибрационными катками с пневмошинными рабочими органами // Механизация строительства. 2015. № 3. С. 4–7.
3. Saveliev S. V., Lashko A. G. Roll of road roller. Patent № 93090 the Russian Federation. 2010.
4. Saveliev S. V., Zakharenko A. V., Permyakov V. B. Roll of road roller. Patent № 21401 the Russian Federation. 2002.
5. Saveliev S. V. Roll of road roller. Patent № 2341609 the Russian Federation. 2008.
6. Savel'ev S. V., Permyakov V. B., Mikheev V. V. Using the Deformational Properties of Tires in Vibrational Systems // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. №. 2. P. 102–104.

УДК 628.336.32.034.2: 546.56:663.48

*Руденко Е. Ю., Муковнина Г. С., Платова Ю. С., Макарова А. А.,
Шакиров Д. Р., Бейбулатов С. Ю., Макеева Е. Н.
Rudenko E. Yu., Mukovnina G. S., Platova Yu. S., Makarova A. A.,
Shakirov D. R., Beybulatov S. Yu., Makeeva E. N.*

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ ОТРАБОТАННОГО КИЗЕЛЬГУРА НА ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ МЕДИ

VARIOUS DRYING CONDITIONS INFLUENCE OF WASTED KIESELGUHR ON PROCESS OF SEWAGE TREATMENT FROM COPPER

В статье рассматривается влияние различных режимов сушки отработанного кизельгура на процесс очистки сточных вод от меди. Показано, что адсорбционные свойства отработанного кизельгура больше всего увеличиваются в результате его высушивания при температуре 105 °С. Наибольшая адсорбционная способность проявляется у адсорбента, полу-

ченного из 30 г отработанного кизельгура, высушенного при температуре 105 °С, подвергнутого термохимической активации со 100 мл 2,5 М раствора гидроксида натрия при температуре 100 °С в течение 60 мин.

Ключевые слова: отработанный кизельгур, сточные воды, очистка, медь.

Отработанный кизельгур является одним из основных отходов пивоваренного производства. Он состоит из остатков диатомовых водорослей (кизельгура) и органических соединений, осевших на кизельгуре при фильтрации пива: нерастворимых веществ ячменного солода и других злаковых культур, используемых в пивоваренном производстве, клеток пивных дрожжей, белков, высокомолекулярных полимеров глюкозы и других органических веществ, образующихся в процессе производства пива [7]. Долгое время проблема утилизации отработанного кизельгура не беспокоила производителей пива, т. к. пивоваренные предприятия смывали отработанный кизельгур в централизованную канализационную систему, создавая опасность ее засорения и увеличивая минерализацию сточных вод [2; 9]. В настоящее время отработанный кизельгур регенерируют [6], используют в сельском хозяйстве для удобрения почвы [8] или для рекультивации почв, загрязненных нефтью [3], при этом все чаще ведутся поиски новых наиболее рациональных и экономически выгодных методов утилизации или вторичного использования отработанного кизельгура. Путем химической или термохимической активации из отработанного кизельгура получают адсорбенты для очистки промышленных стоков [10–13].

Цель исследования – изучение влияния различных способов сушки отработанного кизельгура на процесс очистки сточных вод от меди.

Методика исследований. В работе использовали отработанный кизельгур влажностью 45–50 %, полученный на одном из пивоваренных предприятий Самарской области.

Высушивание влажного отработанного кизельгура проводили при температуре 105–200 °С до постоянной массы. Для термохимической активации 15–30 г сухого отработанного кизельгура смешивали со 100 мл 2,5 М раствора гидроксида натрия и выдерживали при температуре 100 °С в течение 60 мин. После термохимической модификации отработанный кизельгур пять раз отмывали 100 мл дистиллированной воды, воду отделяли декантацией. Влажный отработанный кизельгур после термохимической активации высушивали при температуре его первоначального высушивания до постоянной массы.

Очистку модельного раствора сточных вод проводили по методу Lu и соавт. [5] в нашей модификации [4]. Для этого в плоскодонной колбе вместимостью 250 мл на лабораторных весах взвешивали 5 г отработанного кизельгура, добавляли цилиндром 70 мл 1 % раствора CuSO_4 . Содержимое колбы перемешивали на магнитной мешалке при комнатной температуре в течение 30 мин. Содержание ионов меди определяли иодометрическим методом [1].

Результаты и их обсуждение. Данные лабораторных исследований зависимости степени удаления меди из модельного раствора сточных вод от соотношения отработанного кизельгура, высушенного при температуре 105 °С, к 2,5 М раствора гидроксида натрия, взятого для термохимической активации отработанного кизельгура при температуре 100 °С в течение 60 минут, свидетельствуют об увеличении адсорбционных свойств отработанного кизельгура по отношению к меди при возрастании этого соотношения. Степень удаления меди из модельного раствора сточных вод увеличивается на 25,64 % при возрастании соотношения отработанный кизельгур / 2,5 М раствор гидроксида натрия (рис. 1).

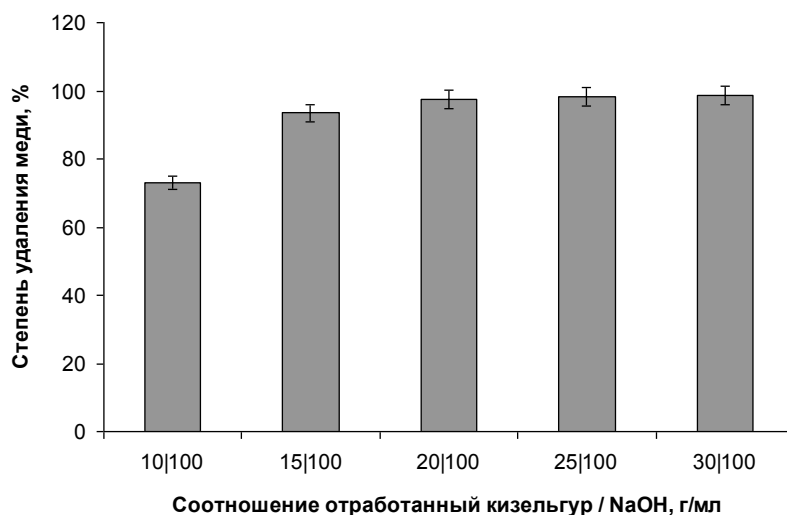


Рис. 1. Зависимость степени удаления меди от соотношения отработанный кизельгур, высушенный при температуре 105 °С / 2,5 М NaOH

Степень удаления меди из модельного раствора сточных вод увеличивается на 32,13 % при возрастании соотношения отработанного кизельгура, высушенного при температуре 130 °С, к 2,5 М раствора гидроксида натрия, использованного для термохимической активации отработанного кизельгура в течение 60 мин при температуре 100 °С (рис. 2).

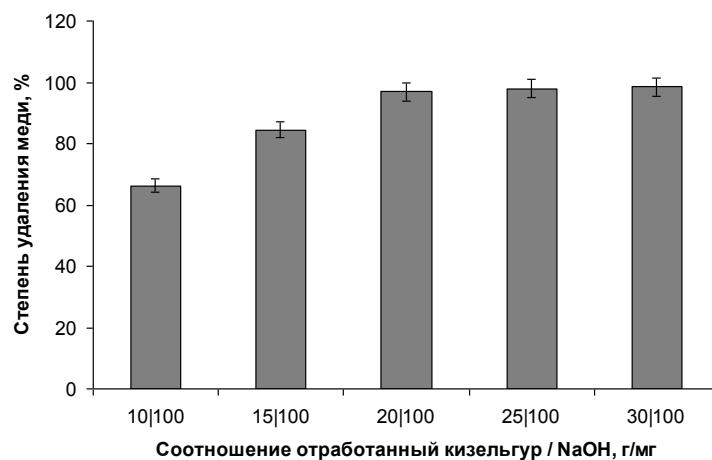


Рис. 2. Зависимость степени удаления меди от соотношения отработанный кизельгур, высушенный при температуре 130 °С / 2,5 М NaOH

Лабораторные исследования показывают увеличение степени удаления меди из модельного раствора сточных вод на 74,62 % при возрастании соотношения отработанного кизельгура, высушенного при температуре 200 °С, к 2,5 М раствора гидроксида натрия, взятого для термохимической активации отработанного кизельгура при температуре 100 °С в течение 60 мин (рис. 3).

Проведенные исследования показали, что отработанный кизельгур, образовавшийся в процессе фильтрации пива, можно использовать для получения адсорбента для очистки сточных вод. Установлено, что наибольшая адсорбционная способность, позволяющая удалить 98,70 % ионов меди из модельного раствора сточных вод, проявляется у адсорбента, полученного из 30 г отработанного кизельгура, высушенного при температуре 105 °С, подвергнутого термохимической активации со 100 мл 2,5 М раствора гидроксида натрия при температуре 100 °С в течение 60 мин.

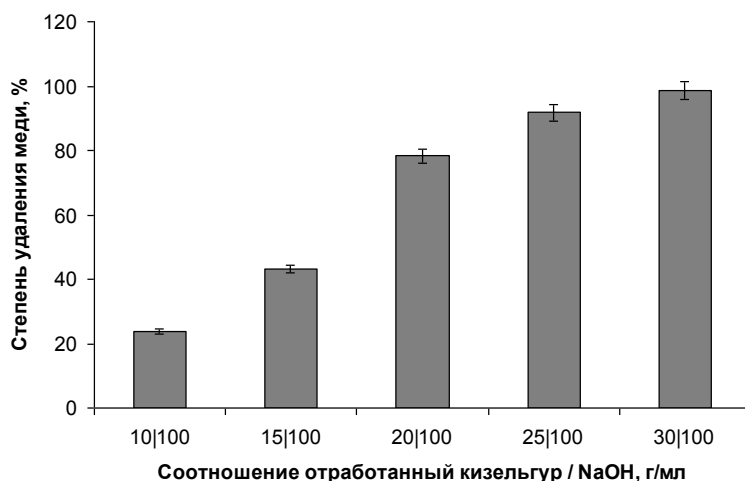


Рис. 3. Зависимость степени удаления меди от соотношения отработанный кизельгур, высушенный при температуре 200 °С / 2,5 М NaOH

Кизельгур, состоящий преимущественно из оксида кремния, с примесями оксидов алюминия и железа, обладает высокой пористостью, поэтому его используют в различных отраслях промышленности, в том числе в пивоварении, в качестве фильтрующего материала, но при этом кизельгур имеет слабую адсорбционную активность [14]. В некоторых исследованиях показано, что адсорбирующая способность отработанного кизельгура имеет более высокие значения, чем у чистого кизельгура. Это обусловлено наличием в отработанном кизельгуре дополнительных адсорбирующих областей вследствие высокого содержания органических веществ, связанных с минеральной кизельгуровой матрицей, образованной раковинами диатомовых водорослей [13]. Результаты исследований, проведенных Tsai и соавторами [10–14] показали, что адсорбционные свойства отработанного кизельгура увеличиваются при его щелочной и кислотной активации [10]. Данные наших исследований не противоречат результатам, полученным Tsai и соавторами [10–14], но позволяют оптимизировать процесс сушки перед проведением термохимической модификации отработанного кизельгура с целью получения из него адсорбента для очистки сточных вод.

Выводы. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что адсорбционные свойства отработанного кизельгура больше всего увеличиваются в результате его высушивания при температуре 105 °С.

Литература

1. Алексеев В. Н. Количественный анализ. М. : Химия, 1972. 504 с.
2. Колпакчи А. П., Голикова Н. В., Андреева О. П. Вторичные материальные ресурсы пивоварения. М. : Агропромиздат, 1986. 160 с.
3. Руденко Е. Ю. Биоремедиация нефтезагрязненных почв органическими компонентами отходов пищевой (пивоваренной) промышленности : автореф. дис. ... д-ра. биол. наук. Владимир, 2015. 32 с.
4. Руденко Е. Ю., Муковнина Г. С. Экологическая биотехнология : лаборатор. практикум. Самара : СамГТУ, 2014. 76 с.
5. Lu S., Gibb S. W. Copper removal from wastewater using spent-grain as biosorbent // *Bioresour Technol.* 2008. V. 99. P. 1509–1517.
6. Russ W. Examples of special case studies in different branches // *Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry.* New York : Springer Science ; Business Media ; LLC. 2007. P. 259–272.
7. Russ W., Mörtel H., Meyer-Pittroff R., Babeck A. Kieselguhr sludge from the deep bed filtration of beverages as a source for silicon in the production of calcium silicate bricks // *J Eur Ceram Soc.* 2006. V. 26. P. 2547–2559.

8. Schildbach D. Process for the disposal and use of waste kieselguhr from the beverages industry with the aid of a biological soil/plant filter system : Patent DE 3701346.1988.
9. Schmid N. A. Verbesserung der filtrationstechnischen Eigenschaften von Filterhilfsmitteln durch ein thermisches Verfahren // Dokt Ing. Munchen, 2002. 191 s.
10. Tsai W. T., Hsien K. J., Chang Y. M., Lo C. C. Removal of herbicide paraquat from an aqueous solution by adsorption onto spent and treated diatomaceous earth // Bioresour Technol. 2005. V. 96. P. 657–663.
11. Tsai W. T., Hsien K. J., Lai C. M. Chemical activation of spent diatomaceous earth by alkaline etching in the preparation of mesoporous adsorbents // Ind Eng Chem Res. 2004. V. 3. P. 7513–7520.
12. Tsai W. T., Hsien K. J., Yang J. M. Silica adsorbent prepared from spent diatomaceous earth and its application for removal of dye from aqueous solution // J Colloid Interface Sci. 2004. V. 275. P. 428–433.
13. Tsai W. T., Hsu H. C., Su T. Y., Lin K. Y., Lin C. M. Removal of basic dye (methylene blue) from wastewaters utilizing beer brewery waste // J Hazard Mater. 2008. V. 154. P. 73–78.
14. Tsai W. T., Lai C. M., Hsien K. J. Characterization and adsorption properties of diatomaceous earth modified by hydrofluoric acid etching // J Colloid Interface Sci. 2006. V. 297. P. 749–754.

УДК 69.01:621.869.888

*Славгородский С. А.
Slavgorodskiy S. A.*

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОРСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИ СОЗДАНИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ
В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

**PROSPECTS FOR USE OF SHIPPING CONTAINERS IN INFRASTRUCTURE
CONSTRUCTING IN THE FAR NORTH**

В статье рассматриваются вопросы актуальности использования грузовых морских контейнеров в строительстве в условиях Крайнего Севера. Описана история применения контейнеров для строительства. Приведены примеры применения грузовых контейнеров для различных видов строительства в России и за рубежом. Рассмотрены композиционные возможности в архитектуре различных зданий, а также типологические возможности контейнерного строительства. Определены проблемы, пути их решения и перспективы применения контейнеров для строительства в Российской Федерации.

Ключевые слова: строительство, грузовые морские контейнеры, Крайний Север.

Ускоренное развитие Севера и особенно арктической зоны является на сегодняшний день приоритетной задачей в Российской Федерации. Это связано с открытием новых месторождений нефти и газа, развитием Северного морского пути, климатическими изменениями. Основные задачи на перспективу изложены в Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г.

В частности, в Стратегии предусматривается:

- а) модернизация объектов социальной инфраструктуры, включая образовательные учреждения, организации здравоохранения и культуры, а также развитие жилищного строительства, в том числе в рамках реализации приоритетных национальных проектов;
- б) обновление и модернизация жилищного фонда, основных фондов жилищно-коммунального хозяйства на основе современных энергосберегающих технологий;

в) активное формирование в городах, малых селах и поселках новых доступных для всех слоев населения многофункциональных и мобильных учреждений культуры (социально-культурные центры, культурно-спортивные комплексы, информационные интеллект-центры, мобильные библиотеки).

Одним из вариантов быстрого и изящного решения вышеперечисленных задач представляется вариант вторичного использования грузовых контейнеров, давно известного и в России, но более активно и разнообразно представленного за рубежом.

История возникновения домов из контейнеров. Неизвестно, кому впервые пришла идея возведения дома из обычного морского контейнера, но активно популяризировать данный вид строительства стал американский архитектор Kalkin Adam. Первый широко известный жилой дом из контейнеров появился благодаря именно этому человеку. Создан он был из трех морских контейнеров в качестве творческого эксперимента. Приобрести бывшие в употреблении, списанные морские контейнеры оказалось просто и дешево. Строительство дома не потребовало больших финансовых вложений, а на территориях с частыми торнадо дома из контейнеров стали востребованными.

Сегодня многие архитекторы и дизайнеры продолжают создавать строения из грузовых контейнеров, воплощая свои творческие амбиции в жилых и общественных зданиях. Известны постройки из контейнеров, которые служат не только в качестве жилых домов, но и являются гостиничными комплексами, офисными и торговыми зданиями, ресторанами. Такое строение не сложно демонтировать и перевезти на другое место, что тоже немаловажно.

В мире известно немало строений из отслуживших морских контейнеров, которые отличаются экологичностью, простотой, но не лишены комфорта и привлекательности. Дизайн сооружений отличается креативностью, что привлекает посетителей. Грузовые контейнеры набирают все большую популярность в строительстве зданий. Но если раньше из них делали лишь компактные временные конструкции, то сейчас из этого материала воздвигают достаточно большие и сложные сооружения.

Габариты морских грузовых контейнеров во всем мире унифицированы единым стандартом для возможности их транспортировки не только водным, но другими видами транспорта: железнодорожным, автомобильным, воздушным. Стандартный 40-футовый грузовой морской контейнер имеет следующие внутренние габариты: длина – 12 032 мм, ширина – 2 352 мм, высота – 2 393 мм. Грузовой 20-футовый почти вдвое короче, его длина составляет 5 898 мм. Высота контейнера High Cube составляет 2 698 мм (рис. 1).

В СССР на основе контейнеров проектировались экспериментальные мобильные здания. Основным разработчиком таких проектов в те годы был ЛенЗНИИЭП. Однако широкого распространения такие здания не получили.

В настоящее время в Российской Федерации грузовые контейнеры широко применяются в основном при возведении различных инженерных сооружений, таких как: блочно-модульные котельные; блочно-модульные насосные станции водоснабжения и водоотведения; станции водоподготовки; блочно-модульные станции очистки сточных вод; блочно-модульные станции пожаротушения; блочно-модульные мини-цеха по переработке молока; блочно-модульные пекарни (рис. 2). Достаточно активно контейнеры применяются при возведении и административно бытовых зданий. Как правило, это простые здания: посты охраны, КПП, бытовки, душевые и др.

Использование модульных зданий для временного проживания персонала очень удобно и экономически выгодно, с помощью контейнерных конструкций легко решается вопрос по обеспечению персонала жильем в месте непосредственного проведения работ. Модульные здания-общежития комфортабельны, обладают всеми необходимыми системами жизнеобеспечения, удобствами и оборудованием. Конструкция модульных общежитий позволяет перевозить их с одного места на другое. Общежития выполняются в один или несколько этажей. Часто здания общежитий разделяются на несколько зон, т. е. отделяются друг от друга помещения для проживания и помещения для отдыха.



CONTAINER SPECIFICATIONS

Container sizes are for planning purposes only. Actual container specs may vary slightly by manufacturer. Please contact ATS International for actual available sizes.

<p>20' Dry Freight Container</p> <p>Payload: 38,600 lbs. 17,508 kgs.</p> <p>Cubic Capacity: 1,164 cu. ft. 32.96 cbm.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 19' 5" Width: 7' 8 3/8" Height: 7' 9 5/8"</p> 	<p>40' High Cube Container</p> <p>Payload: 45,200 lbs. 20,502 kgs.</p> <p>Cubic Capacity: 2,700 cu. ft. 76.46 cbm.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 39' 3/8" Width: 7' 8 3/8" Height: 8' 8"</p> 
<p>20' Open Top Container</p> <p>Payload: 38,100 lbs. 17,282 kgs.</p> <p>Cubic Capacity: 1,126 cu. ft. 31.88 cbm.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 19' 5" Width: 7' 8 1/8" Height: 7' 9 5/8"</p> 	<p>40' Open Top Container</p> <p>Payload: 45,250 lbs. 20,525 kgs.</p> <p>Cubic Capacity: 2,295 cu. ft. 64.99 cbm.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 39' 6 1/8" Width: 7' 8 3/4" Height: 7' 5 7/16"</p> 
<p>20' Collapsible Flat Rack</p> <p>Payload: 39,160 lbs. 17,762 kgs.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 19' 6" Width: 7' 5" Height: 6' 9 3/4"</p> 	<p>40' Collapsible Flat Rack</p> <p>Payload: 55,600 lbs. 25,219 kgs.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 39' 7" Width: 8' 0" Height: 6' 9 3/4"</p> 
<p>20' Reefer Container</p> <p>Payload: 38,118 lbs. 17,290 kgs.</p> <p>Cubic Capacity: 950 cu. ft. 26.90 cbm.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 17' 10" Width: 7' 4 1/16" Height: 7' 3 1/2"</p> 	<p>40' High Cube Reefer Container</p> <p>Payload: 57,120 lbs. 25,909 kgs.</p> <p>Cubic Capacity: 1,942 cu. ft. 54.99 cbm.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 38' 0" Width: 7' 6" Height: 8' 4"</p> 
<p>48' High Cube Container</p> <p>Payload: 46,300 lbs. 21,101 kgs.</p> <p>Cubic Capacity: 3,470 cu. ft. 98.26 cbm.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 47' 5" Width: 7' 8 3/8" Height: 8' 10"</p> 	<p>53' Dry Container</p> <p>Payload: 46,000 lbs. 20,865 kgs.</p> <p>Cubic Capacity: 3,982 cu. ft. 112.76 cbm.</p> <p><u>Interior Specifications</u> Length: 52' 5" Width: 8' 2" Height: 9' 2"</p> 

725 Opportunity Drive • St. Cloud, MN 56301 • 866-854-2747 • www.atsintlinc.com

Рис. 1. Габариты морских грузовых контейнеров

Обеспечение персонала вахтового поселка комфортными условиями приема пищи также часто решается с помощью быстровозводимых модульных зданий. В зависимости от площади объекта и количества людей такая столовая может состоять как из одного, так и из ряда готовых модулей, сблокированных между собой.



Рис. 2. Российский опыт контейнерного строительства

Производство такого типа быстровозводимых зданий в основном сосредоточено на небольших предприятиях малого и среднего бизнеса. Такие предприятия, производящие быстровозводимые здания контейнерного типа, работают и на территории Уральского Федерального округа, например, компания Профи-Модуль из Тюмени.

Однако морские контейнеры пригодны не только для строительства временных зданий и сооружений бытового, производственного или складского назначения. Заграничная мода на контейнерные дома дошла и до России. Дома из контейнеров начали строить не только в портовых городах, где подержанный морской контейнер можно приобрести относительно недорого, но и практически во всех регионах. Такое жилье можно было соорудить очень быстро, особенно в условиях теплого климата. Стоимость модульного здания из контейнеров очень зависит от цены на сами контейнеры – основной строительный материал. И хотя в основном дома из контейнеров строятся на дачных участках, прослеживается тенденция к строительству коттеджей и для постоянного проживания. Редко, но встречаются и примеры креативного подхода к архитектуре частных домов в нашей стране (рис. 3).

Однако, к сожалению, практически вся продукция отечественных производителей архитектурно невыразительна, скучна и непривлекательна. В лучшем случае наблюдаются попытки работы с цветом. В части архитектурной выразительности сборных контейнерных зданий Россия сильно отстает от своих западных коллег.

Современная зарубежная архитектура зданий из контейнеров. Современная западная контейнерная архитектура просто изобилует своим разнообразием. Это уже не просто поставленные в ряд контейнеры, а очень интересные композиции с самыми разнообразными вариантами расположения контейнеров не только по горизонтали, но и в вертикальной плоскости (рис. 4). Причем иногда формы могут быть настолько необычны, что остаётся только удивляться неистощимой фантазии зодчих.



Рис. 3. Коттедж из контейнеров, Россия



Рис. 4. Зарубежная архитектура зданий из контейнеров

Современная типология зданий из контейнеров. Современная зарубежная архитектура контейнерных зданий поражает не только необычными формами. Обширная типология зданий с различным и самым неожиданным функциональным содержанием характерна для современного строительства из контейнеров за рубежом, причем не только в развитых странах, но и в развивающихся. Рассмотрим некоторые примеры такого строительства.

Индийская научно-исследовательская станция Бхарти в Антарктиде (рис. 5) построена из 134 грузовых контейнеров. Этот строительный материал дешев в плане доставки, а также можно использовать контейнеры, в которых были привезены продукты, вещи и техника.



Рис. 5. Индийская станция в Антарктиде

Чтобы получилась станция Бхарти, грузовые контейнеры были соединены между собой в единый двухэтажный комплекс общей площадью 2 500 кв. м. В нем есть жилые комнаты в общей сложности на 50 человек, кухня, столовая, библиотека, тренажерный зал, офисы, гостиная и, конечно же, лаборатории. Внешне станция обернута изоляционной металлической «кожей», защищающей ее от ветра и холода.

Container City (рис. 6) был одним из первых крупных архитектурных сооружений, построенных из грузовых контейнеров. Это четырехэтажное здание было возведено в Лондоне в 2001 г. из двадцати упомянутых конструкций. В нем расположились жилые квартиры, офисные помещения и несколько магазинов.

Контейнеры не являются основой конструкции Mill Junction – нового общежития в Йоханнесбурге (рис. 7). Это здание является старым элеватором, перестроенным недавно в жилье для студентов. Но при реконструкции активно было задействовано в качестве надстройки несколько десятков грузовых контейнеров. Сейчас в бывшем элеваторе живет 375 студентов одного из вузов Йоханнесбурга. Возведение этого необычного сооружения обошлось в десять раз дешевле, чем если бы его строили по традиционным технологиям.



Рис. 6. Container City – жилой комплекс в Лондоне



Рис. 7. Mill Junction – студенческое общежитие в Йоханнесбурге

В отличие от Йоханнесбурга, где грузовые контейнеры стали лишь частью большого общежития, во французском городе Гавр появился большой студенческий жилой комплекс (рис. 8), полностью выполненный из этих объектов. Студенческий городок Cite A Docks представляет собой два здания из грузовых контейнеров, в которых могут жить в общем 100 человек. У каждого из обитателей есть собственная комната площадью 24 м² с кухней и туалетом.

На окраине Тель-Авива, на территории бывшей свалки сейчас идут работы по созданию нового парка, который получит имя в честь израильского военачальника и политика

Ариэля Шарона. Одним из важных элементов этой зоны отдыха станет мост длиной 160 м, возведенный из разноцветных грузовых контейнеров (рис. 9). EContainer bridge – это мост исключительно для пешеходов и велосипедистов. На нем будет расположено две смотровых площадки, с которых откроются отличные виды на парк Ариэля Шарона и Тель-Авив.



Рис. 8. Cite A Docks – общежитие во Франции



Рис. 9. EContainer bridge – мост в Израиле

В 2011 году на территории Шанхая была открыта самая большая в городе ферма, занимающаяся выпуском органической продукции – овощей и фруктов. При этом офис Tony's Farm разместился в здании площадью 1060 квадратных метров, созданном из 78 грузовых контейнеров (рис. 10). Визуально использование контейнеров практически незаметно, особенно внутри.

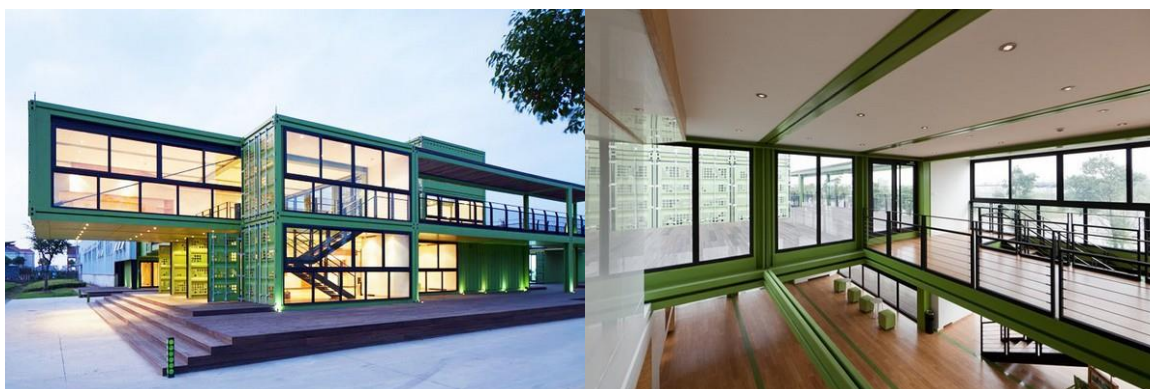


Рис. 10. Tony's Farm. Шанхай, Китай

Sanlitun South – это многофункциональный комплекс в Пекине, созданный из нескольких сотен морских контейнеров (рис. 11). Это целый город, состоящий из торговых, офисных, гостиничных и жилых помещений, расположенных вдоль крытой улицы.

Территория Sanlitun South занимает целый квартал китайской столицы. Это одно из самых больших сооружений из грузовых контейнеров во всем мире.

В июле 2012 г. в Берлине открылся достаточно необычный общественный центр, здание которого было создано из 33 грузовых контейнеров. Platoon Kunsthalle – это место для организации и проведения культурных мероприятий, выставок, концертов, лекций, семинаров, видеопозаказов и других мероприятий (рис. 12). Общая площадь этого четырехэтажного здания составляет более двух тысяч квадратных метров. Брат-близнец берлинского общественного центра Platoon Kunsthalle появился затем и в Сеуле.



Рис. 11. Sanlitun South – многофункциональный комплекс в Пекине



Рис. 12. Platoon Kunsthalle – общественный центр в Берлине

Здание с названием Hive-Inn планируют построить в Гонконге по проекту архитектурной компании OVA Studio (рис. 13). Пока это лишь планы, реализация которых начнется нескоро. Но возможно, это будет первый в мире небоскреб из грузовых контейнеров.



Рис. 13. Hive-Inn – проект первого небоскреба из грузовых контейнеров

Внутри Hive-Inn разместятся гостиничные номера, жилые квартиры, офисные и торговые помещения, а также временный приют для обездоленных или попавших в беду людей. Конструкция здания подразумевает, что его этажность можно будет увеличивать и уменьшать в зависимости от текущих потребностей.

Преимущества зданий, возводимых из контейнеров:

Стандартизация. Контейнеры относятся к высокоунифицированным изделиям, причем стандартизация является общемировой.

Конструкция. Контейнеры изготавливаются из высоколегированной конструкционной стали. В обшивке контейнера можно вырезать сколь угодно большие поверхности не нарушая жесткость конструкции, что позволяет стыковать модули и получать помещения большей площади. Таким образом можно выстраивать сколь угодно большие по квадратуре здания. Количество этажей ограничивается допустимой нагрузкой для конкретного контейнера.

Быстрота возведения. Скорость постройки контейнерного здания вне конкуренции относительно традиционного строительства, при этом, как правило, не требуется каких-либо специальных знаний, что определяет относительно дешевую стоимость монтажных работ.

Транспортировка. Контейнеры могут доставляться к месту строительства самыми разнообразными видами транспорта.

Стоимость. Здание из блок-контейнеров стоит намного дешевле, чем аналогичное кирпичное или крупнопанельное.

Существующие проблемы. Широкое распространение в России строительство из грузовых контейнеров не получило в силу объективных и субъективных причин.

Техническое регулирование в РФ на сегодня не рассматривает грузовой контейнер как материал или конструкцию, предназначенную для строительства, как кирпич, панель или любые другие конструкции, характерные для традиционного строительства.

Применение контейнеров в России ограничивается, как правило, в основном зданиями и сооружениями временного назначения, сооружениями инженерной инфраструктуры (котельные, насосные и т. д.), т. е. теми объектами, постановка на кадастровый учет которых необязательна. Строительство же объектов недвижимости связано с требованиями обязательного наличия проектной документации, заключения экспертизы, необходимых расчетов и т. д. Всё это замыкается на практически отсутствующую нормативно-техническую базу: СНиПы, ГОСТы и т. д.

За рубежом уже появились программы для проектирования домов из контейнеров, например 3D Shipping Container Home Design Software. И хотя программа очень простая и в основном предназначена для дизайна, она содержит в себе основы, не позволяющие делать грубые ошибки при проектировании зданий из грузовых контейнеров. К сожалению, ничего подобного отечественная отрасль на сегодня предложить не может.

Перспективы. Для того чтобы здания из контейнеров заняли достойное место в отечественной архитектуре и строительстве, представляется необходимым выполнение следующего комплекса мероприятий:

1. Разработка математических моделей с целью создания методик расчета зданий из контейнеров.
2. Разработка и внедрение нормативно-технической базы (СНиПы, рекомендации, типовые проекты, альбомы типовых решений узлов и т. д.).
3. Создание отечественных программных продуктов конкретно предназначенных для проектирования контейнерных зданий.
4. Опытное и экспериментальное строительство.
5. Популяризация данного типа строительства.

Литература

1. Асаул А. Н., Казаков Ю. Н., Пасяда Н. И., Денисова И. В. Теория и практика малоэтажного жилищного строительства в России / под ред. А. Н. Асаула. СПб.: Гуманистика, 2005. 563 с.
2. Контейнеры. Москва: Торговый Дом Металлов, 2009. 112 с.
3. Сапрыкина Н. А. Мобильное жилище для Севера. Л. : Строиздат. 1986. 216 с.

УДК 556.536.2:531.32

Соколов С. Б.
Sokolov S. B.

О СКОРОСТИ ДЛИННЫХ ВОЛН В РУСЛАХ СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ СЕЧЕНИЯ

ON THE CELERITY OF LONG WAVES IN COMPOUND CHANNELS

Реализация инфраструктурных проектов на территориях, изобилующих водными объектами, требует знания особенностей их гидрологического режима и поведения в периоды резкого изменения параметров течения, например, при прохождении волн паводков. На их распространение существенно влияет сложная форма сечения естественных русел, которая включает пойменные участки при подъеме уровня воды. В работе рассматривается приближенный метод определения скорости положительных длинных волн в руслах со сложной формой поперечного сечения. Метод основывается на информации о геометрических параметрах поперечного сечения потока.

Ключевые слова: неустановившееся течение жидкости, длинная волна, скорость волны, комбинированное сечение.

Введение. При реализации инфраструктурных проектов на территориях с большим количеством водных объектов важно знать особенности их гидрологического режима. Особенный интерес представляет информация об изменении уровней и расхода воды водотоков в период паводков, когда течение в русле является неустановившимся и имеет характер волнового процесса.

Волны паводков и попусков из водохранилищ относятся к категории длинных волн перемещения и по гидравлической классификации являются волнами наполнения [8], т. е. сопровождаются повышением уровня и расхода воды. Одним из важнейших параметров подобных процессов является скорость распространения волны паводка вдоль русла. Скорость волны определяет время добегания пика волны и ее отдельных фаз от одного створа реки до другого и время наступления максимальных уровней и расходов.

При подъеме уровня воды во время прохождения длинных волн в естественных руслах поток может оставаться в пределах речного русла, а может выходить за его границы и затапливать пойму реки. Живое сечение потока при этом резко изменяется по форме и включает наиболее глубокую часть в зоне основного русла и мелководные участки по сторонам от него. Русла также могут иметь асимметричную форму сечения. Эти особенности характерны для всех естественных русел, что представляет существенные трудности для описания и математического моделирования потоков в них. Под сложными сечениями в данной работе понимаются живые сечения сложной геометрии, свойственные руслам с поймой, т. е. имеющие участки с разным характером распределения глубин.

Для волн перемещения характерно, что изменения, передаваемые волной, ограничиваются состоянием не только свободной поверхности жидкости в русле, но и параметрами течения по всему сечению русла. При этом движение жидкости происходит в форме течения, и общий волновой характер процесса не всегда может наблюдаться непосредственно. В условиях стационарного попуска воды в целом неустановившееся движение жидкости может иметь или стремиться к фазе установившегося течения, называемую кинематической волной [6; 9], которая представляет собой область тела волны. Анализ такого движения с точки зрения распространения механической энергии жидкости дает основания интерпретировать не

только фронт волны, но и тело волны как непрерывную последовательность отдельных плоских волн, которые являются фазами всей волны [3]. Каждая из этих фаз переносит определенные импульс и энергию, а между такими характеристиками, как средняя скорость течения, высота волны и скорость отдельной фазы существует строгая зависимость, связанная с условием несжимаемости жидкости.

Скорость волны, как установлено экспериментами [10], существенно зависит от формы сечения русла. Эта зависимость исследовалась теоретически [2; 7]. В [3] был предложен общий метод, позволяющий получить аналитические решения для скорости длинной волны, бегущей в неподвижной воде в горизонтальном канале.

Скорость волны. Полученная ранее формула связывает скорость волны наполнения с энергией, которая этой волной переносится:

$$c^2 = \frac{2}{\rho} \frac{e_U}{\left(1 - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости; e_U – осредненная по сечению плотность потенциальной энергии жидкости; ω_0, ω – площадь живого сечения в исходном состоянии и при прохождении волны наполнения, соответственно.

Учитывая, что разные фазы волны имеют разную энергию, зависимость характеризует фазовую скорость. Она является общей для русел с разной формой сечения.

В формуле (1) под потенциальной энергией жидкости понимается энергия объема воды V , находящейся между двумя близко расположенными (на малом расстоянии Δl) сечениями русла так, что $V = \omega \cdot \Delta l$. Эта энергия обусловлена деформацией объема V по сравнению с исходным недеформированным состоянием (рис. 1). Значение энергии U определяется работой, которая может быть совершена, когда деформированный объем жидкости с глубиной h и площадью сечения ω возвращается в состояние устойчивого равновесия с некоторой глубиной h_0 и площадью сечения ω_0 :

$$U = \int_x^{x_0} (F - F_0) dx. \quad (2)$$

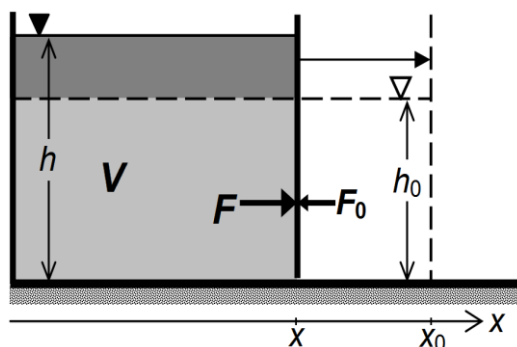


Рис. 1. К определению потенциальной энергии деформированного объема жидкости, согласно (2). Потенциальная энергия равна работе, которая будет совершена равнодействующей сил F и F_0 при переходе жидкости объемом V из деформированного состояния с глубиной h

Для объема с прямоугольной формой сечения решение интеграла (2) имеет вид:

$$U = \rho g \frac{(h - h_0)^2}{2h} V, \quad (3)$$

вывод которого приведен в [5]. Это количество пропорционально величине объема V , что позволяет легко получить ее значение, приведенное к объему, т. е. среднюю плотность потенциальной энергии, выражение которой здесь имеет вид:

$$e_U = \rho g \frac{(h-h_0)^2}{2h} \quad (4)$$

Значение U зависит от геометрической формы объема жидкости, т. е. от формы поперечного сечения русла, как и соотношение площадей в формуле (1). Скорость волны наполнения поэтому также зависит от формы поперечного сечения. Для простейших частных случаев призматических русел – с прямоугольным и треугольным сечениями [4] – формула (1) преобразуется к частным вариантам, которые совпадают с экспериментальными формулами Рассела [11] для обоих видов сечений, полученными при исследовании уединенной волны. Это обстоятельство дает основания предполагать общий характер формулы и использовать ее для анализа зависимости скорости длинных волн перемещения в горизонтальных каналах с различной геометрией. Возможности расширяются, если форму поперечного сечения русла задавать математически, например, предложенными в [7] общими параболическими зависимостями

$$\begin{aligned} \omega &= Ah^n, \\ y &= ax^k, \end{aligned} \quad (5)$$

которые описывают соответственно площадь сечения и его контур (рис. 2). Здесь h – максимальная глубина в сечении; x, y – координаты уреза воды с началом координат в точке с наибольшей глубиной; A, a, n, k – коэффициенты. Несмотря на то, что формы поперечного сечения, близкие к сечениям естественных русел, получаются только при определенных комбинациях числовых коэффициентов a и k , влияние формы сечения на скорость распространения длинных волн и их фаз удастся проанализировать в большом диапазоне изменения геометрических параметров, предоставляя также возможность и для экспериментальной проверки. Для заданной таким образом формы русла была получена общая формула для плотности потенциальной энергии жидкости и вариант формулы (1).

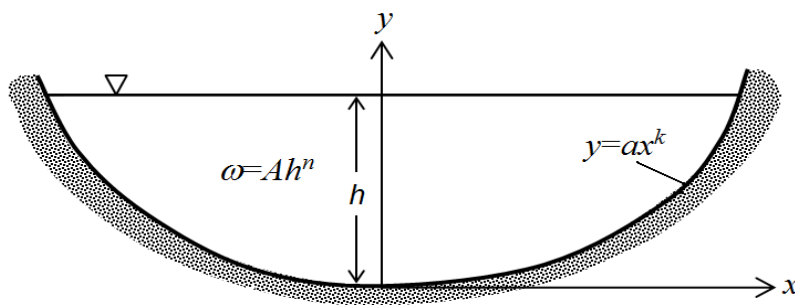


Рис. 2. Параболическое сечение. Общий случай

Задание формы сечения аналитическими зависимостями позволило расширить круг рассматриваемых типов русла, не ограничиваясь цилиндрическими. Например, при значениях коэффициента k , входящего в формулу $y = ax^k$, меньших единицы ($k < 1$), и определенном сочетании с коэффициентом a , сечение оказывается сложным по форме и близким к естественным руслам с поймой (см. например, в [3]). По расчетам «нецилиндрическая» форма сечения должна приводить к уменьшению скорости распространения волн перемещения на 40–50 % по сравнению со случаем прямоугольного канала. Полученные результаты хоро-

шо согласуются с эмпирическими оценками течений в естественных условиях, хотя различаются в обосновании имеющегося эффекта. Обычно уменьшение скорости распространения длинных волн при подъеме уровня воды и выходе воды на пойму объясняется повышенной шероховатостью поверхности, по которой происходит движение. Однако по результатам проведенного анализа в данном случае первичной причиной представляется именно форма живого сечения потока.

Возможность проанализировать влияние формы сечения русла на скорость распространения длинных волн за счет аналитического описания формы, тем не менее, не решает в полной мере задачи расчета такой скорости для сложных русел неправильной формы (compound channels). Одно из продолжений в этом направлении может состоять в том, чтобы представить сложное сечение русла комбинацией полигонов простых геометрических форм и определять значения плотности энергии e_U для всего полигонального поперечного сечения. Однако трудоемкость такого подхода представляется серьезным ограничением в его реализации по сравнению с более простыми, хотя и менее точными, методами, которые, тем не менее, могут удовлетворять запросам практики. Далее предлагается метод приближенного расчета скорости длинных волн в руслах с поперечным сечением сложной геометрии, асимметрией, включающим возможные пойменные участки и т. п.

Методический подход. Предлагаемый метод основывается на том, что потенциальную энергию элемента длинной волны можно выразить разными формулами. Это обстоятельство позволяет выбрать для расчета ту из них, для которой проще и удобнее получить на практике исходные данные.

В работе [10] значение потенциальной энергии уединенной волны определялось как

$$U = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} g \eta^2 dx, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения; η – высота волны вдоль профиля ($\eta = 0$ при $x = \pm\infty$).

Интеграл (6) является эквивалентным выражению

$$U = \rho g Y_c \cdot V^*, \quad (7)$$

где V^* – объем волнового возмущения, который находится выше уровня невозмущенной жидкости; Y_c – высота центра тяжести этого волнового возмущения над начальным уровнем воды.

В формуле (7) плотность энергии есть

$$\rho g Y_c,$$

из чего следует, что потенциальная энергия оценивается как энергия *только* волнового возмущения, т. е. того объема воды, который оказался выше начального уровня воды в канале.

Для канала с прямоугольным сечением предложенный способ оценки потенциальной энергии приводит к следующим зависимостям. Если некоторое количество воды объемом V между двумя близко расположенными сечениями деформировать, сблизив эти сечения, уровень воды в этом объеме поднимется выше уровня в исходном состоянии (рис. 3). Выражая потенциальную энергию по аналогии с (7), получим

$$U = \rho g \frac{h - h_0}{2} V^*, \quad (8)$$

где h_0 и h – глубина воды в исходном и деформированном состоянии соответственно; V^* – объем воды, «вытесненный» из канала и оказавшийся выше исходного уровня воды.

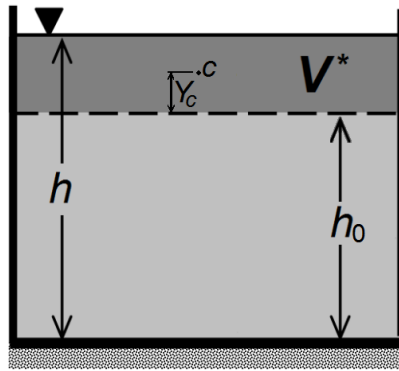


Рис. 3. Обозначения к формулам (8)–(9).

Потенциальную энергию всего объема жидкости можно определить через энергию объема возмущения V^* в зависимости от высоты Y_c расположения его центра тяжести (точка c) над уровнем невозмущенной жидкости

В уравнении (8) высота центра тяжести объема воды V^* равна

$$Y_c = \frac{h - h_0}{2}, \quad (9)$$

а средняя плотность энергии, приведенная к объему V^* , тогда представляется как

$$e_U^* = \rho g \frac{h - h_0}{2}. \quad (10)$$

Для объема воды в канале с прямоугольным сечением выражения (3) и (8) являются тождественными. Поэтому значения плотности энергии в выражениях (4) и (10) обратно пропорциональны объемам жидкости, по отношению к которым они определяются,

$$e_U = e_U^* \frac{V^*}{V}. \quad (11)$$

В канале с постоянной формой сечения, где возмущенный объем между двумя сечениями определяется, как $\omega \cdot \Delta l$, а $V^* = (\omega - \omega_0) \cdot \Delta l$, соотношение объемов в выражении (11) удобно заменить через соотношение площадей сечения для двух состояний

$$\frac{V^*}{V} = 1 - \frac{\omega_0}{\omega}. \quad (12)$$

Заменяя e_U в формуле (1) ее выражением (11) и с учетом (12) получим

$$c^2 = \frac{2}{\rho} \frac{e_U^*}{\left(1 - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}. \quad (13)$$

Проведем замену

$$\omega - \omega_0 = \omega^*, \quad (14)$$

где ω^* – часть площади живого сечения, которая соответствует волновому возмущению и находится выше начального уровня воды.

Тогда квадрат скорости волны оказывается обратно пропорциональным той доле, которую занимает в общей площади сечения его часть, соответствующая волновому возмущению

$$c^2 = \frac{2}{\rho} e_U^* \frac{\omega}{\omega^*}. \quad (15)$$

Таким образом, появляется возможность оценить фазовую скорость волны, определив значение e^* для той части живого сечения, которая находится выше исходного уровня воды в канале.

Оценка значения e^* через высоту Y_c центра тяжести волнового возмущения над начальным уровнем воды (7) представляется логичной независимо от формы сечения русла. Очевидно, что выражение (12) тоже справедливо для русла с поперечным сечением любой формы, а не только прямоугольной.

Для проведения расчета по приближенному методу необходимо вычислить высоту центра тяжести Y_c той части живого сечения, которая располагается выше начального уровня воды, над этим уровнем. Тождественность формул (15) и (1) для призматических русел заданной формы сечения (например, прямоугольных, треугольных, трапецидальных лотков и каналов) обоснована выше. Проверка формулы (15) для типов русел, сечение которых описывается зависимостями (5), показала полное совпадение с результатами, полученными с использованием формулы (1), что является важным обоснованием для предлагаемого метода.

Следующим шагом для практического использования метода является упрощение, которым часть живого сечения, расположенная выше начального уровня воды, по форме представляется перевернутой трапецией или близка к ней (рис. 4). В этом случае следует найти высоту центра тяжести перевернутой трапеции, которая определяется по формуле

$$Y_c = \frac{\Delta h}{3} \frac{B_0 + 2B}{B_0 + B}, \quad (16)$$

где $\Delta h = h - h_0$ – высота волны, измеряемая от начального уровня воды; B_0, B – ширина живого сечения поверху при начальном уровне воды и при прохождении волны напоявления, соответственно.

Значения ширины русла B_0, B так же, как и площади ω, ω^* могут быть получены непосредственными измерениями.

При расчетах по приближенному методу, проведенных для сечений, заданных формулами (5), погрешность составила не более 4 % по сравнению с точными решениями.

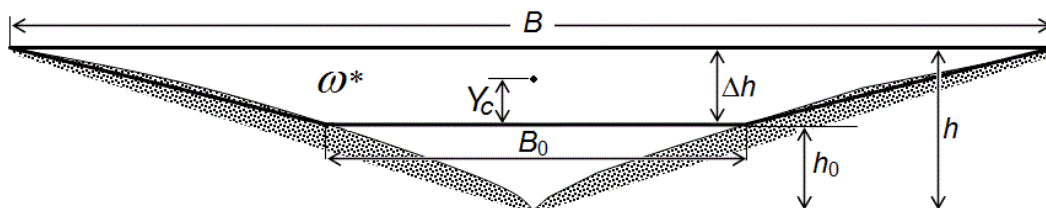


Рис. 4. Обозначения к формулам (15) и (16).

Аппроксимированная область волнового возмущения выделена толстой линией

Заключение. В исходных вариантах расчета интегрирование (2) хотя и приводит к конечным аналитическим зависимостям для целых классов относительно простых форм сечений русла – параболических и трапецидальных, – но неприменимо в случае сложных форм, которые нельзя или сложно представить математически. В этом случае использование формул (15) и (16) удобно, так как существенно упрощает расчет по сравнению с формулой (1). Определение значения Y_c и далее e^* представляется гораздо более простой процедурой по сравнению с расчетом потенциальной энергии U и плотности энергии e_U для объема воды в целом.

Литература

1. Архангельский В. А., Ведерников В. В. Расчеты неустановившегося движения воды в открытых руслах. М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1947.
2. Мишуев А. В. Влияние формы поперечного сечения канала на параметры крутых волн перемещения // Гидротехн. строительство, 1987. № 8. С. 5–10.
3. Соколов С. Б. К оценке скорости длинных волн в русле с параболическим сечением // Водное хозяйство России. 2003. № 2. С. 135–151.
4. Соколов С. Б. О скорости волн перемещения в канале с треугольным сечением. // Гидротех. строительство. 2010. № 5. С. 48–53.
5. Соколов С. Б. О потенциальной энергии жидкости конечного объема // Образование, наука и техника: XXI век : сб. науч. статей / под ред. О. А. Яворука. Ханты-Мансийск : ЮГУ ; Челябинск : ЧИРПО, 2010. Вып. 8. С.121–127.
6. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М. : Мир, 1977. 624 с.
7. Христианович С. А. Неустановившееся движение воды в каналах и реках // Некоторые новые вопросы механики сплошных сред. М.-Л. : Изд-во Академии наук СССР, 1938. С. 13–154.
8. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. М. : Колос С. 2005.
9. Lighthill M. J., Witham G. B. On kinematic waves, I. Flood movement in long rivers. // Proc Royal Soc London, 1955. Series A. Vol. 229. P. 281–316.
10. Longuet-Higgins F. R. S. On the mass, momentum and circulation of a solitary wave. // Proc Royal Soc London, 1974. Series A. Vol. 337. P. 1–13.
11. Russell J. Sc. Report on waves. Report on the 14th meeting British Assoc for the Advancement of Science. London John Murray, 1845. P. 311–390.

УДК 625.736.067:544.773.432

*Фуфаева М. С., Алтунина Л. К., Манжай В. Н., Овсянникова В. С., Филатов Д. А.
Fufayeva M. S., Altunina L. K., Manzhay V. N., Ovsyannikova V. S., Filatov D. A.*

КРИОГЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО СЛОЯ И УКРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ ДОРОГ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ

CRYOGELS USED IN FORMING OF WATERPROOF LAYER AND RAMPS REINFORCEMENT IN NORTHERN REGIONS

В работе представлен состав композитного гидрофобного полимерного материала, который можно использовать под укладку дорожного полотна. Изучены его упругие и гидрофобные свойства. Описана методика укрепления откосов дорог с помощью композиции «Криогель-Р».

Ключевые слова: водный раствор полимера, криогель, почва, минеральное масло.

В настоящее время активно ведутся работы по освоению природных ресурсов в северных регионах РФ. Экстремальные климатические условия предъявляют повышенные требования к используемым технологиям и материалам.

Известно, что водные растворы некоторых полимеров после цикла замораживания – размораживания образуют упругие полимерные тела, так называемые криогели. Механические свойства криогелей принципиально отличаются от свойств исходных вязкотекучих композиций, что позволяет использовать упругие криогели в качестве связующего материа-

ла. Введение в полимерную композицию модификаторов и наполнителей может в значительной степени изменить (улучшить) механические и теплофизические, а также потребительские свойства конечного продукта.

В Институте химии нефти СО РАН разработаны составы композитных криогелей – криотропные полимерные материалы, перспективные для тампонажных работ, строительной индустрии, решения экологических проблем в районах распространения многолетнемерзлых пород. Они безвредны для людей и экологически безопасны для окружающей среды.

Для укрепления и гидроизоляции грунтов планировочных насыпей и автодорог в условиях Крайнего Севера может быть использована криотропная полимерная композиция. При введении в водный раствор полимера мелкодисперсных капель минерального масла и проведения цикла замораживания – размораживания образуются криогели, которые приобретают гидрофобные свойства. При этом можно попутно утилизировать отработанные масла, используя их в качестве жидкого гидрофобного наполнителя.

В данной работе использовали водный полимерный раствор с молекулярной массой $M = 75\ 000$, плотностью $1.0\text{--}1.1\ \text{кг/м}^3$ и вязкостью $40\text{--}90\ \text{мПа}\cdot\text{с}$. В качестве жидких гидрофобных наполнителей использовали отработанные трансформаторное (ТМ) и промышленное (ИМ) масла. Трансформаторное масло представляет собой сложную многокомпонентную систему, состоящую в основном из нафтеновых и парафиновых углеводородов, а также ароматических соединений. Насыщенные углеводороды составляют основную часть масла, их содержание может достигать 95 % мас. Компоненты же промышленного масла содержат в своей структуре большее число гетероатомов [1], придающих им слабополярные свойства, поэтому эти компоненты являются природными поверхностно-активными веществами (ПАВ).

Для получения двухкомпонентных криогелей (вода – полимер) водные растворы полимера замораживали и выдерживали в течение суток при температуре $T = -20\ ^\circ\text{C}$, затем размораживали их при температуре $T = 20\ ^\circ\text{C}$. Маслонаполненные криогели получали при введении в водный раствор полимера минерального масла, диспергировали и проводили цикл замораживания – размораживания. Поскольку для охлаждения полимерного раствора до отрицательной температуры и его последующего замораживания требуется определенный интервал времени, то для формирования криогелей, содержащих масло, необходимо получать стабильные исходные водомасляные эмульсии, которые не расслаивались бы в течение нескольких часов. Поэтому в трехкомпонентную систему (полимер – вода – масло) добавляли водорастворимое неионогенное поверхностно-активное вещество (НПАВ) – оксиэтилированный алкилфенол неол АФ₉₋₁₂. Получили образцы композитных кригелей, затем при заданной деформации (γ) измеряли упругое напряжение (P), возникающее в материале, и по формуле Гука $P = G \cdot \gamma$ рассчитывали модуль упругости (G) (рис. 1).

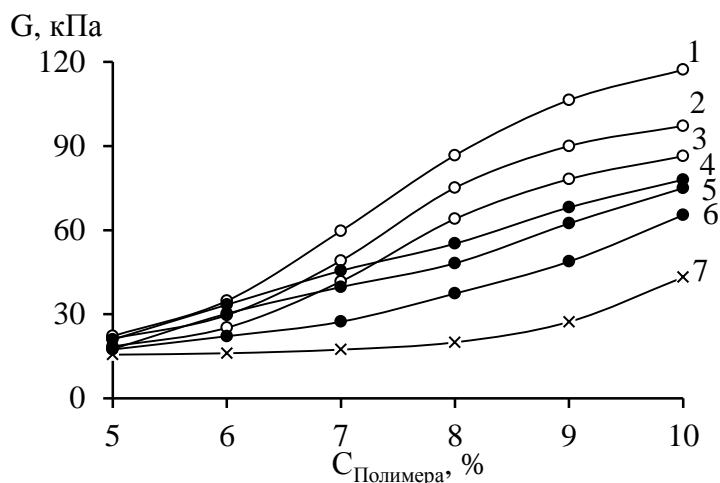


Рис. 1. Зависимость модуля упругости маслонаполненных криогелей от концентрации полимера: 1 – ТМ 30 %; 2 – ТМ 20 %; 3 – ТМ 10 %; 4 – ИМ 30 %; 5 – ИМ 20 %; 6 – ИМ 10 %; 7 – криогели без масла

Из данных рис. 1 следует, что введение минеральных масел ТМ и ИМ в полимерную матрицу криогеля способствует увеличению модуля упругости. Рост упругих свойств криогелей наблюдается как при повышении концентрации полимера в образцах, так и при увеличении содержания масел.

Кроме механических (упругих) свойств маслonaполненных криогелей, другой важной характеристикой является способность полимерной матрицы, находящейся в твердом агрегатном состоянии, удерживать во внутреннем объеме включенное масло. Для полимерных тел с пластификатором характерной особенностью является их склонность к «выпотеванию» масла, т. е. к выходу его из объема криогеля на поверхность образца. Следствием этого процесса является изменение смачиваемости поверхности криогеля водой и углеводородными жидкостями.

Степень гидрофобизации наполненных и ненаполненных маслом криогелей оценивали по изменению смачиваемости поверхности криогеля методом компьютерного видеосканирования с помощью микроскопа AxioStar.

Исследуя степень гидрофобизации наполненных и ненаполненных маслом криогелей, установили, что на всех образцах независимо от содержания в них масла практически отсутствует изменение площади капель воды во времени, т. е. поверхности криогелей практически индифферентны к воде. Увеличение же содержания масла в криогеле приводит к возрастающей гидрофобизации поверхности и вследствие этого всё большему растеканию капель нефти по поверхности образцов, что свидетельствует о «выпотевании» пластификатора из объемов на поверхности образцов. Графической иллюстрацией происходящих процессов является рис. 2, на котором отражены закономерности смачивания водой и нефтью поверхностей криогелей, содержащих различное количество трансформаторного и индустриального масел.

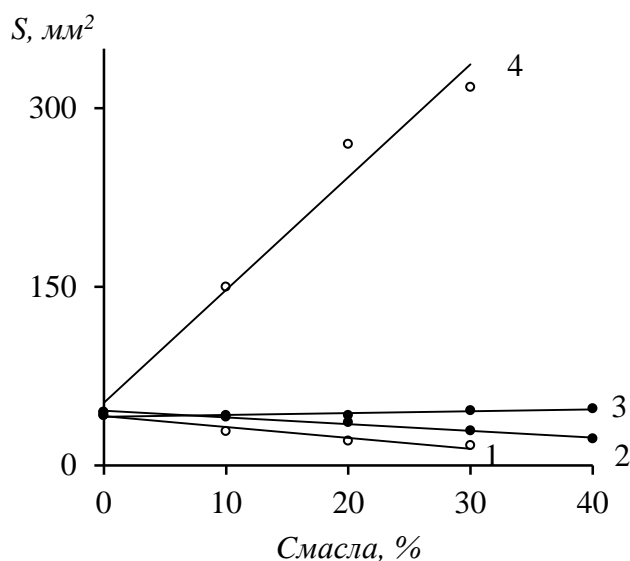


Рис. 2. Зависимость площади капель воды (1, 2) и нефти (3, 4) на поверхности криогелей от содержания в них ТМ (1, 4) и ИМ (2, 3)

Из данных рис. 2 следует, что присутствие в криогеле ТМ, содержащего малополярные компоненты, плохо удерживаемые полимерной матрицей, приводит к значительно большей гидрофобизации поверхности, что сопровождается ухудшением смачиваемости водой и повышением сродства к нефти. Присутствие же в индустриальном масле значительной доли природных ПАВ способствует лучшему удерживанию дисперсной фазы (ИМ) в матрице криогеля. Поэтому гидрофобизация его поверхности выражена не столь отчетливо и разница в площадях растекания воды и нефти невелика.

Полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности формирования маслonaполненных криогелей. Присутствие масел, которые достаточно прочно удерживаются в полимерной матрице, способствует образованию упругих криогелей с ярко выраженными гидрофобными свойствами [2].

Простая технология производства криогеля и возможность приготовления его на месте непосредственного применения с помощью стандартной техники, невысокая стоимость за счет использования продуктов крупнотоннажного производства является уникальным преимуществом криогеля. Стабилизация грунтов, гидротехнических сооружений, укрепление откосов и насыпей может осуществляться либо путем закачки криогелеобразующего раствора через скважины, либо путем его смешивания с грунтом, укладкой на поверхность с последующим естественным замораживанием – оттаиванием. Криогель повышает водонепроницаемость и структурную прочность грунтов, укрепляет основание земляного полотна железных и автомобильных дорог в условиях низких температур, в районах с сезонно- и многолетнемерзлыми породами. Устойчивость криогеля к различным воздействиям окружающей среды: воде, микроорганизмам, ультрафиолету и перепадам температур позволяет использовать его в борьбе с оползнями, ливневыми движениями почвы, вибрациями различного происхождения и прочими воздействиями.

С применением криогелей разработан химико-биологический метод предотвращения эрозии, рекультивации почв и создания зеленого покрова. Преимуществом метода является комплексный подход к решению проблемы опустынивания почв, основанный на применении криогеля в комплексе с выращиванием многолетних трав и древесных пород растений. Криоструктурирование не только скрепляет почву, но и способствует прорастанию семян многолетних трав и образованию зеленого покрова, при этом растения лучше переносят зимние морозы, их корни не вымерзают, а в засушливый период лучше удерживают влагу. Полимерная матрица криогеля в почве, с одной стороны, достаточно прочна, чтобы выдержать воздействие эрозионных процессов, с другой, – эластична, чтобы не препятствовать росту растений. Семена прорастают сквозь криогелевый слой и образуют устойчивый зеленый покров. Корни растений также способствуют укреплению почвы, а зеленая масса, отмирая, повышает ее плодородие. При этом для каждого типа грунта подбирается своя композиция из полимера и удобрений. Например, для Ямала характерны песчаные почвы с повышенной кислотностью, требующие подпитки не только минерально-органическими, но и нейтральными веществами, такими как торфяная смесь [3].

В сентябре 2014 г. в Ямало-Ненецком автономном округе (г. Лабытнанги) были проведены опытно-промышленные работы по применению композиции «Криогель–Р» для укрепления откосов дорог. Были заложены три экспериментальные площадки площадью в среднем 370 м². Первый и половина второго участка были обработаны в следующей последовательности: внесена доломитовая мука, минеральное удобрение, засеяны семена газонной смеси. Сверху нанесен слой торфо-песчаной смеси толщиной 2–4 см и поверхность обработана композицией «Криогель–Р».

Половина второго и третий участок были обработаны композицией «Криогель–Р» дважды. Вначале обрабатывали песчаную обсыпку, затем торфо-песчаную смесь.

В качестве контроля были оставлены соседние участки, которые оформлены георешеткой, ячейки заполнены щебнем, выровнены торфо-песчаной смесью и засеяны газонной травой.

Первая оценка результатов была проведена в июне 2015 г. после схода снега и начала вегетационного периода. На контрольном участке, не обработанном композицией «Криогель–Р», наблюдались значительные разрушения: частичный смыв песчаной отсыпки, деформирование и разрыв георешёток (рис. 3).

На всех трех опытных участках почвенный покров после снеготаяния сохранился, значительных повреждений нет. Способ обработки двух частей участка (один или два слоя композицией «Криогель–Р») повлиял на прочность сформированного покрытия: на участке с

одним слоем криогеля имеются обнажения верхнего края георешетки (до 1 см) и промоина глубиной до 10 см в торце. Смыв торфо-песчаной смеси и обнажение георешетки возможно вследствие неравномерного нанесения композиции «Криогель-Р» и повышенного стока воды в этом месте. После нанесения двух слоев раствора «Криогель-Р» повреждений почвенного покрова не наблюдалось, следовательно, двукратное нанесение полимерной композиции повышает стойкость покрытия при закреплении откосов (рис. 4).



Рис. 3. Контрольный участок без криогеля после зимовки



1 участок

2 участок

3 участок

Рис. 4. Опытные участки, обработанные композицией «Криогель-Р», после зимовки

В начале и в конце вегетационного сезона с экспериментальных и контрольного участков были отобраны пробы почвы для микробиологических исследований. Результаты представлены на рис. 5–6.

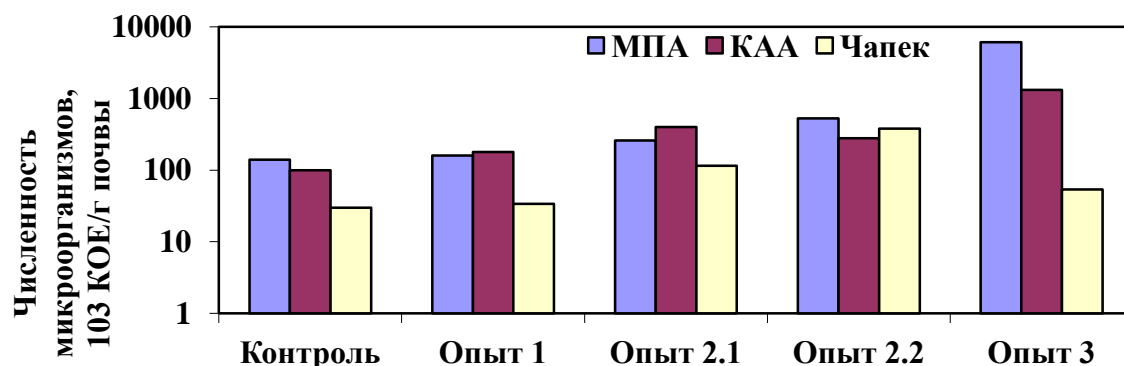


Рис. 5. Численность гетеротрофных бактерий (МПА), актиномицетов (КАА) и грибковой микрофлоры (Чапек) в контрольной и криоструктурированных почвах (опыт 2.1 – однократная обработка криогелеобразующим раствором, опыт 2.2 – двукратная) в начале вегетационного сезона

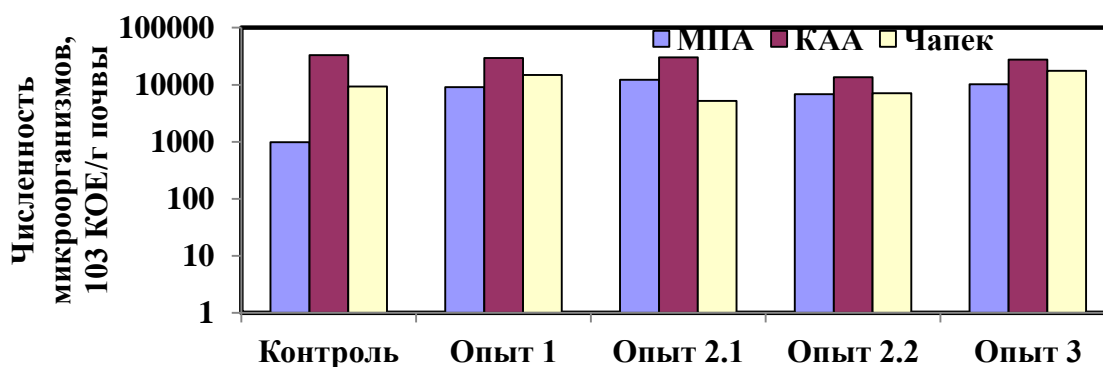


Рис. 6. Численность гетеротрофных бактерий (МПА), актиномицетов (КАА) и грибковой микрофлоры (Чапек) в контрольной и криоструктурированных почвах (опыт 2.1 – однократная обработка криогелеобразующим раствором, опыт 2.2 – двукратная) в конце вегетационного сезона

По рис. 5 и 6 видно, что в начале сезона на контрольном участке численность исследуемых групп микрофлоры была ниже в 2–5 раз, чем на экспериментальных участках. Максимальное отличие отмечено для участка № 3, где численность гетеротрофной микрофлоры и актиномицетов была на 2 порядка выше, чем в контроле. В конце вегетационного сезона численность микрофлоры всех групп на всех участках возросла на 2 порядка, кроме гетеротрофных микроорганизмов на контрольном участке, где рост составил 1 порядок по сравнению с началом сезона.

Таким образом, криогель в почве оказывает положительное влияние на аборигенную микрофлору, отвечающую за создание почвенного плодородия, что в конечном итоге позитивно скажется на росте растений.

Литература

1. Казакова Л. П., Крейн С. Э. Физико-химические основы производства нефтяных масел. М. : Химия, 1978. 320 с.
2. Манжай В. Н., Фуфаева М. С. Изготовление криогелей на основе поливинилового спирта как способ рациональной утилизации отработанных масел // Химия и технология топлив масел. 2015. № 5. С. 38–41.
3. Филатов Д. А., Фуфаева М. С., Овсянникова В. С., Алтунина Л. К. Выращивание многолетних растений в условиях Крайнего Севера с применением криогелей // В мире научных открытий. 2015. № 10. С. 340–359.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕФТЯНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 658.5:622.276.054:004.896

Баус С. С.

Baus S. S.

ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ НЕФТЕДОБЫЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ

SOFTWARE FOR MONITORING AND COMPUTER-AIDED DEEP PUMP OIL PRODUCTION PROCESS CONTROL

Данная статья посвящена представлению программного продукта для контроля и автоматизированного управления процессами нефтедобычи с использованием глубинных насосов. Актуальность данной статьи обусловлена рассмотрением алгоритма и принципов автоматизированного управления процессами нефтедобычи с использованием глубинных насосов, различных режимов, уровней контроля и управления работы сложной системой. Данное программное обеспечение повысит качество и эффективность сложных технологических процессов нефтедобычи.

Ключевые слова: программный продукт, контроль, управление, автоматизация, нефтедобыча, глубинный насос.

Компьютерные технологии и автоматизированные системы полностью вошли в нашу жизнь. Практически все технологические процессы на производственных предприятиях не обходятся без систем автоматизированного управления и контроля. Данные системы полностью исключают человеческий фактор, более точны и последовательны, то есть действуют исключительно в рамках написанного программного обеспечения. И только исключительные операции осуществляет инженер оператор в своем кабинете через удаленную точку доступа. Поэтому все больше производств внедряют в свои технологические процессы системы автоматизированного управления. И нефтяная отрасль не является исключением. Хочется отметить, она наиболее остро испытывает потребность в данных системах, и уже имеются определенные результаты внедрения этих систем в жизнь. Данная информация подтверждается практикой ведущих нефтедобывающих компаний России и мира. Ведь предприятия, занимающиеся добычей нефти и газа, сталкиваются с такими сложными задачами, как получение нефти при минимальных затратах, оптимизация добычи на всём фонде добывающих скважин, управление расходами. Зачастую эти задачи приходится решать в условиях дефицита квалифицированных кадров. За последний период отмечается резкое ухудшение ресурсной базы РФ. В стране возросла доля трудноизвлекаемых запасов, что привело к снижению объемов добычи. Ожидается открытие 25 % неразведанных ресурсов на глубине 3–5 км. И еще 25 % на глубинах свыше 5 км. Главными причинами ухудшения состояния сырьевой базы является естественное истощение недр и резкое сокращение объема инвестиций, направляемых в эту сферу деятельности. Рост объемов добычи нефти обеспечивается значительным увеличением фонда скважин, которые бурятся в отдаленных районах со сложными климатическими условиями, что делает невозможным систематическое обслуживание и исследование всех скважин бригадным способом.

При создании систем контроля и управления технологическим процессом добычи нефти должны ставиться такие задачи, как управление разработкой на уровне упрощенных

моделей пласта или его участка, а также выбор рационального режима работы наземного оборудования для каждой скважины, так как добывающие скважины являются сложными динамическими объектами управления, и правильный выбор режима их работы играет решающую роль в добыче нефти.

Создание системы управления технологическим процессом добычи нефти невозможно без создания адекватной математической модели, отражающей процессы, происходящие в моделируемых нефтепромысловых системах. Под нефтепромысловой системой подразумеваются такие взаимодействующие объекты, как: скважина – пласт – скважина; скважина – призабойная зона; призабойная зона – удаленная часть пласта и т. д. От того, насколько точно определяется состояние нефтепромысловой системы, зависит эффективность принимаемого решения, будь то выбор скважины, на которой будут проводиться геолого-технические мероприятия, или регулирование режимов работы скважин.

В ходе данных научных изысканий был сформирован и разработанный алгоритм, и методологический аппарат для автоматизации объектов нефтедобычи. Данное программное решение представляет собой передовую проверенную систему средств автоматизации и программного обеспечения на основе беспроводного решения Smart Wireless, совместно с контроллерами и системами телемеханики. Все данные будут выводиться на монитор главного инженера и контроллера, что существенно облегчит и ускорит весь технологический процесс.

Разработанное комплексное решение для систем механизированной нефтедобычи с применением штанговых глубинных насосов (ШГН) обеспечивает эффективную эксплуатацию скважины, позволяя операторам осуществлять дистанционный мониторинг, управление и анализ данных, собранных при помощи контроллеров скважины на поверхности [3].

Различные серии контроллеров скважины позволяют управлять работой скважины и установленного на ней оборудования. В зависимости от проекта программное обеспечение контроллеров позволяет адаптивно контролировать дебит скважины для поддержания оптимального темпа добычи, а все необходимые защитные функции при этом встроены в контроллер. Большой набор интерфейсов позволяет подключать различные датчики, КИПиА и иное скважинное оборудование сбора и обработки данных.

Считаем, что необходимо широкое внедрение идей синергетики в теорию и практику сложных систем. Как говорил Н. Винер, «важные исследования задерживаются из-за того, что в той или иной области неизвестны результаты, уже давно ставшие классическими в смежной области. Это – не результат эклектичной «разбросанности» авторов, а желание убедить читателя в эффективности синергетики как универсального средства для моделирования и выработки стратегии управления. Усложнение физического содержания моделей за счет учета нелинейности, неравновесности и неоднородности, присущих реальным системам, приводит к выявлению новых синергетических эффектов (усиление, потеря устойчивости с возникновением колебаний, образование упорядоченных структур и т. д.), наличие которых подтверждается специально поставленными экспериментами и позволяет предложить новые методы контроля и управления сложными природными системами.

Графическая интерпретация соответствующих поверхностных или забойных динамограмм построена в SCADA-приложении для визуализации. SCADA-система для визуализации представляет собой современное решение по мониторингу, управлению и сбору данных, созданное на основе интернет-технологий. Благодаря этому для SCADA-системы визуализации не требуется установка программы-клиента: достаточно любого интернет-браузера. Это позволяет передавать промышленные данные везде, где имеется Интернет-соединение: машинной-клиентом может служить персональный компьютер, планшетный компьютер или смартфон. Благодаря развитому графическому интерфейсу с интуитивно ясными меню и средствами визуализации, поддающимися доработке с учетом нужд каждого клиента, визуализация SCADA является дружественной к пользователю системой, идеально соответствующей конкретной задаче и несложной в применении. Она позволяет получать информацию об эффективности работы ШГН и обнаруживать потенциальные проблемы [1]. Регистрация дина-

мограмм производится с помощью либо датчиков, либо бессенсорных средств расчета, встроенных в частотные преобразователи скорости.

Частотные преобразователи скорости разработаны с расчетом на максимальную производительность и эффективность [4]. Это – непревзойденное решение по автоматизации процессов нефтедобычи при помощи электрических насосов. Применение частотных преобразователей скорости обеспечивает максимально гибкое регулирование насосной системы в идеальном соответствии с конкретными рабочими условиями, что позволяет в точности согласовать производительность скважинного подъемника с продуктивностью скважины. Прочный корпус, сертифицированный для установки вне помещения, компактные габариты, широкий диапазон возможных дополнительных опций, встроенные функции управления и защиты – все это делает частотные преобразователи скорости идеальным решением для большинства насосных систем.

Применение развитых средств диагностики позволяет исключить преждевременные отказы и продлить срок службы насосов. Это дает возможность производить капитальный ремонт и замену оборудования по состоянию, а не через заданные промежутки времени и тем самым свести к минимуму простой скважин и повысить продуктивность работы. Решение обеспечивает следующие функции оптимизации и защиты процессов механизированной добычи нефти при помощи электропогружных насосов (ESP):

- повышение дебета низкопродуктивных скважин;
- мониторинг и защиту погружного оборудования;
- сведение к минимуму ухода электропогружных насосов в левую и правую зоны напорной характеристики;
- поддержание КПД насоса на максимальном уровне;
- предотвращение проблем, связанных с присутствием газа, песка и парафинов;
- предотвращение перегрева при низком массовом расходе.

Комплексное решение для систем механизированной нефтедобычи с применением штанговых глубинных насосов (ШГН) обеспечивает эффективную эксплуатацию скважины, позволяя операторам осуществлять дистанционный мониторинг, управление и анализ данных, собранных при помощи контроллеров скважины на поверхности. Графическая интерпретация соответствующих поверхностных или забойных динамограмм, построенных в SCADA-приложении, позволяет получать информацию об эффективности работы ШГН и обнаруживать потенциальные проблемы. Регистрация динамограмм производится с помощью либо датчиков, либо бессенсорных средств расчета, встроенных в частотные преобразователи скорости.

Данное алгоритмическое и технологическое решение позволяет избежать дорогостоящих отказов за счет своевременных оповещений о потенциальной неисправности. В состав решения входят средства распознавания отклонения форм динамограмм от стандартных и рекомендации по регулированию и защите ШГН при различных возможных рабочих условиях:

1. Повышенное трение.
2. Удар плунжера насоса по жидкости.
3. Утечка через нагнетательный или всасывающий клапан глубинного насоса.
4. Попадание в насос газа.
5. Недостаточный приток.
6. Поток через насос.
7. Высокий уровень флюида.
8. Механические проблемы.
9. Загрязнение песком или парафинами.
10. Газовые пробки или одновременная добыча фонтанным и механизированным способом.
11. Сочетание условий.

В заключение хочется отметить, что внедрение данного решения не требует огромных финансовых решений, оно легко в обращении, не требует специализированной подготовки персонала, даже человек, который мало знаком с современными компьютерными технологиями, имеет все шансы успешно освоить данный программный продукт. Реализация этих идей по автоматизации данного технологического процесса существенно увеличит эффективность добычи, сократит аварийные ситуации на месторождении, что, в свою очередь, будет характеризоваться качественной бесперебойной работой. Сам процесс мониторинга технологии станет намного проще и наглядней, тем самым ускорится технологический процесс.

Литература

1. Александров Н. С., Дорохов С. А. Автоматизация нефтедобывающей промышленности. Томск : Изд-во ТПУ, 2012.
2. Буров С. В. Глубинные штанговые насосы. 2015. URL: <http://neftemash.ru/products/21/137/index.htm> (дата обращения: 20.04.2016).
3. Дарищев В. И., Ивановский В. Н. Скважинные насосные установки для добычи нефти: учеб. пособие. М. : Нефть и газ, 2002. 824 с.
4. Дашевский А. В. Справочник инженера по добыче нефти. М. : НФП, 2003.
5. Кулешов П. Р. Автоматизированные системы в промышленности. М. : Изд-во МЭИ, 2014.
6. Штанговые насосные установки. URL: http://prodcp.ru/referaty_po_geologii/referat_shtangovye_nasosnye_ustanovki.htm (дата обращения: 20.04.2016).
7. Янченко П. Н. Автоматизация технологических процессов нефтегазовой отрасли. Тюмень : Тюмесс, 2012.

УДК 532.5:519.7

*Бычин И. В., Гореликов А. В., Ряховский А. В.
Bychin I. V., Gorelikov A. V., Ryakhovskiy A. V.*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛЕ ПРИ ЗАДАННОЙ МОЩНОСТИ ПОТОКА

NUMERICAL SIMULATION OF MAGNETOHYDRODYNAMIC DUCT FLOWS WITH CONSTANT POWER INPUT

Данная работа посвящена изучению течения проводящей жидкости в присутствии переменного магнитного поля в каналах, в которых мощность потока предполагается заданной, а давление и скорость течения на входной и выходной границах канала неизвестны.

Ключевые слова: численное моделирование, магнитная гидродинамика, постоянная мощность потока, течение в канале.

Рассмотрим течение вязкой несжимаемой проводящей жидкости в канале круглого сечения. Вязкость жидкости ν и плотность ρ считаются постоянными. Координата z направлена вдоль оси канала. Радиус канала равен R_0 , длина канала равна H (в безразмерных переменных).

Основа математической модели – система уравнений магнитной гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости. В изотермическом случае данная система уравнений в прямоугольных координатах в безразмерном виде записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla P + \Delta \mathbf{U} + \frac{1}{Pr_m} \text{rot } \mathbf{B} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{U} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{Pr_m} \Delta \mathbf{B}, \quad (3)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

где t – время; $\mathbf{U} = (U, V, W)$ – скорость жидкости; P – давление; \mathbf{B} – индукция магнитного поля; $Pr_m = \nu/\nu_m$ – магнитное число Прандтля; ν и ν_m – кинематическая и магнитная вязкости; $Na = r_0 B_0 / \sqrt{4\pi\rho\nu_m\nu}$ – число Гартмана; B_0 – характерный масштаб индукции магнитного поля; $Re = w_0 r_0 / \nu$ – число Рейнольдса; w_0 – средняя скорость течения; r_0 – размерный радиус канала.

На участке канала $z \in [0, H/4]$ приложено магнитное поле в направлении оси x . Абсолютная величина магнитного поля равна числу Гартмана Na , а направление периодически меняется с периодом T .

В канале поддерживается постоянная мощность течения Ω . Мощность потока Ω пропорциональна разности давления на концах канала и объемному расходу через поперечное сечение и определяется как [1]:

$$\Omega = (P_l - P_r) \iint_A W dS,$$

где P_l , P_r – давление на левой и правой границах. Давление на левой границе можно выразить через мощность, расход жидкости и давление на правой границе:

$$P_l = P_r + \frac{\Omega}{G}, \quad G = \iint_A W dS,$$

где G – объемный расход жидкости через поперечное сечение канала. При этом P_r задается произвольно, например, равным 0, в силу того, что для течения несжимаемой жидкости давление определяется с точностью до постоянной.

Граничные условия можно записать следующим образом:

$$z = 0: \quad U = 0, \quad V = 0, \quad P = \frac{\Omega}{G}; \quad (5)$$

$$z = H: \quad U = 0, \quad V = 0, \quad P = 0. \quad (6)$$

Дискретный аналог системы уравнений (1–4) составлен при помощи метода контрольного объема [2]. Алгоритм решения задачи состоит из следующих шагов:

1. Задается произвольное начальное распределение скорости. Начальное поле скорости выбирается таким образом, чтобы оно удовлетворяло уравнению неразрывности и граничным условиям.

2. По объемному расходу через левую границу рассчитывается значение давления на левой границе (5–6).

3. По алгоритму PISO [3] решается система уравнений гидродинамики, при этом неизвестное значение компоненты скорости W на левой и правой границах определяется из уравнения неразрывности.

Этапы 2–3 составляют один шаг по времени. На следующем шаге по времени этапы 2–3 повторяются, причем в качестве начального распределения скорости используется решение, полученное на предыдущем временном слое.

Далее приведены результаты, полученные при вычислительных экспериментах по исследованию течений в канале круглого сечения при постоянной мощности в переменном магнитном поле (рис. 1, 2). Координата z выбрана вдоль оси канала. При проведении вычислительных экспериментов были выбраны следующие значения параметров: радиус канала $R_0 = 1$, длина канала $H = 4$, число Рейнольдса $Re = 50$, магнитное число Прандтля $Pr_m = 0.1$, число Гартмана $Ha = 5$, период колебаний магнитного поля $T = 0.5$.

На рис. 1 изображена зависимость давления от времени в различных точках канала. Как видно из рисунка, наложение переменного магнитного поля может приводить к значительным колебаниям давления. На рис. 2 представлены силовые линии магнитного поля, которые искривляются под действием течения.

Построена математическая модель МГД-течения при постоянной мощности потока жидкости в переменном внешнем магнитном поле. С целью изучения управляющего воздействия внешнего магнитного поля на характеристики потока жидкости в каналах проведена серия вычислительных экспериментов. В частности, установлено, что периодическое изменение внешнего магнитного поля на начальном гидродинамическом участке может приводить к существенным осцилляциям давления в канале.

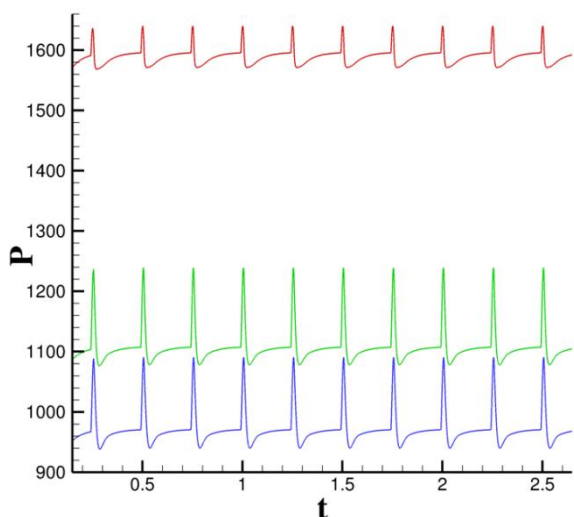


Рис. 1. Зависимость давления от времени в различных точках в центре канала: красная линия – в точке с координатой $z = 0.42$; зеленая линия – $z = 1.3$; синяя линия – $z = 1.62$

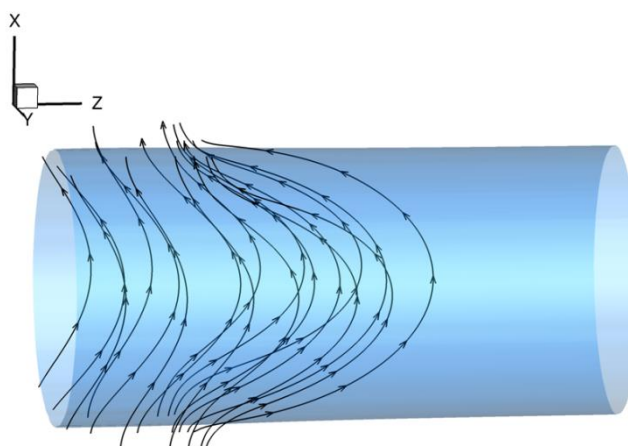


Рис. 2. Силовые линии магнитного поля

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 15-41-00013 «p_урал_a» и 15-41-00059 «p_урал_a».

Литература

1. Зубков П. Т., Тарасова Е. Н. Гидродинамика и теплообмен в канале с кольцевыми ребрами. ТВТ, 2004. Т. 42. Вып. 6. С. 917–920.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат. 1984. 152 с.
3. Issa R. I. Solution on the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting // Journal of Computational Physics. 1985. № 61. P. 40–65.

УДК 622.27:004.9

*Вирстюк А. Ю.
Virstyuk A. Yu.*

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ПО КОНТРОЛЮ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН С НЕРАВНОМЕРНЫМ ПРОФИЛЕМ ПРИЕМИСТОСТИ

MODULE DEVELOPMENT FOR CONTROL OF RECHARGE WELLS WITH ACCELERATION UNEVEN PROFILE

В статье рассмотрены существующие способы повышения нефтеотдачи пластов и понятие профиля приемистости нагнетательных скважин. Разработана методика и соответствующий ей алгоритм по выявлению скважин с неравномерным профилем приемистости как наиболее приоритетных для проведения мероприятий по увеличению нефтеотдачи. Представлена реализация разработанного алгоритма в модуле «Закачка вод – 2» портала «Геолого-промысловая информация».

Ключевые слова: профиль приемистости, нагнетательные скважины, пласт, контроль.

Введение. Закачка рабочего агента в пласт является одной из наиболее затратных составляющих процесса разработки месторождений, поэтому регулирование системы воздействия, наряду с повышением эффективности процесса нефтеизвлечения, направлено на снижение неэффективных затрат с повышением объемов дополнительной добычи нефти.

Эффективная эксплуатация системы воздействия предусматривает оптимальную работу всех сооружений системы поддержания пластового давления, наземного и подземного оборудования, обеспечивающих закачку воды в пласт при необходимом давлении в объемах, соответствующих отборам жидкости и газа в целом по объектам разработки и по его отдельным участкам, возможность регулирования закачки и минимизацию энергопотребления.

В ОАО «Сургутнефтегаз» с 2011 г. организована работа по регулированию объемов закачиваемого агента в пласты посредством проведения геолого-технических мероприятий, планируемых ежеквартально нефтегазодобывающими управлениями. Но процесс регулирования закачки рабочего агента в пласт не завершается этапом обеспечения необходимых объемов закачки воды по скважинам, основная работа, с точки зрения разработки месторождений, заключается в распределении объемов закачки агента по целевому интервалу пласта с целью достижения соответствующего охвата заводнением и фронта вытеснения.

В настоящее время в ОАО «Сургутнефтегаз» отсутствует единая методика, аналитическая и статистическая отчетность по скважинам с неравномерным профилем приемистости. Создание такой методики и отчетных форм на сегодняшний день является актуальной проблемой, так как доля нагнетательных скважин с низкими фильтрационно-емкостными свойствами и расчлененностью объектов разработки неуклонно растет.

Понятие профиля приемистости нагнетательных скважин. Во всем мире с каждым годом возрастает интерес к методам повышения нефтеотдачи пластов и развиваются геолого-физические исследования, направленные на поиск научно обоснованного подхода к выбору наиболее эффективных технологий разработки месторождений.

В целях повышения экономической эффективности разработки месторождений, снижения прямых капитальных вложений и максимально возможного использования реинвестиций весь срок разработки месторождения принято делить на три основных этапа:

- 1) использование естественной энергии пластов скважин;
- 2) закачка воды, газа;
- 3) применение методов повышения нефтеотдачи (МУН) [3; 4].

Последние этапы являются дорогостоящими, так как сопровождаются закачкой реагента в пласт скважины, и ошибки на этапе подбора скважин-кандидатов для оказания химического, теплового и т. п. воздействия могут привести к избыточным затратам и получению отрицательного эффекта: не повышению нефтеотдачи скважины, а, наоборот, её сокращению.

Для качественного подбора скважин очень важно анализировать профиль приемистости скважины.

Определение профилей притока и приемистости по пластам и пропласткам (тонкий слой горных пород, имеющий подчинённое значение и заключённый между основными, более мощными слоями иного цвета или состава) имеет целью установить распределение добываемого и закачиваемого флюида (вода, нефть, газ) по мощности исследуемого горизонта. Профилем притока или приемистости пласта называется график зависимости количества жидкости или газа, поступающих из единицы его мощности, или количества воды, нагнетаемой в пласт, от глубины залегания работающего интервала [1].

На рис. 1 представлен график этой зависимости на примере скважины 10826 НГДУ «Федоровскнефть», на котором изображены работающие и неработающие пропластки двух пластов скважины, отмечены глубины перфорации и соответствующие глубины залегания пропластков (кровля и подошва).

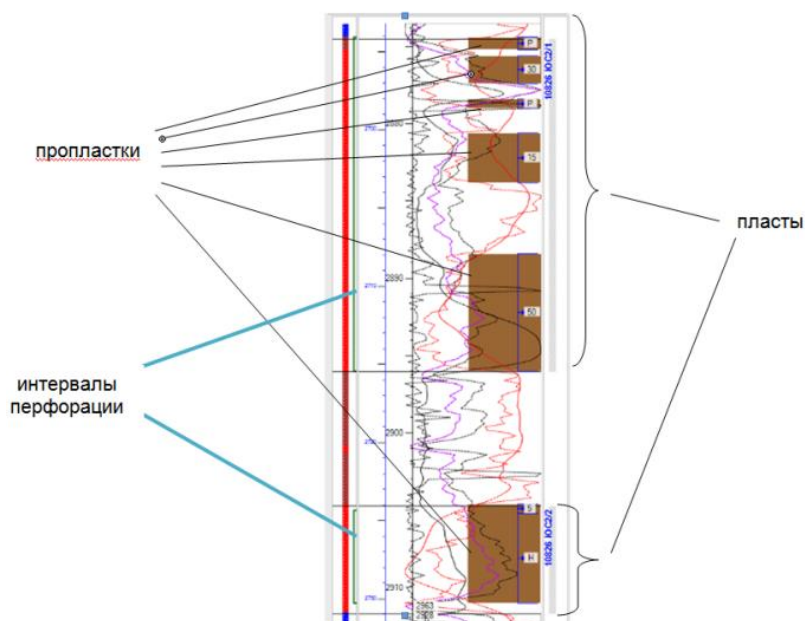


Рис. 1. График зависимости количества закачиваемого флюида скв. 10826 НГДУ «Федоровскнефть»

Таким образом, учет профиля приемистости нагнетательных скважин позволяет определить необходимость проведения МУН на скважинах.

Методика выявления скважин с неравномерным профилем приемистости из геофизических баз данных. Неравномерность закачки воды по целевому интервалу пласта определяется по схеме, представленной на рис. 2.

В автоматическом режиме формируется список нагнетательных скважин с проведенными промыслово-геофизическими исследованиями по определению профиля приемистости (далее – ОПП) за последние 4 года эксплуатации, в который входят скважины, происследованные с РГД (расходомер глубинный дистанционный) [2].

По каждой скважине вычисляется охват пластов заводнением (1) в интервале перфорации путем отношения суммарной мощности работающих коллекторов в интервале перфорации к суммарной мощности всех коллекторов в интервале перфорации. Если полученный

процент охвата пласта меньше 70 %, то скважина считается с неравномерным профилем приемистости. В случае если данных последнего геофизического исследования недостаточно, происходит обращение к более ранним исследованиям в пределах последних 4 лет.

$$K_{III}^{охв\ зав} = \left(\frac{H_1^{раб} + H_2^{раб} + H_n^{раб}}{\sum_1^i H_i^{раб+нераб}} \right) \times 100; \quad (1)$$

где, $K_{III}^{охв\ зав}$ – охват пласта заводнением в интервале перфорации [%]; $H_1^{раб}, H_2^{раб}, H_n^{раб}$ – мощность 1, 2, …, n работающих пропластков в интервале перфорации [м]; $\sum_1^i H_i^{раб+нераб}$ – суммарная мощность работающих и неработающих пропластков в интервале перфорации [м].

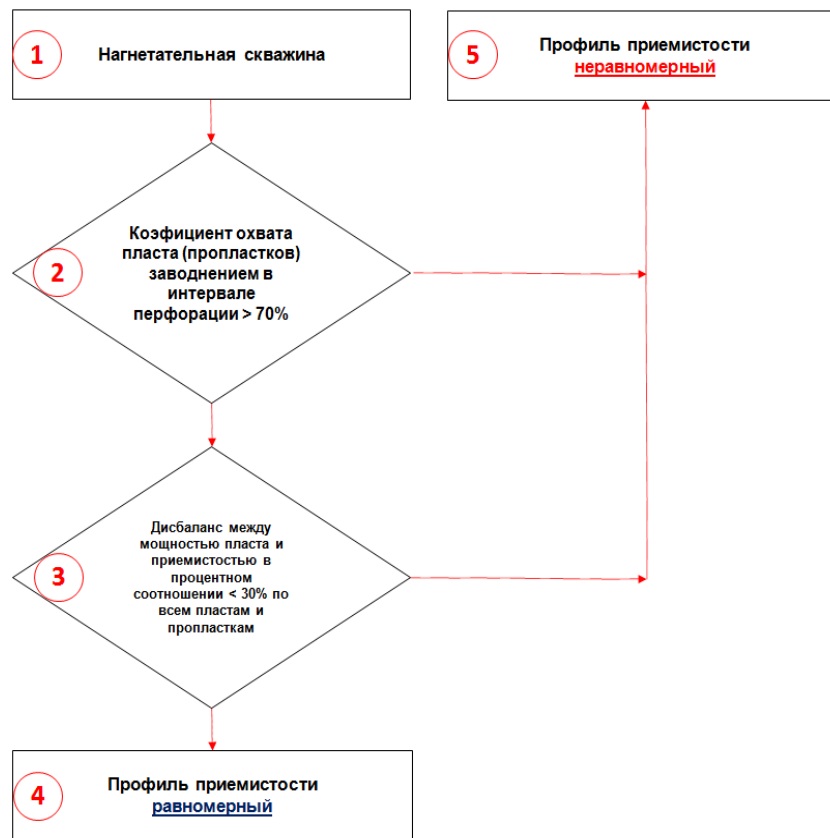


Рис. 2. Схема определения неравномерности закачки воды по целевому интервалу пласта

После выявления скважин с неравномерным профилем приемистости на первом этапе производится автоматический расчет по скважинам с охватом более 70 %. При этом в расчет попадают только те скважины, которые имеют процентное распределение закачиваемого объема воды по пропласткам.

Целью расчета является распределение пропластков по мощности в процентном соотношении от общей толщины коллекторов [2].

$$H_1^{\%} = \left(\frac{H_n^{раб+нераб}}{\sum_1^i H_i^{раб+нераб}} \right) \times 100; \quad (2)$$

где, $H_1^{\%}$ – процентная часть рассматриваемого коллектора от общей мощности коллекторов в интервале перфорации [%];

$H_n^{раб+нераб}$ – мощность рассматриваемого коллектора [м];

$\sum_1^i H_i^{раб+нераб}$ – общая мощность всех коллекторов в интервале перфорации [м].

Пример расчета:

$$H_1^{\%} = \left(\frac{H_n^{раб+нераб}}{\sum_1^i H_i^{раб+нераб}} \right) \times 100 = \left(\frac{4}{4+3+2+3+1+1} \right) \times 100 = 28.6\%; \quad (3)$$

$$H_2^{\%} = \left(\frac{3}{4+3+2+3+1+1} \right) \times 100 = 21.5\%; \quad (4)$$

$$H_3^{\%} = \left(\frac{2}{4+3+2+3+1+1} \right) \times 100 = 14.3\%; \quad (5)$$

$$H_4^{\%} = \left(\frac{3}{4+3+2+3+1+1} \right) \times 100 = 21.4\%; \quad (6)$$

$$H_5^{\%} = \left(\frac{1}{4+3+2+3+1+1} \right) \times 100 = 7.1\%; \quad (7)$$

$$H_6^{\%} = \left(\frac{1}{4+3+2+3+1+1} \right) \times 100 = 7.1\%; \quad (8)$$

Далее необходимо сопоставить результаты расчета с распределением приемистости по коллекторам (рис. 3).

Пропласток	РГД	Мощность	Дисбаланс
1	20%	29%	9%
2	20%	21%	1%
3	50%	14%	-36%
4	10%	21%	11%
5	0%	7%	7%
6	0%	7%	7%
Σ	100%	100%	0%

Рис. 3. Сопоставление результатов расчета с распределением приемистости по коллекторам

Если дисбаланс по одному из коллекторов превышает 30 %, то скважина имеет неравномерный профиль приемистости.

Интерфейс модуля по контролю нагнетательных скважин с неравномерным профилем приемистости. На данный момент в модуле «Закачка вод – 2» портала «Геолого-промысловый информации» информация по профилю скважин отображается в «Готовом отчете», представленном на рис. 4. Загрузка необходимой информации и проведение всех расчетов осуществляется в ночное время. Пользователи могут ознакомиться не только с видом профиля скважины, но и получить отчет по данным, на основании которых это заключение было сделано.

Профиль скважин, у которых ячейка окрашена другим цветом, определялся на основании данных предыдущего геолого-физического исследования.

Технологический эффект. Основной оценкой технологического эффекта является снижение времени работников по отбору скважин-кандидатов на проведение методов увеличения нефтеотдачи и, как результат, высвобождения трудовых ресурсов и последующего их перераспределения на выполнение других задач.

Для анализа скважин-кандидатов на проведение МУН на этапе ежегодного планирования ведущему специалисту требуется 9 ч на обработку информации по 100 скважинам (со-

ответственно на обработку одной скважины требуется порядка 5 мин). А так как необходимо проанализировать порядка 3 500 скважин, то на это необходимо 315 ч, или 39 рабочих дней. В течение года также возможны дополнительные корректировки запланированной информации, соответственно, время обработки данных возрастает до 40 рабочих дней (320 ч).

При автоматическом формировании списка скважин-кандидатов время получения необходимой информации сокращается до 2–3 мин, что составляет 0,05 ч.

Соответственно, у специалистов в год появляется порядка 40 рабочих дней, которые можно перераспределить на выполнение других задач, или появляется возможность сократить время переработки сотрудников.

Сообщения	Дата	НГДУ	Месторождение	Объект разработки	Куст	Скважина	Профиль	Заключенный проект
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	22	150	неравномерный	нет
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	22	151	равномерный	нет
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	1	17	неравномерный	есть
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	25	173	неравномерный	нет
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	25	174	неравномерный	есть
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	25	175	неравномерный	нет
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	25	176	неравномерный	нет
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	1	19	неравномерный	есть
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	2	21	неравномерный	нет
<input type="checkbox"/>	январь 2016	НГДУ "ТН"	Северо-Талаканское	О-1	2	23	неравномерный	нет

Рис. 4. Информация по профилю скважин в модуле «Закачка вод – 2» портала «Геолого-промышленной информации»

Заключение. Ключевым моментом, с точки зрения разработки месторождений, является не только работа, связанная с регулированием объемов закачки воды по скважинам, но и с распределением объемов закачки агента с целью достижения соответствующего охвата заводнением и фронта вытеснения.

Представленная методика выявления скважин с неравномерным профилем приемистости позволит геологу максимально быстро осуществлять подбор более приоритетных скважин к обработке МУН с целью повышения нефтедобычи.

А учитывая высокую стоимость проведения данной обработки на каждой скважине, эффект от проведения МУНа на необходимой скважине позволит сократить затраты на их проведение.

Литература

1. Большая энциклопедия нефти и газа. URL: <http://www.ngpedia.ru>. (дата обращения: 20.04.2016).
2. Временная методика определения скважин с неравномерным профилем приемистости по нагнетательным скважинам, исследованным методом механической расходомерии (РГД) ОАО «Сургутнефтегаз». Сургут, 2016. 8 с.
3. Обзор современных методов повышения нефтеотдачи пласта. URL: <http://petros.ru/worldmarketoil/?action=show&id=267> (дата обращения: 20.04.2016).
4. Сургучев М. Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи». М. : Недра, 1985. 308 с.

УДК 621.316.7

Дёмко А. И., Радомский С. А., Алмазова Е. Г.
Demko A. I., Radomskiy S. A., Almazova E. G.

АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ

MULTIFUNCTIONAL LEVEL GAGE SELF-CONTAINED POWER SUPPLY

Для измерения уровня и температуры нефтепродуктов широко используются многофункциональные уровнемеры, значительную часть которых составляют автономные устройства. Время непрерывной работы таких автономных устройств определяется параметрами источника питания. В статье рассматриваются вопросы, связанные с исследованием и разработкой автономных источников питания, в которых используются солнечные батареи наряду с химическими первичными источниками.

Ключевые слова: уровнемер, энергоэффективность, солнечная батарея, ресурс.

В современной нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и нефтетранспортной отраслях промышленности широко используются уровнемеры для контроля уровня нефти и нефтепродуктов. С учетом высоких требований по точности измерения в широком температурном диапазоне и требований искробезопасности получили развитие автономные многофункциональные уровнемеры, представляющие собой законченные компактные устройства с длительным временем необслуживаемой работы. Время непрерывной работы таких многофункциональных уровнемеров определяется их токами потребления и параметрами автономного источника питания (АИП).

Рассмотрим беспроводные поплавковые уровнемеры [2], хорошо адаптированные к применению в нефтяной промышленности. Требования к выходному току и величине номинального напряжения питания АИП в этом случае определяется радиомодемом и схемой обработки, которые строятся с использованием современных энергоэкономичных микропроцессоров: номинальное значение напряжения обычно 3,3 В при небольших пределах отклонения от номинального значения ($\leq \pm 5\%$) и выходном импульсном токе потребления 15–30 мА (в зависимости от выходной мощности радиомодема) при среднем токе потребления не более 1–3 мА. При этом необходимо обеспечить высокую эффективность АИП (кпд), большое время работы при минимальных массе и габаритах.

В качестве основных первичных источников энергии АИП широко используются незаряжаемые химические источники тока на основе литиевых элементов (литий/тионилхлоридных, литий/диоксид серы, литий/диоксид марганца), которые обладают высокой удельной плотностью энергии, большим сроком хранения (до десяти – пятнадцати лет), малым током саморазряда и широким диапазоном рабочих температур. При этом приходится мириться с их недостатками – увеличением внутреннего сопротивления при низких температурах (что может являться причиной сбоев в работе электроники) и пассивацией, вызванной образованием окисной пленки (правда пассивация является причиной замедления процессов саморазряда и длительного сохранения первоначальной электрической емкости). Правильное использование свойства пассивации позволяет существенно повысить эффективность использования нескольких литиевых элементов в АИП.

Увеличение времени работы АИП можно достичь, дополняя незаряжаемые химические источники тока буферными накопителями на основе возобновляемых химических источников энергии – аккумуляторных батарей и конденсаторов, подзаряжаемых от альтерна-

тивных источников энергии (электромагнитной, тепловой, ветровой, солнечной и др.), что одновременно существенно повысит надежность длительной работы АИП.

Из альтернативных источников энергии наиболее компактными и удобными во всем температурном диапазоне работы многофункциональных уровнемеров являются солнечные батареи. В некоторых случаях солнечные батареи могут быть и основными источниками питания, но такое допустимо лишь ограниченное время и в определенных регионах (белые ночи).

В условиях непостоянства солнечной энергии, что характерно для зимнего времени и пасмурных дней, важной задачей является максимально эффективное преобразование этой энергии как для непосредственного питания промышленной электроники, так и заряда буферных накопителей [3], что решается путем использования схем заряда буферных накопителей, обеспечивающих слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи. Это позволяет оптимальным образом учитывать как изменение напряжения на выходе солнечной батареи, так и изменение тока нагрузки. Особенностью использования солнечной энергии являются также периодические изменения углов (по азимуту и по углу места) падения солнечного потока на поверхность солнечной батареи. Известен способ автоматической ориентации солнечных батарей и устройство для его осуществления с системой автоматического регулирования [1]. Однако при этом происходит снижение эффективности использования солнечной энергии, поскольку часть этой энергии используется для поворота солнечной батареи, увеличение массогабаритных показателей, поскольку кроме солнечной батареи необходима еще поворотная платформа и силовые электрические двигатели, ухудшающие работу при низких температурах, когда возрастают потери из-за повышения трения в механических узлах системы. В разработанной системе применены размещенные на цилиндрической поверхности солнечные батареи, обеспечивающие работу при любом азимуте солнца.

Следующим этапом оптимизации АИП является правильное распределение полученной от солнечных батарей энергии в различных буферных накопителях, обеспечивающих широкий температурный диапазон, большое число циклов заряд/разряд и необходимые требования к стабильности (допустимым пределам отклонения от номинального значения) выходного напряжения.

Современные литиевые аккумуляторные батареи являются компактными, герметичными, обладают высокой удельной плотностью запасаемой энергии, допускают от 200 до 500 циклов заряд/разряд и работают в температурном диапазоне от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Менее распространены литиевые аккумуляторные батареи, допускающие 1 000 и более циклов заряд/разряд и работающие в температурном диапазоне от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. В любом случае, при низких температурах электрическая емкость аккумулятора падает, а эффективность заряда значительно уменьшается.

Расширение температурного диапазона в сторону низких температур и одновременное увеличение ресурса литиевых аккумуляторных батарей возможно при использовании конденсаторов с двойным электрическим слоем (суперконденсаторов, ионисторов). Особенностью использования ионисторов является существенно отличный от аккумуляторов закон изменения (линейное нарастание) напряжения на выводах, величина которого для большинства моделей ограничивается значением 2,7 В. Применением нескольких последовательно включенных ионисторов (с соответствующими пассивными или активными схемами выравнивания) можно увеличить максимальное накопленное напряжение в целое число раз (до 5,4 В; 8,1 В или 10,8 В).

Использование ионисторов приводит к существенному увеличению времени работы аккумуляторов при ограниченном числе циклов заряд/разряд и расширению температурного диапазона, особенно в сторону низких температур, когда способность заряжаться и электрическая емкость ХИТ существенно ослабевают.

Управление порядком использования источников энергии целесообразно возложить на микропроцессор, который может измерять напряжения различных источников энергии и

необходимым образом посредством электронного коммутатора управлять их подключением. Структурная схема АИП изображена на рис. 1.

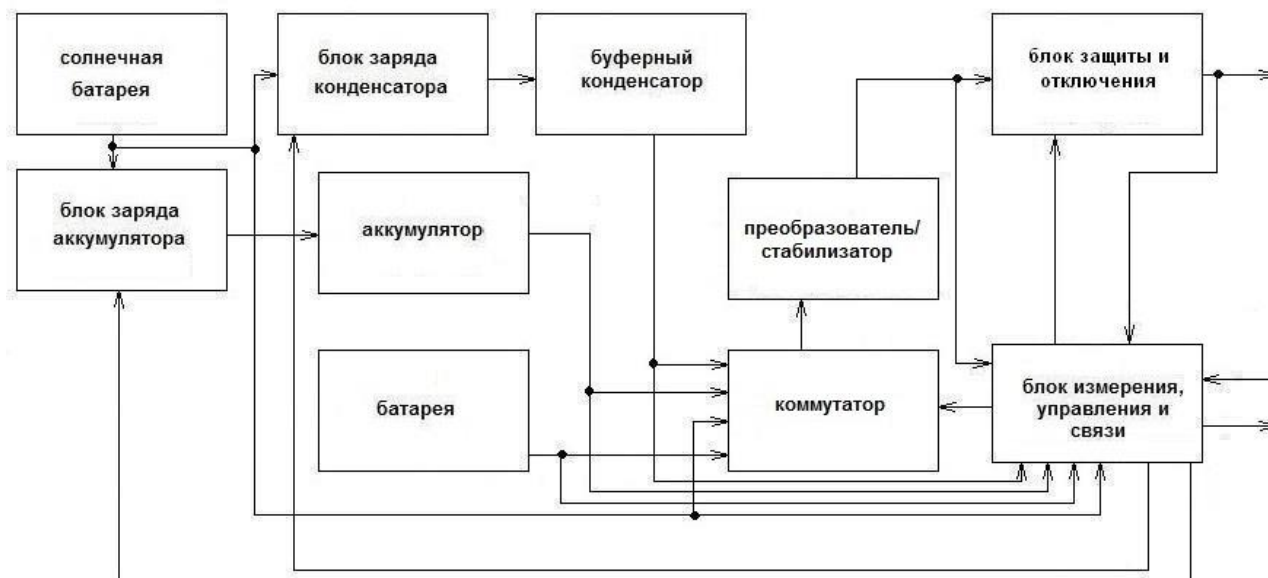


Рис. 1. Структурная схема АИП

Автономный источник питания состоит из цилиндрической солнечной батареи из хотя бы двух солнечных элементов, блока заряда аккумулятора, аккумулятора, блока заряда конденсатора, буферного конденсатора, хотя бы одной батареи, преобразователя/стабилизатора, коммутатора, блока защиты и отключения и блока измерения, управления и связи. Преобразователь/стабилизатор необходим для преобразования входного напряжения, которое может изменяться в определенных пределах в стабилизированное значение выходное напряжение необходимого для работы оборудования. Блок защиты и отключения необходим для предотвращения аварийных режимов работы при перегрузке или коротком замыкании в цепи нагрузки, а также для управляемого отключения выходного напряжения, например для перезапуска микропроцессора многофункционального уровнемера. Блок измерения, управления и связи производит измерение напряжений, подключает один из источников ко входу преобразователя/стабилизатора и осуществляет передачу данных о текущих параметрах электропитания во внешнюю цепь. Алгоритм работы АИП изображен на рис. 2.

По умолчанию питание нагрузки происходит от солнечной батареи, одновременно от солнечной батареи производится зарядка аккумулятора. Кроме этого, энергия солнечной батареи накапливается в буферном конденсаторе (для случая, когда аккумулятор уже заряжен и солнечная батарея обеспечивает энергию, превышающую потребности энергопотребления нагрузки, или для случая, когда температура окружающей среды низкая и эффективность заряда аккумулятора резко уменьшается).

При отсутствии достаточного солнечного потока питание нагрузки происходит от буферного конденсатора, а при его разряде до минимальной величины (порядка 1,0 В) от аккумулятора через DC/DC преобразователь, если заряд аккумулятора достаточен. При возобновлении подачи энергии от солнечной батареи происходит переключение питания нагрузки от солнечной батареи.

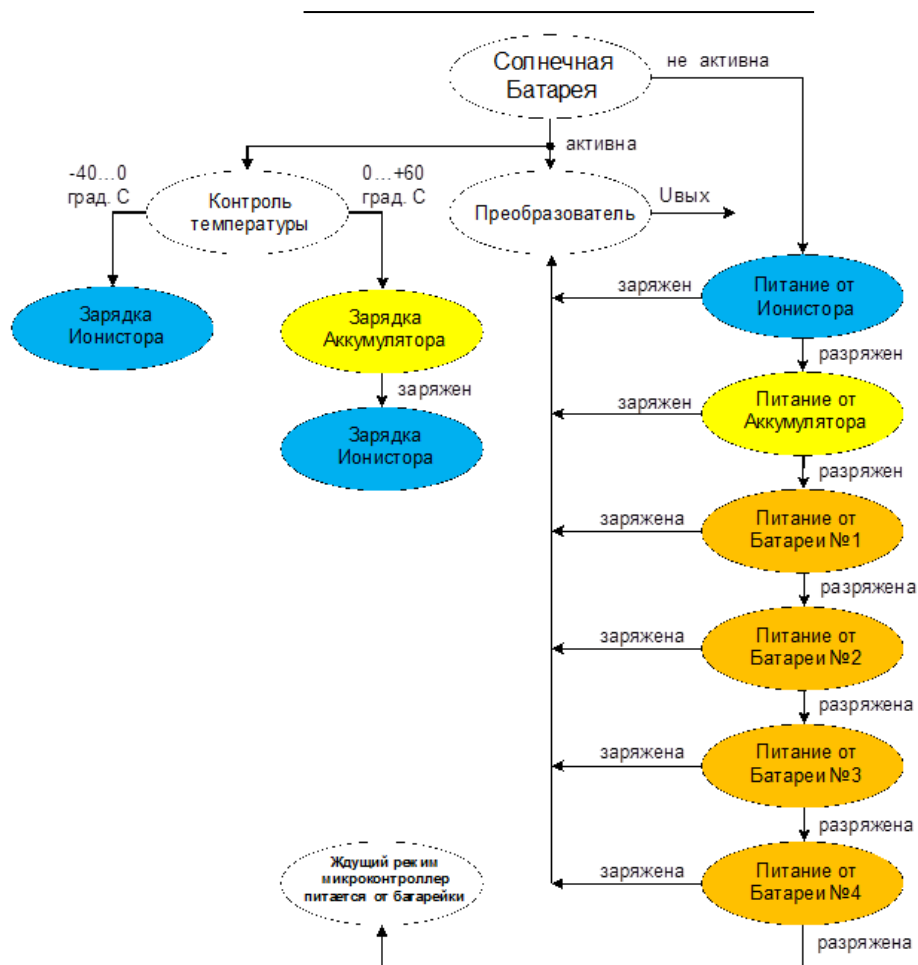


Рис. 2. Алгоритм работы АИП

Если аккумулятор разряжен, то при отсутствии достаточного солнечного потока происходит питание нагрузки от батарей, поочередно используя энергию каждой батареи. Одновременно контролируется напряжение солнечной батареи и аккумулятора, чтобы при их достаточности вернуться к ним.

Основная задача схемы – при заданной емкости батарей обеспечить максимальное время работы АИП, поэтому аккумулятор должен при первой возможности их заменять, естественно используя емкость аккумулятора не больше, чем на величину, обеспечивающую работу аккумулятора максимальное число циклов заряд/разряд. При расходовании емкости первой батареи происходит переход на вторую и т. д. Используется вариант включения первичных источников питания (батарей и аккумулятора) друг за другом.

В статье приведены результаты выполнения НИР, поддержанной грантом Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фондом содействия инновациям).

Литература

1. Патент RU 2516511, кл. G05B, опубл. 20.05.2014 г.
2. Сайт по измерителям уровня и АСУ. URL: <http://www.saric.ru/> (дата обращения: 25.04.2016).
3. Синютин Е. С. Новые интегральные решения для разработки сборщиков энергии из окружающей среды // Инженерный вестник Дона. 2014. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2714 (дата обращения: 25.04.2016).

УДК 004.896

Журавлев А. Е.

Zhuravlev A. E.

ОПЕРАТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

INDUSTRIAL COMPLEX OBJECTS ON-LINE MONITORING IN INTENSIVE INFORMATION EXCHANGE CONDITIONS

В работе рассматриваются основные аспекты и проблемы синергии различных по архитектуре и функциональному назначению информационных систем тестирования, мониторинга и учета промышленного комплекса организации в рамках единой информационной экосистемы. Рассмотрены вопросы повышения эффективности мониторинга за счет автоматизации комплекса оценочных процедур объекта.

Ключевые слова: информационная система, мониторинг, оперативный учет, промышленный комплекс, интеграция.

Актуальные методы мониторинга различных объектов все чаще обращаются к системам электронного (в том числе дистанционного) наблюдения и учета. С ростом потребности все разнообразнее становится рынок предлагаемых информационных систем, что, в конечном счете, приводит к высокой фрагментации и децентрализации отдельных компонент. Так, на базе условно-общего информационного поля организации в действительности могут функционировать совершенно автономные системы, которые, дублируя общие функции, могут иметь диаметрально противоположные подходы к их реализации. Эта ситуация ведет к уменьшению степени управляемости организации в целом, и процесса мониторинга в частности, что проявляется, например, в десинхронизации результатов и, как следствие, некорректной работе процедур мониторинга и управления организацией.

Для решения изложенной проблемы на базе одного из действующих информационных центров был проведен комплекс исследований, целью которых стала выработка основных целей и принципов дефрагментации типовой информационной системы (ИС). В качестве базы будущего дефрагментатора выбран метод взаимной интеграции существующих систем с целью обеспечения максимального уровня взаимодействия при сохранении действующих бизнес-процессов внутри каждой системы. Исходя из результатов исследования и последующей разработки технического задания, модуль интегратора должен обеспечить:

- устранение избыточности путем создания и сопровождения единой базы данных (БД) для всех систем-участников процесса мониторинга;
- поддержку разрабатываемого анализатора, позволяющего принимать и обрабатывать полученные результаты в реальном времени по множеству необходимых срезов;
- наличие единой статистической системы с целью выработки индивидуальных рекомендаций по любому из ведомых объектов на основе его работы во всех системах комплекса;
- удаленный доступ к БД с целью реализации свободного информационного обмена прогрессом;
- функционирование универсальных методов работы с потоками данных ИС как объектов процесса интеграции.

Полная универсальность такого подхода есть идея химерическая, на практике не достижимая, т. к. невозможно заранее абсолютно точно предсказать полный формат процесса ввода-вывода еще неизвестных методу ИС. Возможность обучения новым принципам фор-

матирования потоков данных заложена на уровне архитектуры команд интегратора и является для него во многом образующей.

Для реализации стратегии оптимального управления имеющимися ресурсами интегратором предусмотрены внутренние системные интерфейсы для ИС принятия решений «Каскад», имеющейся в составе функционирующей автоматизированной информационно-справочной системы (АИСС) «КСМ».

На примере интеграции ИС математической статистики «МатСтат» с ИС учета и управления ресурсами «Ресурс» АИСС «КСМ» демонстрируются основные элементы модуля «Интегратор». Несмотря на свое основное назначение, модуль также является важным функциональным дополнением к компоненте «Анализатор» за счет имеющихся механизмов конвертации сложных структур данных и их представления в удобном для обработки и отображения виде.

Взаимная интеграция ИС средствами условно-универсального модуля, обеспечивающего гибкий интерфейс для каждой клиентской ИС, позволяет воплотить в действительность идею единого информационного пространства организации, включающего в себя помимо систем обучения также кадровые, учетно-складские, бухгалтерские и административные ИС. Единое поле обладает рядом несомненных достоинств, таких как:

- общая, всегда актуальная БД, позволяющая в реальном времени отслеживать динамику протекающих в АИСС процессов, а также экономить целый пласт ресурсов, обычно затрачиваемых на процессы синхронизации данных отдельными локальными БД ИС;
- центральный портал доступа к сведениям БД, обеспечивающий единый интерфейс для всех категорий пользователей АИСС.

Унификация средств обеспечения безопасности при поддержке ИС «Анализатор» позволяет максимально оперативно выявить угрозу любому компоненту АИСС и изолировать подвергшийся атаке участок вместе со злоумышленником в специализированной «песочнице».

В АИСС «КСМ» интегратор выступает в роли программного коммутатора с функцией шлюза, потому весь его обменный функционал можно рассматривать как модель локальной вычислительной сети и межсетевое взаимодействие. Клиентскими узлами в данной модели выступают объекты работы интегратора, т. е. ИС, подлежащие организации взаимодействия. Роль сервера и контроллера берет на себя образующая АИСС «КСМ».

Функционал шлюза в рассматриваемой модели ИС реализован комплексом генетических алгоритмов, реализующих постулаты теории приближений относительно потоков и каналов передачи данных как объектов мутаций отбора. Коммутатор интегратора реализует систему распределенного хранения и передачи данных путем инициализации авторизованных туннелей класса «коммутатор-узел», экземплярами которого являются связи вида «интегратор-система» и «интегратор-поле», отвечающие, соответственно, за каналы связи коммутатора с клиентскими ИС и корневой АИСС. В том числе за счет этого, данная сетевая модель во многом наследует идеи семантической модели данных «сущность-связь», не только хранящей объекты данных, но и раскрывающей их смысловое обеспечение и взаимосвязь друг с другом.

Моделирование работы программной топологии с целью выявления ее слабых сторон и явных недостатков возможно провести в большинстве соответствующих программных сред. Например, среда «Трассер», являющаяся частью АИСС «КСМ» и используемая для обучения контингента студентов основам работы с корпоративными ИС и различными инфокоммуникационными системами, позволила оценить рассматриваемую модель на предмет надежности, избыточности и ресурсоемкости. Оценить эффективность семантической составляющей модели возможно благодаря ИС «Анализатор», работающей с конструкциями естественного языка.

Развитие топологии данной сетевой модели во времени напрямую зависит от этапа внедрения интегратора в действующее информационное поле организации. Так, на раннем

этапе, когда при сохранении существующих прямых связей между различными ИС вида «система-система» и «система-поле» выстраиваются новые связи вида «интегратор-система» и «интегратор-поле» топология является полносвязной, наследуя все ее основные особенности, достоинства и недостатки.

На промежуточном этапе при частичном сохранении связей «система-система» разрушается большинство связей типа «система-поле», функционал которых полностью заменяется совокупностью связей «интегратор-система» и «интегратор-поле», топология становится сетевой и по структуре напоминает граф, вершиной которого является соответствующий интерфейс ввода-вывода АИСС «КСМ».

На заключительном этапе внедрения полностью разрушаются остаточные связи типов «система-система» и «система-поле», тем самым исключая прямое взаимодействие между различными ИС информационного поля. Топология модели взаимодействия программных компонентов трансформируется в полноценную звезду, в центре которой находится интегратор, лучами являются связи типов «интегратор-система» и «интегратор-поле», а вершинами становятся ИС программного комплекса.

Как и в любой жизнеспособной системе, в АИСС существуют собственные исключения-выбросы. Одним из таких исключений являются местные клоны – идентичные по метаданным экземпляры ИС и БД. В качестве примера такого исключения можно назвать ИС «Кадры» и ее экземпляры «Кадры-ГЛ» и «Кадры-УФ». В исходной версии за взаимную координацию и синхронизацию информации отвечал отдельный информационный блок, который с введением интегратора признается недостаточно эффективным, и потому удаляется.

В соответствии с современными тенденциями разработки и внедрения различных ИС в организациях рассматриваемого типа необходимо обеспечить высочайшую степень защиты информации от всех возможных видов угроз. Унифицированная централизованная система безопасности в том числе максимально полно адаптирована под обеспечение работы таких подразделений, как архивы, управления информатизации, управления научно-инновационной деятельности, центры наблюдения и т. п.

Наибольшую угрозу безопасности представляют средства связи между физически распределенными ИС различных филиалов. Помимо стандартных средств защиты, таких как модуль сертификации, шифрование каналов связи и т. п., в рамках АИСС функционирует ИС «Страж», основной функцией которой является перехват псевдослучайных блоков данных в имеющихся информационных потоках и передача их в ИС «Анализатор». Далее механизмы анализатора проверяют блок данных на несоответствие эталону методом оценки десятков параметров, полный перечень которых является закрытой информацией, и в соответствии с выбранным уровнем чувствительности определяют наличие вторжения злоумышленника в канал связи. В случае обнаружения угрозы канал купируется и вместе с атакованной ИС изолируется в автономном пространстве с совершенно иными подходами к управлению информацией. За время изоляции специалист по безопасности должен при поддержке различных ИС комплекса идентифицировать угрозу и устранить причину ее появления. Решение о возможности разморозки атакованной ИС принимается ИС принятия решений «Процесс» в тандеме с администратором.

Одним из основных критериев оценки эффективности функционирования АИСС такого класса является показатель (коэффициент) масштабируемости модели и системы в зависимости от числа клиентских модулей ИС и задействованных систем обеспечения безопасности. В соответствии с проведенными исследованиями при пиковых нагрузках актуальная топология АИСС «КСМ» по данному показателю демонстрирует рост в 17–21 % по отношению к ее предыдущей версии, что в перспективе обеспечит значительно большую эффективность внедрения новых и модернизацию существующих компонент.

Рассмотренный интегратор позволяет облегчить работу персонала организации всех категорий, в том числе преподавателей, администраторов, инженеров и т. д., а также повысить степень достоверности работы аналитических подразделений, управленческих центров

и прогнозирующих служб, что крайне положительно скажется на экономических показателях работы предприятия. В целом автоматизация процесса интеграции учебных, административных и других ИС позволяет значительно увеличить самые различные коэффициенты эффективности функционирования организации и, как следствие, повысить ее общий рейтинг.

Литература

1. Журавлев А. Е. Об автоматизации системы контроля знаний в вузе в соответствии с положениями Болонского процесса // Новые информационные технологии в образовании : сб. науч. тр. XIV междунар. науч.-практич. конф. «Применение технологий «1С» для повышения эффективности деятельности организаций образования» 28–29 янв. 2014 г. Ч. 2. М. : 1С-Паблишинг, 2014. С. 77.

2. Журавлев А. Е. Автоматизация системы оценки качества освоения учебной программы : материалы XXV междунар. конф. «Применение новых технологий в образовании», «ИТО-Троицк-2014». М. : БАЙТИК, 2014. С. 412–413.

3. Журавлев А. Е. Особенности взаимодействия различных комплексов информационной экосистемы вуза на базе платформы 1С:Предприятие 8 // Новые информационные технологии в образовании // Применение технологий «1С» в условиях модернизации экономики и образования : сб. науч. тр. XVI междунар. науч.-практич. конф. «Новые информационные технологии в образовании» 2–3 февраля 2016 г. / под общ. ред. проф. Д. В. Чистова. Ч. 2. М. : 1С-Паблишинг, 2016. 336 с. С. 54–57.

УДК 004.89

*Лаврентьев М. М., Бартош В. С., Белого И. В., Лысаков К. Ф., Романенко А. А.
Lavrentiev M. M., Bartosh V. S., Belago I. V., Lysakov K. F., Romanenko A. A.*

ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ АРХИТЕКТУР: ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В РЕЖИМЕ ПОСТУПЛЕНИЯ

MODERN COMPUTER ARCHITECTURES POSSIBILITIES: PERFORMANCE TUNNING AND REAL-TIME DATA PROCESSING MODE

В работе описываются современные компьютерные тренажеры, позволяющие вырабатывать навыки управления техникой в виртуальном пространстве. Технология должна найти широкое применение при освоении Северных территорий. Обсуждаются новые возможности обработки данных наблюдений в полевых условиях за счет применения таких архитектур, как графические процессоры (GPU) и вентильные матрицы, программируемые пользователем (FPGA).

Ключевые слова: виртуальная реальность, компьютерные архитектуры.

Современные компьютерные тренажеры позволяют обучаемому получить практически профессиональные навыки управления сложной техникой, а также подготовиться к действиям в условиях внештатных ситуаций. За счет применения оригинальных алгоритмов удается достигать высокой реалистичности виртуального окружения. Созданы способы управления этим окружением в режиме реального времени. Качество работ подтверждается, например, долговременным сотрудничеством с Центром подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина (рис. 1). Так, перед каждым пилотируемым полетом основной и дублирующий экипажи проходят подготовку на тренажере стыковочного узла Международной космической станции на случай отказа автоматики (рис. 2). Такие отказы периодически происходят.



ДИПЛОМ

ИМЕНИ Ю. А. ГАГАРИНА

НАГРАЖДАЕТСЯ

Коллектив лаборатории программных систем машинной графики института автоматики и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук за вклад в разработку и изготовление синтезирующей системы визуализации «Альбатрос» и в связи с проведением 1000-й тренировки на тренажерах с ее использованием



Начальник Российского государственного научно-исследовательского испытательного центра подготовки космонавтов имени Ю.А.Гагарина

И.КЛИМУК

« февраля 2000 г.



Рис. 1. Общий вид виртуального образа Международной космической станции, диплом Центра подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина



Рис. 2. Тренажеры в ЦПК им. Ю. А. Гагарина. Тренажер «ВИН» (слева) и Тренажер стыковки «Телеоператор» (справа)

Технология применялась также в железнодорожных и автомобильных тренажерах, характеризующихся реалистичным моделированием динамики транспортных средств, адекватным отображением физических свойств сцены (столкновения виртуальных объектов, освещенность в зависимости от времени суток и погодных условий и др.), интеллектуальной системой генерации и управления виртуальных автомобилей, алгоритмом упреждающей подкачки информации и другими оригинальными разработками (рис. 3).



Рис. 3. Тренажер диспетчера сортировочной горки в г. Ярославле (слева). Сцена из компьютерного автотренажера с генерируемыми компьютером автомобилями, динамической системой отображения теней, работающими алгоритмами уменьшения детализации объекта при удалении от наблюдателя и др (справа)

На рис. 5–8 визуально представлены групповые и индивидуальные способы погружения в виртуальную среду, а также способы управления виртуальными персонажем и объектами.

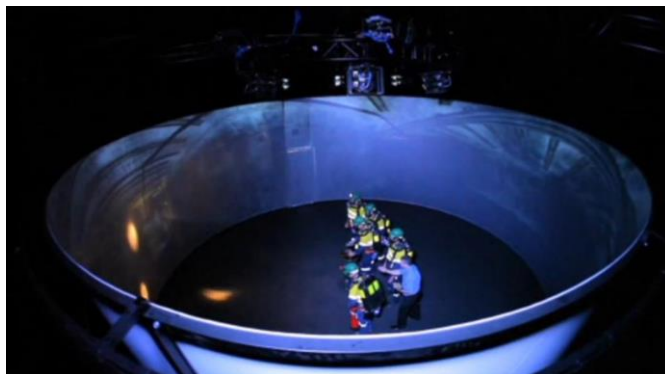


Рис. 4. Групповые средства погружения в виртуальную среду



Рис. 5. Индивидуальные средства

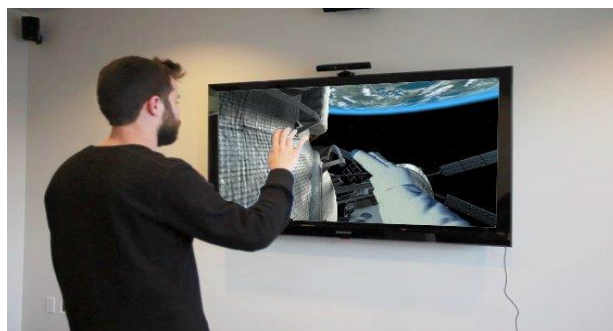


Рис. 6. Управление виртуальными объектами с помощью бесконтактных устройств, в данном случае движениями рук



Рис. 7. Управление виртуальными объектами с помощью имитаторов пультов



Рис. 8. Управление виртуальными объектами с помощью беспроводных имитаторов инструментов и объектов тренировок

Практически полное погружение обучаемого в виртуальную среду может достигаться за счет использования шлемов виртуальной реальности. Однако возможности их использования лимитируются проблемами упрощенного представления глубины изображаемого пространства. Отсутствие стимулов аккомодации и различной фокусировки глаза на предметы, которые находятся на разных расстояниях, ухудшает когнитивные способности восприятия глубины пространства, увеличиваются погрешности в оценке размеров и удалённости предметов, между аккомодацией и конвергенцией возникает конфликт, появляется бинокулярный стресс, утомление глаз, головная боль и т. д.

Предлагается разработка научно-технологических основ создания дисплейного устройства нового типа, использующего аккомодационные механизмы человеческого глаза. В результате будет построен индивидуальный мультифокальный дисплей с аккомодационной глубиной предъявляемого изображения. Шлем может применяться в профессиональных тренажерах, индустрии развлечений, системах визуализации дистанционного управления роботизированными манипуляторами и других областях. В настоящее время имеется лабораторный образец бифокального стереоскопического наголовного дисплея.



Рис. 9. Лабораторный образец бифокального стереоскопического наголовного дисплея

Применение графических процессоров (GPU) и вентильных матриц, программируемых пользователем (FPGA), позволяет ускорить выполнение задач по обработке данных до 1 000 раз, что позволяет существенно изменить сам подход инженеров и исследователей при проектировании тренажеров и решении других задач. Применение этих компьютерных архитектур возможно как на основе стандартного персонального компьютера (Desktop и Notebook), так и в виде автономных спецвычислителей. Коллектив разработчиков Новосибирского государственного университета (НГУ) имеет обширный опыт применения и внедрения вычислительных платформ и устройств на базе GPU и FPGA.

Сотрудники НГУ обладают экспертными знаниями во многих областях, а также имеют доступ к научным ресурсам институтов Сибирского отделения РАН, при этом сам университет является связующим звеном всех научно-исследовательских институтов Академгородка. С начала основания Академгородка здесь проводились исследования в том числе и в области разработки алгоритмов и параллельных архитектур. Тенденции развития отрасли высокопроизводительных вычислений таковы, что все больше вычислительных комплексов строится на базе гибридных блоков. Помимо центрального процессора в узлы вычислительного комплекса устанавливаются дополнительные сопроцессоры. В основном в качестве сопроцессора выступают карты на базе графических процессоров, реже – на базе XeonPhi. Также имеют свою нишу и спецпроцессоры на базе FPGA, функционирующие в составе ПК. Наш опыт показывает, что использование графических процессоров позволяет существенно повысить производительность расчетов и уменьшить время. Ускорение может меняться от 10 до 100 раз в зависимости от приложения. Наиболее распространенными являются графические процессоры компании NVidia и технология CUDA, позволяющая сравнительно легко адаптировать программы, написанные на языке C/C++. Отметим, что в 2011 г. НГУ получил статус учебного центра по технологии CUDA.

Одной из задач при анализе генома является поиск мотива в геномной последовательности. В рамках данной работы решалась задача по поиску шаблонов в последовательностях цепочек РНК. Было необходимо провести подсчет того, сколько каждый из приблизительно $2.5 \cdot 10^3$ шаблонов встретится во входной последовательности РНК с тем, чтобы в дальнейшем можно было делать выводы по схожести и/или различности геномов. Исходный код программы, предоставленный сотрудниками ИЦиГ СО РАН, требовал для расчетов две недели времени ПК или от 6 до 8 часов работы кластера из десятка узлов. После адаптации алгоритма и переноса большей части вычислительной нагрузки на GPU стало возможным проведение тех же расчетов за несколько часов на одном графическом процессоре [1]. В рамках этого же проекта совместно с сотрудниками Института цитологии и генетики СО РАН был спроектирован специализированный вычислитель на базе FPGA. При помощи специализированных программных средств было проведено моделирование производительности проектируемого устройства, результаты которого совпали с результатом, достигнутым при использовании кристалла XC5VLX50T семейства Virtex5. Время обработки составило всего 22 мин. Моделирование показало, что применение кристалла XC5VLX330T того же семейства, время исполнения составит 1 мин. По сравнению со стандартным ПК (двухядерный процессор) достигается ускорение на 4 порядка (в 10 000 раз).

Молекулярная динамика – повышение производительности специализированного пакета SIESTA (за счет проведения расчетов на графическом процессоре) при условии минимальной модификации исходного кода. После анализа кода было принято решение использовать специализированные библиотеки, оптимизированные под GPU, вместо тех, которые использовались в пакете. Были заменены вызовы из библиотек BLAS, LAPACK, FFTW, что на некоторых тестовых задачах дало трехкратное ускорение на одном GPU по сравнению с 8 ядрами центрального процессора.

Поиск источника сейсмического сигнала. В последнее время большой интерес проявляется к анализу малых сейсмических сигналов. Путем записи таких сигналов большим количеством приемников с последующим анализом появляется возможность определять параметры источника и, тем самым, структуру земной коры. Для решения этих задач применяются алгоритмы по стеккингу сигналов, поиску шаблонов, фильтрация и др. Было выполнено несколько работ по адаптации алгоритмов по обработке сигналов для сотрудников Института физики Земли в Париже. Для большинства задач получено ускорение в сотню и более раз [8], что позволило сотрудникам провести анализ полевых измерений за несколько дней вместо ожидаемых нескольких месяцев.

Разложение сейсмических данных по волновым пакетам. Данная задача решалась совместно с сотрудниками Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофи-

мука СО РАН. Задача разложения сейсмических данных по волновым пакетам характеризуется большим объемом входных данных (до нескольких терабайт) на нерегулярной сетке и большим количеством вычислений. Однако решение данной задачи позволяет регуляризовать сетку, фильтровать шум, заполнять пробелы в данных и сжимать информацию без потери значимого сигнала. Был выполнен перенос алгоритма на GPU и его оптимизация для многоядерной системы с общей памятью. В первом случае было получено ускорение порядка 45 раз по сравнению с исходной версией на CPU [3]. Сейчас ведется работа по включению реализованного на CPU алгоритма по преобразованию Фурье на нерегулярных сетках в библиотеку Intel MKL [2].

Моделирование переноса тепла. Ввиду больших размеров для решения задачи по переносу тепла был использован метод Монте-Карло [4], поскольку, как известно, такие методы хорошо адаптируются под параллельные вычислительные архитектуры. Это относится и к графическим процессорам. Одна из задач, которую надо решить – балансировка нагрузки, которая необходима ввиду наличия траекторий разной длины. Было предложено несколько способов, подобраны оптимальные параметры. Полученное время расчетов на одном графическом процессоре оказалось в десяток раз меньше, чем на шестнадцати ядрах центрального процессора.

Моделирование цунами. При моделировании распространения волны цунами по глубоководной акватории принято длинноволновое приближение системы Навье – Стокса (уравнения мелкой воды). Оптимизировалась производительность соответствующей части пакета MOST (Method Of Splitting Tsunami) [7], который является официальным инструментом службы предупреждения о цунами США. Модуль по расчету распространения волны цунами по глубокой воде был адаптирован и оптимизирован для применения GPU, в результате чего было получено ускорение от 45 до 100 раз в зависимости от размеров акватории [5; 6]. Это позволяет сократить время расчетов с часов до минут. В этом случае также алгоритм был портирован на FPGA в составе спецвычислителя, что позволило сократить время исполнения программы еще в 4 раза (таблица).

Используемые компьютерные архитектуры и достигнутая производительность для одного шага по времени, размер области вычислений $2\ 580 \times 2\ 879$ узлов

		До оптимизации	После оптимизации
1	Original code	3000 ms	3000 ms
2	AMD (6 core)	1800 ms	420 ms
3	Intel (8 cores)	300 ms	180 ms
4	CELL BE (PS3)	5000 ms	60 ms
5	GPU Tesla C1060	530 ms	20 ms
6	GPU Tesla K40	–	20 ms (double precision)
7	FPGA SLEDv7	–	7,85 ms
8	FPGA VC709	–	3,9 ms
9	FPGA VC709	7,85 ms	5,23 ms (double precision)

Литература

1. Вишневский О. В., Лаврентьев М. М., Романенко А. А. Применение графических ускорителей для выявления вырожденных олигонуклеотидных мотивов в регуляторных районах генов эукариот // Труды всероссийской конференции, приуроченной к 80-летию академика Годунова С. К. «Математика в приложениях». Новосибирск : Изд-во Ин-та математики СО РАН, 2009.
2. Матвеев А. С. Сравнительный анализ различных стратегий распараллеливания алгоритма преобразования Фурье на нерегулярных сетках // Тр. 52-й междунар. науч. студ. конф. МНСК-2014. Новосибирск, 2014.

3. Никитин В. В., Дучков А. А., Романенко А. А., Андерссон Ф. Параллельный алгоритм разложения функций по волновым пакетам для GPU и его применение в геофизике // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. : Информационные технологии. 2013. Т. 11. Вып. 1. С. 93–104.
4. Скуридина В. В., Дучков А. А., Романенко А. А., Аюнов Д. Е. Параллельная реализация алгоритма расчета влияния рельефа на оценку теплового потока земли // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. № 2. Т. 2. С. 70–75.
5. Lavrentiev M. M., Romanenko A. A. Tsunami wave parameters calculation before the wave approaches coastal line // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Busan, Korea, June 15–20. 2014. P. 96–102.
6. Lavrentiev M., Romanenko A., Lysakov K. Modern Computer Architecture to Speed-Up Calculation of Tsunami Wave Propagation // Proceedings of the Eleventh (2014) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Shanghai, China, October 12–16. 2014. P. 186–191.
7. Titov V. V. Numerical modeling of tsunami propagation by using variable grid // Proceedings of the IUGG/IOC International Tsunami Symposium. Computing center Siberian Division USSR Academy of Sciences, Novosibirsk, USSR. 1989. P. 46–51.
8. William B. F., Shapiro N. M., Husker A. L., Kostoglodov V., Romanenko A., Campillo M. Using systematically characterized low-frequency earthquakes as a fault probe in Guerrero, Mexico // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. URL: http://www.ipgp.fr/~frank/files/2014_JGR_systematic_lfe.pdf (дата обращения: 20.04.2016).

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

УДК 621.311.001.57:65.011:622.323

*Антонова В. М., Антипин Д. П., Сальников В. Г.
Antonova V. M., Antipin D. P., Salnikov V. G.*

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИСТОЩАЮЩИХСЯ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

ENERGY EFFICIENCY OF POWER SYSTEMS PETER OIL WELLS

Целью работы является рассмотрение объективной необходимости инновационного развития электроэнергетики на территории Западной Сибири (Югра). Обосновывается необходимость применения установок электроцентробежных насосов, рассматривается проблема снижения электроемкости добываемой нефти затухающих скважин ввиду сложной электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, установки электроцентробежных насосов, истощающиеся скважины.

Российская Федерация занимает ведущее место в мире по количеству добываемой нефти в сутки, её доля составляет 12 %. Доля нефтегазовых доходов в бюджете страны превышает 40 %. В условиях, когда стабильность цен на рынке нефти отсутствует (наблюдается падение) ставится под сомнение рентабельность разработок месторождений «трудноизвлекаемой» нефти (затухающих скважин). Дело в том, что пик открытия нефтяных месторождений в мире произошёл в 70-е годы прошлого столетия, а переход нефтяного месторождения в последнюю (четвёртую) стадию разработки в среднем составляет 25 лет [4]. Обострилась проблема повышения энергоэффективности добычи нефти, потому что возросли энергозатраты, добыча осуществляется механизированным способом, т. е. с помощью погружных установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Примерно 70 % нефти извлекается на территории Западной Сибири (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) с помощью УЭЦН, и в среднесрочной перспективе за ними остаётся преимущественная роль.

Популярность УЭЦН обусловлена основным их преимуществом перед другими способами механизированной добычи нефти. Оно заключается в отсутствии длинной механической связи между приводом и насосом, благодаря чему погружные установки имеют значительно большую мощность, чем штанговые (так называемые качалки), что даёт возможность поддерживать большие объёмы отбора жидкости из скважины при приемлемых значениях коэффициента полезного действия и надёжности установки.

Изложенное свидетельствует об объективной необходимости инновационного развития электроэнергетики этих регионов. В нормативном виде этот процесс закреплён в:

а) «Энергетической стратегии России на период до 2030 года», утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.12.2009 г. № 715–р, где в качестве стратегических ориентиров долгосрочной государственной энергетической политики были определены (среди других):

- энергетическая эффективность экономики,
- экономическая (бюджетная) эффективность электроэнергетики;

б) Федеральном законе «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 261–ФЗ от 23.11.2009 г.;

в) «Концепции развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью» от 07.08.2010, разработчики: ФГБУ «Российское энергетическое агентство», Министерство энергетики РФ, ОАО «ФСК ЕЭС», Российская академия наук, ОАО «НТЦ электроэнергетики».

Применение УЭЦН для добычи нефти из глубинных скважин увеличивает электроёмкость продукции (одной тонны добытой нефти) перед другими способами механизированной добычи (например «качалками»). При этом под электроёмкостью продукции понимается отношение всей потребляемой за год электрической энергии к годовому объёму добычи нефти. Снижение электроёмкости добываемой нефти указанным способом представляется актуальной проблемой затухающих скважин, особенно в Северных регионах России.

Эту проблему обостряет сложная электромагнитная обстановка (ЭМО) в системах электроснабжения, обусловленная наличием кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП) в электрических 6/0,4/3 кВ УЭЦН и недостаточной надёжностью воздушных линий электропередачи (ВЛ) 6кВ из-за «выталкивания» опор из земли. В распределительной сети среднего напряжения наблюдаются однофазные замыкания на землю, которые в определённых случаях невозможно устранить за одну неделю.

Исследование потерь электрической энергии в УЭЦН осуществляется на основе изучения «баланса электрической энергии», то есть системы показателей, отражающих полное количественное соответствие (равенство) между приходом и расходом электрической энергии. Выбор этого метода исследования обуславливается тем, что электрический баланс является статической характеристикой динамической системы электроснабжения. Однако этот баланс, в нашем случае, представляется в расшифровке по использованию (полезная энергия, потери) [7]. При этом под полезной энергией представляется количество энергии, теоретически необходимое для осуществления тех или иных энергетических процессов. В рассматриваемых электрических сетях переменного тока под это определение попадает активная мощность, поступающая из сети среднего напряжения.

Составить достоверный электрический баланс УЭЦН только расчётным методом невозможно из-за того, что параметры ЭМО, описывающие электромагнитную совместимость (ЭМС) технических средств, характеризуются неопределённостью (каждая скважина уникальна) и оценивается стохастическими методами. Поэтому изучение эффективности исследования электроэнергии на скважине, оснащённой УЭЦН, осуществлялось на действующей скважине Самотлорского месторождения нефти. На рис. 1 представлен баланс мощности УЭЦН, потребляемой из сети 0,4 кВ.

Потери мощности рассчитывались на основании измерений в характерных точках сети (Т1, Т2, Т3) и расчётов потерь мощности в элементах электрической сети (0,4–0,53) кВ по принятой методике [6]. Исходной величиной для баланса является активная мощность, которая потребляется из сети и характеризуется величиной $P_{\text{потр}} = 100 \%$.

Потеря мощности в кабельной линии 0,4 кВ от РУВН-6 кВ до станции управления «Электон-05-80» определялась как разница результатов измерений в Т1 и Т2 и составила 0,5 %. Потеря мощности в СУ «Электон-05-80» достигает 1,3 % при номинальной нагрузке погружного электродвигателя. Потеря мощности в кабельной линии 0,4 кВ от станции управления до промышленного трансформатора типа ТМГШ-63 0,4/0,7 кВ составила 0,5 % (конечная точка измерений Т3). Расчётные потери мощности: в промышленном трансформаторе оцениваются величиной 1,5 %, в кабельной линии 530 В – 1,3 %, в погружном электродвигателе типа ЭД16-103 – 18,2 %, в электроцентробежном насосе типа ЭЦНА 5-50-1 000 – 43,5 %, в трубах за счёт трения пластовой жидкости о стенки – 2,6 %.

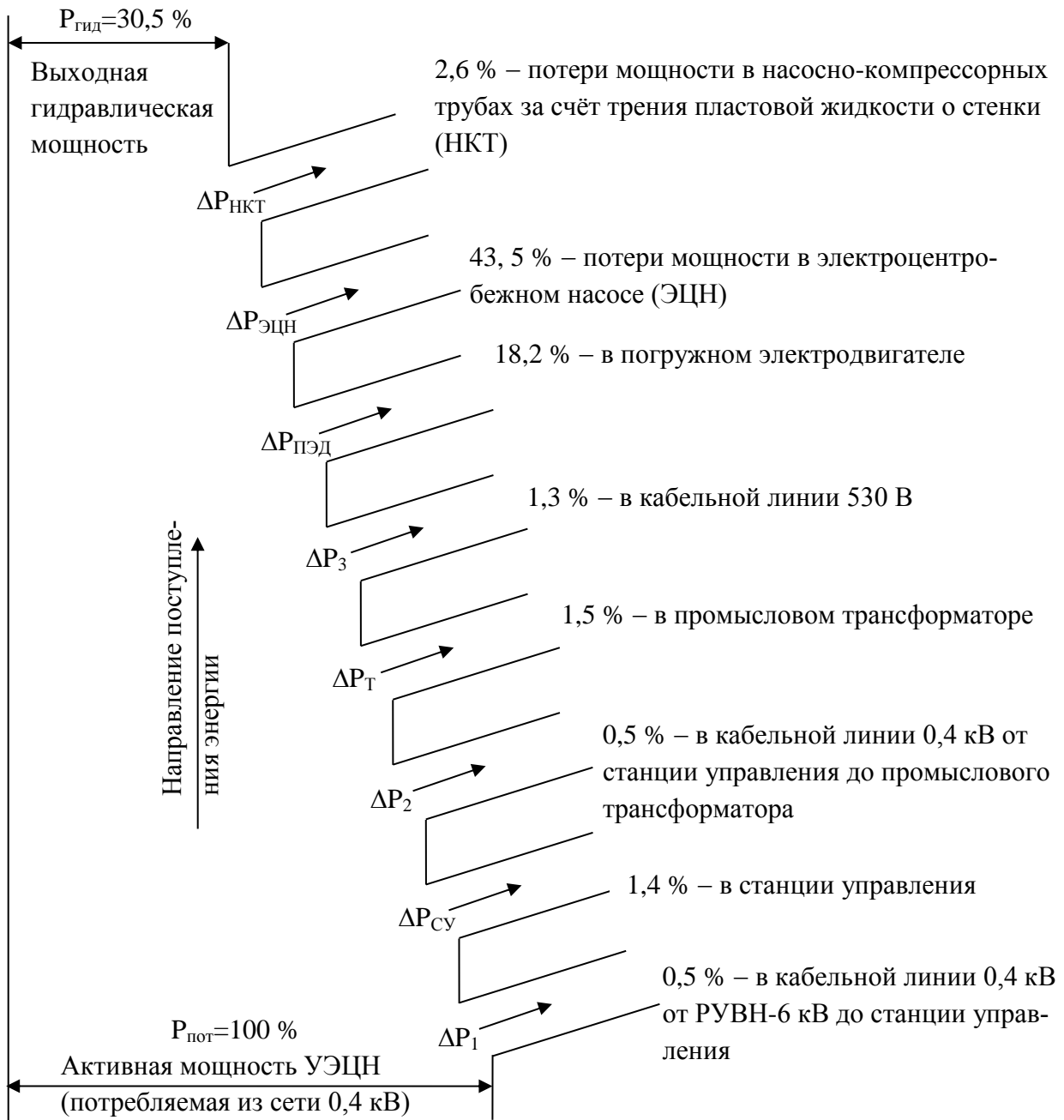


Рис. 1. Баланс активной мощности глубинной нефтескважины

Измерения мощности в характерных точках электрической сети (0,4–0,7) кВ при нормированных значениях показателей качества электроэнергии осуществлялось в течение 7 дней. Затем показания ИВК «Омск-М» усреднялись, определялись электрические показатели сети, рассчитывались потери в элементах сети. Общая относительная точность измерений и расчётов с вероятностью 0,95 составляет 7–11 %.

Баланс мощностей УЭЦН глубинной нефтяной скважины представляется уравнением

$$P_{потр} = \Delta P_1 + \Delta P_{СУ} + \Delta P_2 + \Delta P_T + \Delta P_3 + \Delta P_{ПЭД} + \Delta P_{ЭЦН} + \Delta P_{НКТ} + \Delta P_{гид}, \quad (1)$$

где ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 – потери в кабельных линиях различного назначения системы электроснабжения (рисунок 1). Подставляя значения составляющих баланса, получаем равенство подведённой к УЭЦН мощности и расходуемой

$$P_{потр} = 0,5 + 1,4 + 0,5 + 1,5 + 1,3 + 18,2 + 43,5 + 2,6 + 30,5 = 100 \% \quad (2)$$

Таким образом, основные потери полезной мощности наблюдаются в электроцентробежном насосе (44 %), в погружном асинхронном двигателе (18 %) и в системах преобразования, управления и передачи электроэнергии (5 %).

Совершенство УЭЦН скважины по добыче нефти как энергетической установки можно оценить коэффициентом полезного действия [отношением всего количества энергии (мощности), полезно использованной в установке, к количеству подведённой энергии (мощности)] [7]. Учитывая это, можем записать (применительно к эксперименту) следующее выражение

$$\eta_{\text{УЭЦН}} = P_{\text{гид}} / P_{\text{потр}} . \quad (3)$$

Для исследуемой УЭЦН типа ЭЦН А 5-50-1000 коэффициент полезного действия составляет

$$\eta_{\text{УЭЦН}} = 30,5 \% / 100 \% \approx 0,3 \quad (4)$$

Следовательно, УЭЦН как потребители электроэнергии имеют низкую энергоэффективность, которая требует дальнейшего совершенства системы добычи нефти из глубоких скважин. Актуальность этой проблемы признаётся в газонефтедобывающей отрасли, над её решением трудятся многие коллективы научных лабораторий и машиностроительных заводов [4].

Разработки ведутся по следующим направлениям:

- разработка и установка: отдельных энергоэффективных элементов электрооборудования УЭЦН. Примером такого успешного решения может быть замена погружного асинхронного двигателя на более энергоэффективный погружной вентильный электродвигатель, ротор которого оснащён постоянными магнитами, за счёт чего коэффициент полезного действия двигателя выше (до 10 %);

- комплексный подбор энергоэффективных элементов электрооборудования. Например, известный российский производитель оборудования для нефтедобычи (компания Борец) предлагает использование погружного вентильного электродвигателя типа ПВЭД 90-117 в паре с энергоэффективным погружным насосом ESP 400-1750. Эти насосы имеют более высокий коэффициент полезного действия (более 56 %), чем обычные, выполнены с использованием различных инновационных подходов и разработок;

- снижение потерь электроэнергии за счёт увеличения питающего напряжения погружных электродвигателей. Например, при 100 %-й загрузке стандартного погружного электродвигателя типа ПЭД 32-117-1000 (32 кВт) потери электроэнергии составляют 13,7 % при напряжении 1000 В и только 4,5 % при напряжении 2 000 В;

- интеллектуализация станций управления. Происходит это благодаря бурному развитию информационных технологий, а также возможности передачи данных на расстояния, например, с помощью систем телемеханики. В общем виде под интеллектуальной системой понимается техническая или программная система, способная использовать хранящиеся в её памяти знания для решения творческих задач, что традиционно считается прерогативой человека.

Факторами, обуславливающими эффективность их внедрения, является:

- большая доля потенциального фонда для внедрения данной технологии;
- возможность оптимизации режима без смены УЭЦН;
- автоматическое реагирование режима на изменение ситуации;
- охват ключевых элементов эксплуатации УЭЦН;
- минимизация субъективных ошибок (человеческого фактора).

Выводы:

1. На затухающих месторождениях нефти наблюдается увеличение количества скважин по добыче трудноизвлекаемой (энергоёмкой) нефти. Например, на месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры количество таких скважин достигло 70 %

от всех установленных. Из-за этого системы электроснабжения подвергаются постоянному воздействию, обусловленному изменением электрических нагрузок.

2. Теоретическое исследование базовых технологий построения действующих (пассивных) электрических сетей в свете возможного их инновационного развития на базе концепции Smart Grid для перехода к интеллектуальной ЭЭС с активно-адаптивной сетью системы электроснабжения затухающих месторождений нефти выявило необходимость в проведении экспериментального исследования на действующей скважине энергоэффективность УЭЦН и в оценке коэффициента преобразования энергетического ресурса в узле сети 6/0,4 кВ системы электроснабжения глубинной скважины. Без решения этих задач невозможно обеспечить технологическую преемственность в вопросах энергоэффективности и электроснабжения при переходе от существующей базовой технологии к новой с минимальными издержками.

3. Подключение компенсирующих устройств к шинам трансформаторной подстанции 6/0,4 кВ ведёт к разгрузке сети 6 кВ по реактивной мощности, к снижению потерь активной мощности и напряжения на трансформаторе и в сети высокого напряжения. Обеспечивается регламентируемый tgφ для сетей среднего напряжения, тем самым нефтедобыча (предприятие) избегает штрафных санкций [6]. Но при этом не решается вопрос уменьшения потерь активной мощности в кабельных линиях (0,4–0,7) кВ.

Литература

1. Гужов Н. П., Ольховский В. Я., Павлюченко Д. А. Системы электроснабжения. Ростов н/Дону : Феникс, 2011. 382 с.
2. Данилов Г. А., Денчик Ю. М., Иванов М. Н., Ситников Г. В. Повышение качества функционирования линий электропередачи / под ред. В. П. Горелова и В. Г. Сальникова. Новосибирск : Новосиб. гос. акад. водн. транспорта, 2013. 559 с.
3. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М. : ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
4. Ковалёва Н. А., Глотов А. А., Денчик Ю. М. Основные факторы влияния на качество функционирования электрических сетей северных месторождений полезных ископаемых // Электротехника. Энергетика. Машиностроение : сб. науч. тр. I междунар. науч. конф. молодых учёных. В 3 ч.: Ч. 2. Секция «Энергетика». Новосибирск, 2–6 декабря 2014 г. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014 г. 287 с. С. 20–23.
5. Костин В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики. Спб., 2003. 120 с.
6. Манусов В. З., Третьякова Е. С. Повышение энергоэффективности на промышленных предприятиях при выполнении глубокой компенсации реактивной мощности // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 5. С. 2–7.
7. Энергетический баланс. Терминология. Вып. 86. М. : Наука, 1973. 32 с.
8. Vorteile der Blindleistungskompensation im berblick. URL: <http://zvei.org/Publikationen/Blindleistung.pdf> (date of treatment: 01.12.2014).

УДК 621.311:621.314

Барбарош Н. С., Рыжаков В. В.
Barbarosh N. S., Ryzhakov V. V.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
НА ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 КВ
СО СДВОЕННЫМ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИМ РЕАКТОРОМ**

**TECHNICAL EQUIPMENT ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY
FOR TRANSFORMER SUBSTATION WITH VOLTAGE
HIGHER THAN 1 KV DUAL LIMITING REACTORS**

В статье представлена разработка концепции обеспечения ЭМС на трансформаторной подстанции напряжением выше 1 кВ со сдвоенным токоограничивающим реактором (ТР). В работе ставились и решались следующие взаимосвязанные задачи: проведение комплексного исследования в сети 10 кВ с изолированной нейтралью коммутационных импульсных напряжений на трансформаторной подстанции с ТР; исследование возможности обеспечения ЭМС кабельных линий с полиэтиленовой изоляцией в компенсированных сетях; экспериментальная проверка эффективности концепции обеспечения ЭМС на трансформаторной подстанции напряжением выше 1 кВ со сдвоенным ТР.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, токоограничивающий реактор, коммутационные импульсные напряжения, кабельные линии, полиэтиленовая изоляция.

Электрические сети среднего напряжения (от 6 до 35 кВ) в электроэнергетике России являются наиболее аварийными. Технологические нарушения режимов работы воздушных линий электропередачи этого класса напряжения в районах со сложными климатическими и грунтовыми условиями (районы Сибири и Севера) составляют 20–30 случаев в год на 100 км, а удельная повреждаемость кабельных линий – в пределах от 4,5 до 7. На трансформаторных подстанциях выше 1 кВ со сдвоенными токоограничивающими реакторами интенсивность пробоев изоляции вторичных обмоток трансформаторов (35–110)/(6–10) кВ в 1,5–2 раза выше, чем на подстанциях без этих реакторов.

Эти сети имеют значительный физический износ. Темпы нарастания изношенного электрооборудования составляют от 2 до 6 % в год от общего количества. Количество технологических нарушений в отечественных сетях среднего напряжения от двух до семи раз больше, чем в промышленно развитых странах.

Необходимо также учитывать, что во многих случаях изношенные кабели с бумажной пропитанной изоляцией заменяются на кабели с полиэтиленовой изоляцией (из сшитого полиэтилена). Однако эти кабели при дуговых однофазных замыканиях на землю не восстанавливают свою электрическую прочность. Они более чувствительны к воздействию высокочастотных коммутационных импульсных напряжений.

Исследования В. П. Горелова, А. Г. Овсянникова, Н. Н. Лизалека, Ю. А. Лаврова, Е. В. Ивановой, М. А. Короткевича, В. З. Манусова, К. П. Кадомской, В. Г. Сальникова и др. охватывают различные аспекты обеспечения ЭМС технических средств. Однако рассматриваемая проблема многогранна и одна из научно-технических задач – обеспечение ЭМС технических средств на трансформаторных подстанциях выше 1 кВ со сдвоенными токоограничивающими реакторами – не решена, так как нет соответствующего стандарта.

Целью исследования является разработка концепции обеспечения ЭМС на трансформаторной подстанции напряжением выше 1 кВ со сдвоенным токоограничивающим реакто-

ром. Для обеспечения этой цели в работе ставились и решались следующие взаимосвязанные задачи:

- разработка системы регистрации переходных режимов работы трансформаторной подстанции со сдвоенным токоограничивающим реактором в сети среднего напряжения при различных видах замыкания фаз на землю с изолированной или заземлённой через резистор нейтралью;

- проведение комплексного исследования в сети 10 кВ с изолированной нейтралью коммутационных импульсных напряжений на трансформаторной подстанции со сдвоенным токоограничивающим реактором;

- математическая обработка результатов экспериментальных исследований с целью получения эмпирических математических моделей для определения коммутационных импульсных напряжений на всех ветвях сдвоенного токоограничивающего реактора при различных видах замыкания фазы на землю;

- исследование возможности обеспечения ЭМС кабельных линий с полиэтиленовой изоляцией в компенсированных сетях;

- обоснование режима заземления нейтрали и разработка эмпирической математической модели для прогнозирования напряжения смещения нейтрали в сети 10 кВ с характерной удельной ёмкостью фаз на землю в зависимости от сопротивления резистора;

- экспериментальная проверка эффективности концепции обеспечения ЭМС на трансформаторной подстанции напряжением выше 1 кВ со сдвоенным токоограничивающим реактором.

Для достижения цели работы использовались: научно-техническое обобщение литературных источников по исходным предпосылкам исследований, методы теоретических основ электротехники и теории электрических сетей, методы математической статистики и теории вероятностей (теории планирования эксперимента, теории ошибок), метод аналитических исследований (гармонический анализ), рекомендованные Госстандартом России методы и средства измерения уровней ЭМС для кондуктивных ЭМП.

Проводились исследования содержания проблемы ЭМС на трансформаторной подстанции напряжением выше 1 кВ со сдвоенным токоограничивающим реактором. Анализировалось состояние электрических сетей среднего напряжения (от 6 до 35 кВ) России. Были отмечены особенности электромагнитной несовместимости кабелей с бумажной пропитанной изоляцией и кабелей с полиэтиленовой изоляцией, возникающие при однофазных замыканиях на землю. При одновременной эксплуатации этих кабелей основным моментом является не ограничения коммутационных импульсных напряжений, а сокращения длительности их воздействия на изоляцию из сшитого полиэтилена. Это обостряет проблему ЭМС технических средств.

Произведен анализ недостатков сдвоенного токоограничивающего реактора (рисунок 1), которые обуславливаются наличием магнитной связи между ветвями каждой фазы взаимной индуктивности M).

Внедрение кабелей с полиэтиленовой изоляцией обусловило появление нового фактора, который нельзя не учитывать при выборе режима нейтрали сети напряжением от 6 до 35 кВ. При одновременной эксплуатации кабелей с бумажной пропитанной изоляцией и кабелей из сшитого полиэтилена основным моментом является не ограничение коммутационных импульсных напряжений, а устранение самого факта их длительного воздействия на изоляцию. Эти условия обеспечиваются в компенсированной сети при резонансной настройке дугогасящих реакторов (ДГР). Однако этот режим работы из-за невозможности оперативного обеспечения этой настройки ДГР с ёмкостью сети мало вероятен. В связи с этим исследовалась реакция ДГР с подмагничиванием типа РУОМ-190/11 с системой настройки типа САНК-4.2 на возмущения, возникающие в сети 10 кВ подстанции 110/10 кВ «Городская» ПО «Заволжского производственного объединения» ОАО «МРСК Волги», при ОЗЗ. Задача по определению времени выхода на установившийся режим компенсации этого реактора t_y при

металлическом ОЗЗ представлена как экстремальная, решение которой осуществлено методом планирования эксперимента. Основными факторами, влияющими на t_y , являются ток замыкания фазы на землю I^* , представленный в относительном значении (отнесённый к максимальному значению тока ДГР 2-часовой нагрузки), и момент замыкания U^* , который обуславливает фазное напряжение.

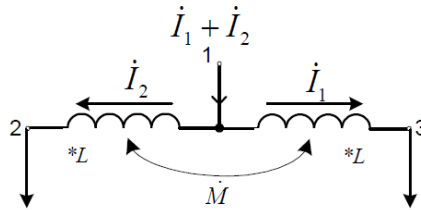


Рис. 1. Электрическая схема двояного токоограничивающего реактора

Для прогнозирования времени выхода этого реактора на установившийся режим компенсации ёмкостного тока на землю получена эмпирическая математическая модель:

$$t_y = 5,9 - 1,2I^* - 2,1U^* + 1,6U^* I^* \quad (1)$$

$$\text{при } 0 < U^* = (U_\phi / U_{\phi\max}) \leq 1,0, \quad (2)$$

$$0,2 \leq I^* = (I_3 / I^{(2)}) \leq 1,1, \quad (3)$$

где $I^{(2)} = 30\text{А}$ – максимальное значение непрерывно изменяющего тока реактора двухчасовой нагрузки; I_3 – величина тока замыкания на землю; U_ϕ – величина фазного напряжения в момент замыкания фазы на землю, В; $U_{\phi\max}$ – амплитудное значение фазного напряжения, В.

Относительные ошибки расчётов t_y с вероятностью 0,95 не превышают $\pm 5\%$. Областью применения этой математической модели являются сети 10 кВ, нейтрали которых заземлены через ДГР с подмагничиванием. Исследование уравнения (1) показывает, что математическое ожидание величины t_y находится в пределах от 4,3 до 5,6 с. Из-за этого система не имеет достаточного быстродействия для предотвращения разрушения полиэтиленовой изоляции.

Доказано, что заземление нейтрали сети 10 кВ через резистор с вероятностью 0,95 снижает кратность коммутационных импульсных напряжений при ОДЗ не менее, чем в 1,2 раза. Предложена, с учётом полученных результатов, концепция построения релейной защиты фидеров трансформаторной подстанции напряжением выше 1 кВ со двоянным токоограничивающим реактором и выбора нелинейных ограничителей перенапряжений.

Для обеспечения электромагнитной совместимости технических средств на трансформаторной подстанции напряжением выше 1 кВ со двоянным токоограничивающим реактором рекомендуется резистивное заземление нейтрали сети. Этот режим позволяет:

- увеличить активную составляющую тока замыкания фазы на землю, которая используется для обеспечения необходимых селективности и чувствительности релейной защиты от однофазных замыканий на землю;

- обеспечить устойчивое горение электрической дуги при однофазных дуговых замыканиях на землю при отношении активной составляющей тока к ёмкостной равном и более 1,8–2,5;

- выбрать оптимальные установки нелинейных ограничителей перенапряжений для ветвей реактора.

При подключении резистора к нейтрали сети 10 кВ кратность коммутационных импульсных напряжений на ветвях реактора снижается с вероятностью 0,95 не менее, чем в 1,2 раза, сокращается время воздействия этих напряжений на изоляцию сети.

Литература

1. Аристер Н. И., Резник С. Д. Управление диссертационным советом : практич. пособие / под общ. ред. проф. Ф. И. Шамхалова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2011. 319 с.
2. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1993. 14 с.
3. Иванова Е. В., Руппель А. А. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях 6–10 кВ / под ред. В. П. Горелова. Омск : Омский филиал НГавт, 2004. 284 с.
4. Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / под ред. В. П. Горелова, Н. Н. Лизалека. Новосибирск : Новосиб. гос. акад. вод. транспорта, 2006. 432 с.
5. Каневский Я. М. Обеспечение стойкости токоограничивающих реакторов 6–10 кВ при коротких замыканиях // Электричество. 1987. № 6. С. 37–39.
6. Конов Ю. С., Малышев А. В. Анализ работы токоограничивающих реакторов 6–10 кВ при двойных замыканиях на землю // Электрические станции. 1987. № 6. С. 33–37.

УДК 621.311:004.896

Баус С. С.
Baus S. S.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

METHODOLOGICAL BASES AND REALIZATION PRINCIPLES OF SMART GRIDS IN NORTHERN RUSSIAN REGIONS CONDITIONS

Данная статья посвящена представлению методологических основ и принципов реализации интеллектуальных энергосистем в условиях северных регионов России. Актуальность данной статьи обусловлена рассмотрением алгоритма и принципов реализации интеллектуальных энергосистем с учетом специфики северных районов РФ. Данное методологическое обеспечение позволит реализовать энергосистемы на данных условиях, что, в свою очередь, существенно повысит управляемость систем, сократит потери и издержки, повысит эффективность, а самое главное – обеспечит бесперебойное оказание услуг потребителю.

Ключевые слова: интеллектуальная энергосистема, методология, управление, принципы, северный регион, эффективность.

В наше информационное время именно автоматизация и качество выходят во главу мировой экономики, как нельзя кстати встает вопрос о создании интеллектуальных энергосистем, носящий для любой страны стратегическое значение. Разработка и внедрение инноваций в этой области должно привести к существенному повышению производительности энергосетей, ускорению процессов автоматизации при одновременном сокращении затрат и повышении качества, обеспечить возможности интегрированного и оптимального использования возобновляемых источников энергии и систем распределенной генерации. Произойдет укрепление взаимосвязей между технологиями энергоснабжения и энергопотребления, а также между потребителями и предприятиями коммунального комплекса, причем такое взаимодействие станет обоюдовыгодным. Однако нужно быть готовым к тому, что на пути к

достижению этой цели придется понести большие расходы и решить ряд сложнейших задач. Для этого необходимы существенные капитальные вложения. Речь идет о трансформации энергосетей в направлении от электромеханических к полностью цифровым системам. Для того чтобы обеспечить реализацию максимального потенциала, необходимо проделать большую работу по разным направлениям. Причем компаниям придется столкнуться с непростыми дилеммами при принятии решений по многим вопросам. Речь может идти об определении сроков вложения средств, выборе партнеров по внедрению новых технологий, поиске возможностей максимизации соотношения издержек и прибыли для своей компании, а также энергосистемы и общества в целом, а также о решении такого важнейшего вопроса, как проведение необходимой модернизации с высокой эффективностью и в установленные сроки.

В данный момент в целом в России данная область, к сожалению, развита слабо, что наглядно показывают экономические показатели рентабельности энергетических систем, себестоимостью производства энергии, эффективности и потерь при доставке до потребителя, поэтому необходимо выработать методический и системный аппарат для реализации собственных интеллектуальных систем со спецификой российской реальности и климатических условий, а также основательно изучить международный опыт реализации данных систем, в особенности, таких стран, как США, Канада, Германия и Япония [1].

Благодаря этим уникальным свойствам потребление электроэнергии в мире неуклонно растет, опережая темпы роста мировой экономики в целом. По последнему прогнозу МЭА-2209, потребление электроэнергии в мире будет расти с темпом 2,7 и 2,4 % соответственно в 2007–2015 гг. и 2015–2030 гг. и достигнет суммарного объема к концу этих периодов 20,38 трлн (с выработкой 24,35 трлн) и 28,93 трлн кВт·ч (с выработкой 34,29 трлн кВт·ч). Установленная мощность электроэнергетических систем стран мира постоянно увеличивается из-за ввода новых типов генерирующих электростанций, использующих и возобновляемые, и невозобновляемые энергетические ресурсы, географически расположенные в разных странах и даже континентах, что существенно усложняет электроснабжение потребителей, требующих надежного, безопасного и экономичного его режима.

В частности, состояние энергетики районов Севера, особенно районов Азиатского Севера, требует развития и модернизации в свете задач по дальнейшему росту производительных сил и улучшению условий работы и быта людей в суровых условиях Севера, так как во многих районах Севера именно энергетика сдерживает освоение природных ресурсов, внедрение и развитие прогрессивных, но энергоемких технологических процессов, создание благоустроенных поселений.

До последнего времени основным источником энергоснабжения во многих районах Севера остаются мелкие дизельные электростанции и котельные, работающие на угле местной добычи, отличающиеся высокой себестоимостью электроэнергии (до 20 руб/кВт·ч) и тепла (до 50 руб/Гкал) и повышенными трудовыми затратами на их производство [2].

Подавляющее большинство населенных пунктов и жилого фонда районов Севера еще не оборудованы центральным отоплением, горячим водоснабжением, водопроводом, канализацией и другими элементами благоустройства. В то же время обеспечение эффективного промышленного производства и нормальной жизни населения в суровых природно-климатических условиях Севера требует повышенных удельных затрат электроэнергии и тепла, особого внимания к созданию комфортных бытовых условий жизни [4, с. 21].

Одной из острых проблем энергетики Севера является обеспечение надежности энергоснабжения. Перебои в подаче электроэнергии и тепла не только влекут за собой в экстремальных условиях Севера большие народнохозяйственные потери, но могут иметь и катастрофические последствия.

Важно, чтобы государство понимало, что без сближения и синтеза различных областей науки и секторов экономики, в том числе промышленности (электроники), невозможно полностью реализовать правильную и эффективную функциональность энергосистемы.

Реализация внедрения и совершенствования данных систем, а также Факторы успеха заключаются в четком и последовательном выполнении параметров стратегического планирования и алгоритма реализации. Данный алгоритм включает в себя следующие параметры:

- разработка нормативной базы;
- разработка стратегии;
- подготовка;
- внедрение;
- техническое и информационное обслуживание.

Ведущая роль в этой работе отводится предприятиям коммунальной энергетики. Все это влияет на то, каким образом компании определяют, выбирают и используют потенциал сотрудничества с компаниями-партнерами. К важным факторам, под воздействием которых формируются отношения в рамках создаваемых альянсов, можно отнести оперативность, гибкость, надежность и общность взглядов [2].

Задачу развития интеллектуальных энергосистем и модернизации энергосетей невозможно решить без создания нормативной базы, дающей стимул к своевременному вложению средств и обеспечивающей эффективность запланированных действий. Так как одной из целей «умных» энергосистем является развитие динамичной и интерактивной инфраструктуры, то и создание нормативной базы должно осуществляться в рамках двустороннего процесса [3, с. 142]. В ходе данных мер предприятиям и регулирующим органам необходимо профессионально прогнозировать конечный экономический эффект с точки зрения потребителей, а также применительно к окружающей среде и хозяйственной деятельности предприятия, провести моделирование и анализ последствий реализации различных сценариев развития системы нормативного регулирования, оценку и сопровождение в целях оптимизации использования программ государственных субсидий.

Лабораторный опыт и расчетные значения показывают, что снижение пика нагрузки энергосистемы США на 8 % в результате внедрения и использования ИЭС и ее управление позволит экономить до 80 млрд долл. инвестиций в течение ближайших 20 лет, а установка высокоинтеллектуальных технологий регулирования спроса на электроэнергию в жилищном секторе государства может дать дополнительно экономию на инвестициях компаний до 325 млрд долл. в течение этого периода (снижение пика нагрузки до 25 %). Интеллектуальные технологии в настоящее время являются весьма дорогими, однако «отказ от их внедрения оказывается еще дороже» – утверждают эксперты ряда исследовательских центров США, что подтверждается и опытом внедрения интеллектуальных информационных систем в итальянской компании ENEL, срок окупаемости которых не превышает и 5 лет [2]. В целом внедрение ИЭС оказывается весьма эффективным вследствие целого ряда новых условий, в частности:

- возможности обеспечения баланса спроса на электроэнергию и ее предложения в оперативном, текущем и перспективном управлении энергосистемами;
- предупреждения аварийных и предаварийных ситуаций в энергосистеме [2];
- возможности самовосстановления конфигурации системы после аварийных отключений ее элементов, поддержания высокого качества (стандартного) электрической энергии [4, с. 24];
- высокой адаптации элементов энергосистемы к изменению параметров внешней и внутренней среды;
- возможности установки оптимального режима нагрузки электростанций энергосистемы, использующих возобновляемые и невозобновляемые энергоносители [1];
- обеспечение экологической безопасности территорий в зоне действия ИЭС;
- повышение эффективности использования производственных активов энергетических компаний, стоимость которых постоянно увеличивается быстрыми темпами [2] (таблица).

Сравнение параметров традиционных и интеллектуальных энергетических систем (ИЭС)

Параметры	Традиционная энергосистема	Интеллектуальная энергосистема
Коммуникации с потребителем	Отсутствует либо односторонняя	Двухсторонняя
Взаимодействие с потребителем	Ограничено	Основа
Тип измерений параметров системы	Электромеханический	Цифровой
Скорость получения информации о состоянии системы	Раз в четыре секунды	30 и более раз в секунду
Эксплуатация и техобслуживание	Трудоемкая диагностика оборудования с выводом из работы	Удаленный мониторинг
Обеспечение энергоснабжения	Централизованная генерация	Централизованная и распределенная генерация
Контроль потока энергии	Ограниченный	Всеобъемлющий
Надежность	Склонность к отказам и авариям	Адаптивная защита и секционирование
Восстановление нормального режима	Ручное, действиями персонала	Самовосстановление
Топология	Радиальная	Сетевая

На рис. 1 отображена схема взаимодействия различных составляющих полной интеллектуальной энергетической системы в рамках экономики региона, а также в целом страны.

Важнейшей составляющей любого успешного внедрения является реализация программы создания интеллектуальной энергосистемы в срок и в рамках проектной документации. Успех или провал предприятий коммунальной энергетики в первую очередь зависит от таких факторов, как правильный выбор партнеров, технологий, стратегии закупок и организации подрядных работ, достижении максимальной реализации потенциала дальнейшего инновационного развития при достижении целевых показателей рентабельности [5].

Произведя анализ процессов и процедур модели системы по девяти функциям (организационная структура, финансовое управление, коммуникации и отчетность, цепочка поставок, контроль сроков проведения работ, управление рисками и проблемными вопросами, контроль системы и технологии), необходимо выгодно использовать свое понимание специфики ЖКХ и энергетической отрасли, а также проектов внедрения систем учета электроэнергии нового поколения, спроектировать и внедрить улучшения в процессы и механизмы контроля офиса управления, отвечающие потребностям проекта и проектной группы.

Успех после внедрения системы будет в первую очередь зависеть от того, что делается в ходе внедрения. Коммунальщики должны уяснить, что те трудности, с которыми им придется столкнуться, не закончатся с установкой новых счетчиков и сенсоров. Компаниям нужно научиться пользоваться теми преимуществами, которые предоставляются с внедрением систем управления информацией в режиме реального времени, способных осуществлять мониторинг любых данных от показателей производительности электростанций до предпочтений потребителей и показаний приборов, при этом находя правильный баланс между энергоснабжением и потреблением электрической энергии с использованием действующих и новых способов генерации. Тем самым необходимо менять принципы работ, повышать профессиональный уровень работников в освоении новых систем и технологий.



Рис. 1. Схема взаимодействия элементов энергетической системы

В заключение хочется отметить, что в настоящее время видится в РФ некий сдвиг в разработке интеллектуальных энергосистем. Правильный системный подход в совокупности с алгоритмом реализации данных систем и теоретической и практической составляющей их эффективности и рентабельности даст повсеместное применение данных систем на практике, что в наше время имеет стратегическое значение для каждого субъекта и государства в целом.

Литература

1. Артюшин Л. К. Инжиниринг объектов интеллектуальной энергетической системы. Проектирование. Строительство. Бизнес и управление : практич. пособие. М. : Изд-во МЭИ, 2014.
2. Будущее – за интеллектуальными энергосистемами. URL: <http://www.energyland.info/analitic-show-99417> (дата обращения: 20.04.2016).
3. Головинский И. А. Разработка методов и алгоритмов автоматизации планирования и контроля оперативных переключений в электрических сетях энергосистем. М. : НФЦ, 2004.
4. Дорохов С. П. Интеллектуальные системы в энергетическом комплексе. М. : МЭИ, 2011.
5. Предпосылки к созданию интеллектуальных электрических сетей в России. URL: <http://www.jext.org/node/140> (дата обращения: 20.04.2016).
6. Роль интеллектуальных систем в нефтегазовой отрасли: предпосылки и перспективы. URL: <http://www.avite.ru/ngk/stati/rol-intellektualnyih-sistem-v-neftegazovoy-otrasli-predposylki-i-perspektivy.html> (дата обращения: 20.04.2016).

УДК 621.315.01/.05.001.57

Бурмистрова Е. А., Голдобин Д. А.
Burmistrova E. A., Goldobin D. A.

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА АВАРИЙНОЙ ФАЗЕ ВЛ 500 кВ В ЦИКЛЕ ОАПВ

QUASI-STATIONARY RESEARCH AND TRANSIENT PROCESSES AT EMERGENCY PHASE HV LINE OF 500 KV IN SINGLE-PHASE RECLOSING

Результаты, представленные в статье, получены при использовании модели ЛЭП с учетом распределенности её параметров, электростатического и магнитного влияния здоровых фаз на аварийную, потерь в земле и других элементах схемы. Рассмотрены квазистационарные и переходные процессы на аварийной фазе на всех стадиях цикла ОАПВ, произведен анализ характеристик тока подпитки, включая аperiодическую составляющую. Произведена оценка эффективности технических решений, направленных на сокращение бестоковой паузы и повышение надежности магистральной линии электропередачи.

Ключевые слова: воздушная линия, короткое замыкание, однофазное автоматическое повторное включение, ток подпитки дуги, аperiодическая составляющая, восстанавливающееся напряжение.

Однофазное автоматическое повторное включение линий электропередачи (ОАПВ) при наиболее частых видах аварий на ЛЭП (однофазных коротких замыканиях) является эффективной мерой повышения надежности энергоснабжения по магистральным ВЛ и устойчивости работы энергосистем, когда аварийная фаза отключается на несколько секунд, а режим передачи мощности полностью не прерывается. Основная задача, возникающая при применении ОАПВ – это установление оптимальной и требуемой для его успешного осуществления длительности «бестоковой» паузы в конкретной проектируемой или эксплуатируемой ВЛ 500 кВ.

Основными проблемами осуществления успешного цикла ОАПВ являются корректная оценка токов подпитки дуги и условий ее погасания, а также выявление возможных резонансных процессов восстановления напряжения на отключенной фазе при использовании на ЛЭП шунтирующих реакторов. Известные из [1; 2; 5] методики оценки токов подпитки и резонансных областей предполагают упрощенное моделирование ситуации в виде схем с сосредоточенными параметрами, не учитывающих активные потери в проводах, земле, шунтирующих реакторах (ШР). Кроме того, нет ответа на вопрос о взаимодействии электростатической и электромагнитной составляющих тока подпитки дуги и процесса восстановления напряжения на аварийной фазе, о влиянии распределенности параметров ЛЭП, места КЗ и прочих влияющих факторах. Критерием погасания дуги подпитки обычно считается действительное значение его периодической составляющей без обсуждения возможной действительной формы этого тока, содержащей в схемах с шунтирующими реакторами значительную аperiодическую составляющую.

В отличие от известного подхода [1; 2; 5] предлагается производить моделирование паузы ОАПВ в виде полного расчета переходного процесса, включающего в себя выход на стационарный полнофазный режим передачи энергии, осуществление внезапного КЗ, переход тока КЗ в ток подпитки дуги, гашение тока подпитки, восстановление напряжения на аварийной фазе, завершение цикла ОАПВ восстановлением исходной схемы (рис. 1). Такой

подход дает наиболее полную информацию о параметрах происходящих процессов и отражает реальную ситуацию в эксплуатации.

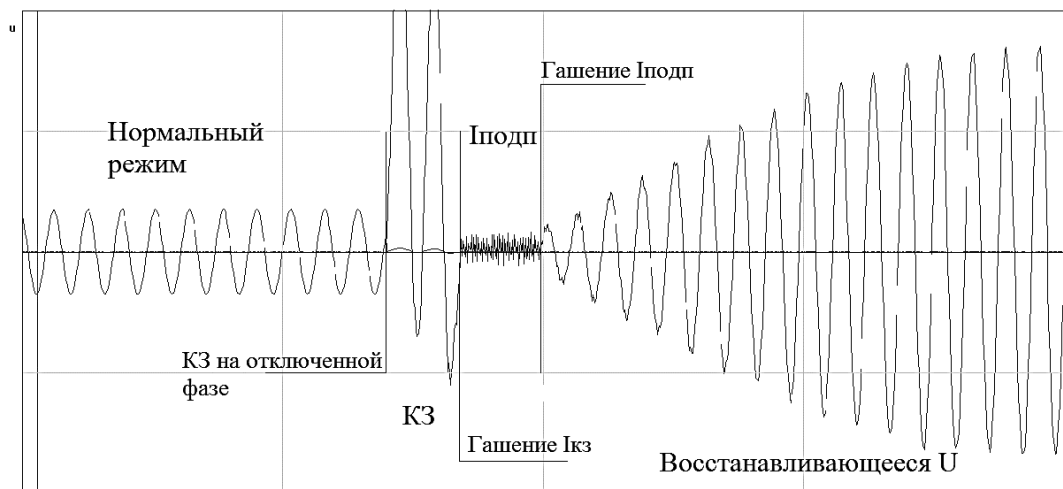


Рис. 1. Расчетная осциллограмма процессов на отключенной фазе

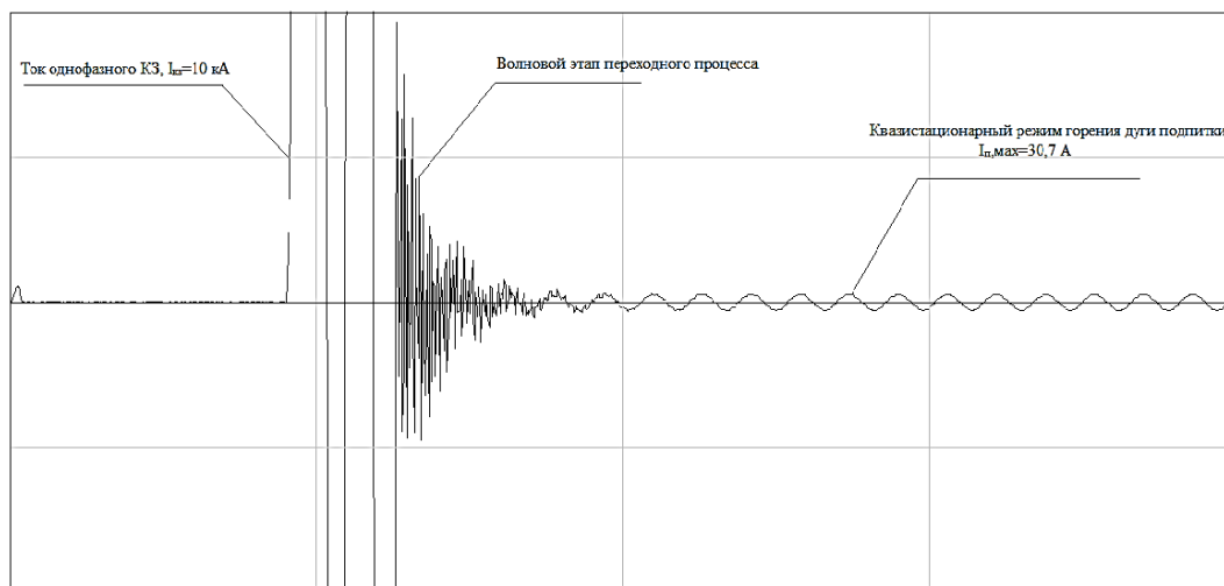
Достоверность разработанной модели проверена путем сопоставления результатов с аналитическими расчетами по упрощенным методикам [1; 2] и с некоторыми данными экспериментальных исследований, проведенных на одной из ВЛ 500 кВ [5].

При реализации ОАПВ требуется установить оптимальную по длительности паузу с целью сокращения неполнофазного режима, а также исключения фактов неуспешного ОАПВ и перехода к трехфазному АПВ, разрывающего перетоки больших мощностей и влияющего на устойчивость связи между передающей и приемной системами.

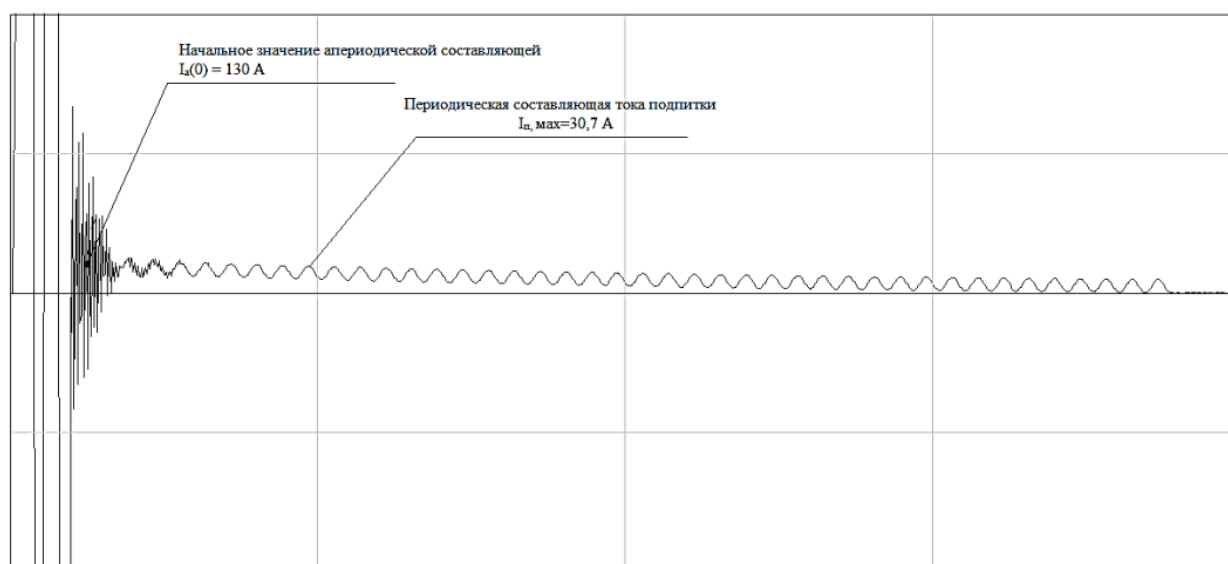
Модель предусматривает реализацию полного расчета переходного процесса, которая включает в себя выход на стационарный режим передачи энергии, осуществление внезапного однофазного КЗ, переход тока КЗ в ток подпитки дуги, гашение тока подпитки, восстановление напряжения на аварийной фазе и завершения цикла ОАПВ восстановлением исходной схемы.

Важным фактором успешности осуществления ОАПВ является корректная оценка величины тока подпитки дуги и условий её гашения, а также оценка форм и амплитуд восстанавливающегося напряжения, которые могут привести при определенных условиях к невозможности успешного повторного включения фазы.

На рис. 2 представлены расчетные осциллограммы процессов перехода от тока однофазного короткого замыкания к току подпитки дуги после отключения фазы с двух сторон. При отсутствии на ЛЭП шунтирующих реакторов переходный процесс представляет собой волновую стадию, связанную с распределенностью параметров ВЛ, переходящую в симметричный квазистационарный режим горения дуги подпитки (рис. 2а). При наличии шунтирующего реактора в кривой тока после отключения тока КЗ наблюдается явно выраженная апериодическая составляющая, которая может превышать по величине амплитуду периодической составляющей тока подпитки (рис. 2б), при этом амплитуда апериодической составляющей определяется величиной тока в реакторе в момент отключения аварийной фазы вторым выключателем.



а



б

Рис. 2. Расчетные осциллограммы тока подпитки при отсутствии (а) и наличии (б) шунтирующего реактора 3 × 60 МВАр, однофазное КЗ в середине ВЛ

Происхождение аperiodической составляющей объясняется исходя из упрощенной схемы замещения, представленной на рис. 3. Постоянная времени аperiodической составляющей определяется как:

$$T = \frac{L_P + L_D}{R_{\Sigma}},$$

где R_{Σ} – суммарное активное сопротивление контура «реактор – фаза ВЛ – канал дуги – земля».

При помощи разработанной модели была произведена серия численных расчетов переходных процессов восстановления напряжения на ВЛ – 500 кВ различной длины при наличии одного шунтирующего реактора 3 × 60 МВАр. На рис. 4 приведены сравнительные резонансные области длин ВЛ по данным официального документа [5] и по результатам расчетов на модели.

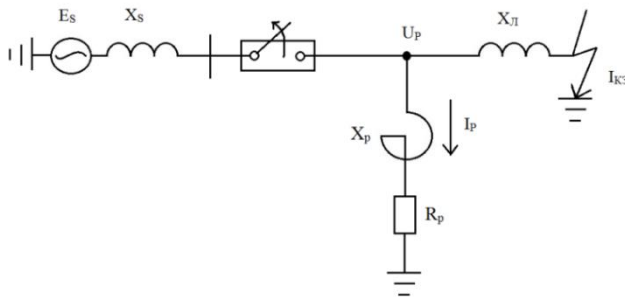


Рис. 3. Упрощенная схема замещения для оценки аperiodической составляющей тока подпитки

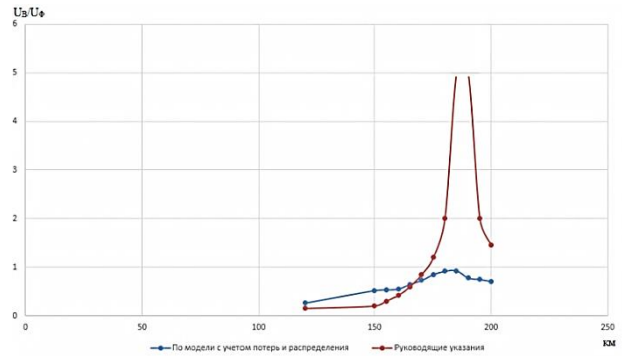


Рис. 4. Резонансная область восстановления напряжения для ВЛ – 500 кВ с реактором 3 × 60 МВАр

Из результатов следует, что разработанная модель дает существенно отличные результаты, поскольку учитывает большее число факторов. Наиболее значимыми из них являются учет реальных потерь в схеме и учет распределенности параметров.

В таблице, представленной ниже, систематизированы технические мероприятия, традиционно применяющиеся при проектировании и эксплуатации ВЛ 500–750 кВ, а также приведены их критические оценки с позиции результатов проведенной работы.

Технические мероприятия и оценка их эффективности

Технические мероприятия	Традиционный подход к оценке эффективности	Критическая оценка
Четырехлучевой реактор, с применением реактора в нейтрали	Компенсирует междуфазную емкость и снижает $I_{\text{подп}}$ и $U_{\text{восст}}$	- Снижает периодическую составляющую $I_{\text{подп}}$ и $U_{\text{восст}}$; - Увеличивает постоянную времени аperiodической составляющей и не влияет на ее амплитуду
Двухстороннее шунтирование аварийной фазы	Полностью решает проблему снижения $I_{\text{подп}}$ и $U_{\text{восст}}$	Не является эффективным средством в режиме передачи мощности и коротких замыканиях на 1/3 начала и конца ВЛ, приводя к увеличению $I_{\text{подп}}$
Отключение реактора на время паузы ОАПВ	Избегает попадания $U_{\text{восст}}$ в резонансную область, но исключает компенсацию $I_{\text{подп}}$	Частично снижает $I_{\text{подп}}$ и $U_{\text{восст}}$, ликвидирует аperiodическую составляющую
Четырехлучевой реактор, с применением выключателя в нейтрали	Частично компенсирует $I_{\text{подп}}$ и $U_{\text{восст}}$, но не решает полностью проблему гашения дуги	- Ликвидирует аperiodическую составляющую $I_{\text{подп}}$; - Возможно попадание в резонансную область $U_{\text{восст}}$ при некоторых сочетаниях параметров
Четырехлучевой реактор, с применением резистора в нейтрали	Не является эффективным средством и практически не снижает $I_{\text{подп}}$ и $U_{\text{восст}}$	Эффективно снижает постоянную времени аperiodической составляющей

Таким образом, на основании приведенных в таблице оценок наиболее результативными мерами по повышению эффективности паузы ОАПВ (что, естественно, связано с минимальным временем бестоковой паузы и обеспечением безаварийного повторного включения фазы) являются отключение шунтирующего реактора на время паузы ОАПВ и применение резистора в нейтрали четырехлучевого реактора.

Традиционно применяемая мера – реактор в нейтрали – не является эффективной и должна сопровождаться тщательным анализом возможной аperiodической составляющей

тока подпитки с использованием уточненных моделей. Серия расчетов, проведенных при помощи описанной в [3; 4] модели позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Ток подпитки дуги на отключенной фазе, вызванный электростатическим и электромагнитным влиянием соседних фаз, имеет в своем составе ярко выраженную аperiodическую составляющую, зависящую от параметров шунтирующего реактора, расстояния от точки КЗ до реактора, а также от характеристик дугового канала после отключения тока КЗ. Это требует подробного моделирования канала дуги с учетом его нелинейности в сочетании с уравнениями теплового баланса.

2. Традиционные меры по снижению периодической составляющей тока с целью сокращения паузы ОАПВ в виде, например, применения дополнительного реактора в нейтрали ШР в ряде случаев могут быть не эффективными.

3. Возможные резонансные области могут смещаться при учете некоторых факторов: распределенность параметров линии, реальные потери в грунте, проводах и других элементах электрической схемы. Полученные области «околорезонансных» процессов на порядок ниже по величине восстанавливающегося напряжения, чем приведено в [1, 2, 5].

4. Разработанная математическая модель представляет собой универсальный инструмент, который может анализировать все процессы на отключенной фазе в переходных и квазистационарных режимах, также она позволяет имитировать реальные аварийные ситуации на отдельных магистральных ВЛ 500кВ, что позволяет принять оптимальные технические решения по организации эффективной бестоковой паузы цикла ОАПВ.

Литература

1. Беляков Н. Н., Кадомская К. П., Левинштейн М. Л. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высокого напряжения / под ред. М. Л. Левинштейна. М. : Энергоатомиздат, 1991. 256 с.

2. Евдокунин Г. А. Электрические системы и сети: учеб. пособие. СПб. : СПбПУ, 2011. 286 с.

3. Наука: прошлое, настоящее, будущее : сб. ст. междунар. науч.-практич. конф. (20 мая 2015 г. Уфа). В 2 ч. Ч. 2. Уфа : АЭТЕРНА, 2015. 256 с.

4. Перспективы модернизации современной науки : сб. ст. междунар. науч.-практич. конф. (10 ноября 2015 г. Москва). М. : РИО ЕФИР, 2015. 158 с.

5. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. РД 153-34.3-35.125-99, 1999 г.

УДК 621.313.323:621.316.72.001.57

*Гончарук А. Ю., Рысев П. В., Шульга К. С.
Goncharuk A. Yu., Rysev P. V., Shulga K. S.*

ПРИМЕНЕНИЕ ГРУППОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

GROUP REGULATION USE OF SYNCHRONOUS MOTOR PARAMETERS FOR REACTIVE POWER COMPENSATION

В статье рассмотрены вопросы регулирования перетоков реактивной мощности. Показана связь величины перетока с основными режимными параметрами систем электроснабжения. Произведено рассмотрение основных принципов компенсации реактивной мощности,

произведено моделирование централизованной компенсации с применением высоковольтных синхронных электродвигателей. Описана реализация и результаты программы, определяющей оптимальную величину реактивной мощности, вырабатываемой электродвигателями в зависимости от режима работы системы электроснабжения, характера нагрузки и других факторов.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, синхронный двигатель, групповой регулятор реактивной мощности, энергоэффективность.

Российская Федерация в настоящее время делает большую ставку на повышение энергоэффективности промышленности. Системы электроснабжения промышленных предприятий являются объектами, энергетическую эффективность которых необходимо повысить в первую очередь.

Выделяют два вида мероприятий для увеличения энергоэффективности работы электрических сетей: организационные и технические. Одним из самых эффективных является компенсация реактивной мощности.

Режимы компенсации реактивной мощности регламентируются приказом Минэнерго № 380 [3], который устанавливает порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для потребителей, подключенных на классах напряжения от 0,4 до 110 кВ.

Компенсация реактивной мощности дает возможность повысить эффективность использования электроэнергии в трех основных направлениях: повышение пропускной способности линий и трансформаторов, снижение потерь активной энергии, нормализация напряжения. Компенсация реактивной мощности позволяет снизить активные потери за счет снижения полного тока.

Существует три вида компенсации по местам установки компенсирующих устройств: индивидуальная, групповая, централизованная.

Индивидуальная компенсация применяется на объектах, требующих компенсации потребителей с большой мощностью, работающих в постоянном режиме потребления высокой нагрузки в течение большого срока времени.

Групповая компенсация применяется для работающих одновременно и в непосредственной близости друг от друга источников реактивной нагрузки, имеющих подключение от единого распределительного устройства с одной общей конденсаторной установкой.

Централизованная компенсация предпочтительна для промышленных предприятий, имеющих в своем характере работы переменную потребность в нерегулярно реактивной мощности. Конденсаторные установки в своей конструкции имеют коммутационную аппаратуру, которая при изменении коэффициента мощности оперирует включением, отключением установки [1].

В работе рассматривалась компенсация реактивной мощности с применением синхронных двигателей. Основными достоинствами такой компенсации являются:

1. Возможность плавного регулирования величины и изменения знака реактивной мощности. Синхронные машины обычно выполняются для работы с опережающим коэффициентом мощности, что позволяет компенсировать в определенных пределах реактивную мощность в питающей энергосистеме.

2. Синхронные машины имеют наиболее высокий к. п. д. из всех вращающихся электрических машин.

3. Синхронные двигатели обеспечивают постоянство средней скорости вращения независимо от величины нагрузки.

4. Большой, чем у асинхронных машин, зазор между ротором и статором делает синхронную машину более надежной с точки зрения конструкции.

5. Синхронные машины оказывают определенное положительное влияние на работу энергосистемы в целом.

В работе рассматривалось групповое регулирование тока возбуждения синхронных двигателей (ГРПМ), целью которого помимо компенсации реактивной мощности является поддержание заданного уровня напряжения на шинах узла нагрузки.

Для этого была рассмотрена централизованная компенсация реактивной мощности.

Регулирование тока возбуждения и, как следствие, реактивной мощности обычно производится для каждого двигателя в отдельности. Принцип же группового регулирования теоретически позволяет сделать системы электроснабжения более «гибкими», приближая их к полноценным SmartGrid.

Ручное управление компенсацией реактивной мощности при помощи изменения установок возбуждения синхронных двигателей эффективно только при значительной (более 70 %) доле потребления синхронными двигателями электроэнергии предприятия.

Преимущества применения ГРПМ проявляются на предприятиях с неравномерным графиком суточной нагрузки. В этом случае работающие агрегаты можно использовать для компенсации реактивной мощности, потребляемой другими технологическими системами. Применение в качестве компенсаторов уже установленных синхронных двигателей в ряде случаев позволяет полностью отказаться от использования других устройств.

В работе использовалась методика определения оптимальной величины реактивной мощности [2]. Рассмотрим основные ее положения:

1. По измеренным значениям параметров системы P_0 , Q_0 , U_0 с учетом данного нагрузочного режима и соответствующих ему значениях входных сопротивлений R_0 и X_0 определяется U_C , которое в дальнейшем считается неизменным.

$$U_C = \sqrt{U_0^2 + \Delta U_0^2 + 2 \cdot U_0 \cdot \Delta U_0 \cdot \cos(\varphi_C - \varphi_0)}, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta U_0 = I_0 \cdot \sqrt{R_0^2 + X_0^2}; \quad \varphi_C = \arctg\left(\frac{X_0}{R_0}\right); \quad \varphi_0 = \arccos\left(\frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}\right).$$

2. Определяются значения напряжений узла нагрузки $U_0(n)$ в допустимом диапазоне изменения напряжений $(0.95 - 1.1U_H)$ с шагом 1 В, где n – индекс данного напряжения узла нагрузки.

3. Для каждого значения напряжения узла нагрузки $U_0(n)$ из диапазона рассчитываются значения активного тока системы $I_{oa}(n)$, реактивного тока системы $I_{opi}(n)$, активная мощность системы $P_0(n)$, реактивная мощность системы $Q_{on}(n)$ и суммарные потери активной мощности системы $\Sigma\Delta P(n)$:

$$P_0(n) = \Sigma(\beta_{iad} \cdot P_{iadn} \cdot N_{AD} + \beta_{icd} \cdot P_{icdn} \cdot N_{CD} + \beta_{ioce} \cdot P_{ioceo} + \beta_{imm} \cdot P_{imm}), \quad (2)$$

где i – номер подузла (цеха, участка); β_{iad} – загрузка группы АД подузла; P_{iadn} – суммарная номинальная активная мощность АД подузла; β_{icd} – загрузка группы СД подузла; P_{icdn} – суммарная номинальная активная мощность СД подузла; β_{ioce} – загрузка осветительного оборудования подузла; P_{ioceo} – суммарная номинальная активная мощность осветительного оборудования подузла; β_{imm} – загрузка технологического оборудования подузла; P_{imm} – суммарная номинальная активная мощность технологического оборудования подузла; N_{AD} – количество АД; N_{CD} – количество СД.

Значения β_{iad} и β_{icd} зависят от нагрузки на валу двигателя и при расчете принимаются неизменными:

$$\beta_{io\alpha} = 2.43 \cdot K_U - 1.43, \quad (3)$$

где $K_U = \frac{U_0(n)}{U_n}$;

величина реактивной мощности определяется конкретно для данного оборудования;

$$Q_{on}(n) = \Sigma(\alpha_{iad} \cdot Q_{iadn} \cdot N_{AD} + \alpha_{icd} \cdot Q_{icdn} \cdot N_{CD} + \alpha_{imm} \cdot Q_{imm}), \quad (4)$$

где α_{iad} , α_{icd} , α_{imm} – относительная реактивная мощность по группам АД, СД и технологического оборудования подузла; Q_{iadn} , Q_{icdn} , Q_{imm} – суммарная номинальная реактивная мощность по группам потребителей подузла.

Величина α_{iad} рассчитывается по выражению:

$$\alpha_{iad} = \left[1 - \frac{\text{ctg } \varphi_{ном}}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}} \right] \cdot [2 \cdot (K_U - 0.55) + 0.6] \cdot K_U + \frac{\beta \cdot \text{ctg } \varphi_{ном}}{b_n \cdot \frac{K_U^2}{\beta} + \sqrt{\left(b_n \cdot \frac{K_U^2}{\beta} \right)^2 - 1}}, \quad (5)$$

где b_n – перегрузочная способность двигателя.

α_{icd} рассчитывается по выражению:

$$\alpha_{icd} = \frac{\sqrt{\left(K_B \cdot \frac{K_U}{K_{B.X}} \right)^2 - (\beta \cdot X_d \cdot \cos \varphi_{ном})^2 - K_U^2}}{X_d \cdot \sin \varphi_{ном}}, \quad (6)$$

$$\text{где } K_B = \sqrt{\frac{1 + \beta^2 \cdot X_d^2 \cdot \cos^2 \varphi_{ном} + (\alpha \cdot X_d \cdot \sin \varphi_{ном} + 1)^2}{1 + X_d^2 + 2 \cdot X_d \cdot \sin \varphi_{ном}}}; \quad K_{B.X} = \frac{1}{\sqrt{1 + X_d^2 + 2 \cdot X_d \cdot \sin \varphi_{ном}}};$$

X_d – синхронное реактивное сопротивление статора по продольной оси; β – коэффициент загрузки двигателя; α – относительная реактивная мощность СД; α_{imo} определяется для конкретного оборудования по паспортным данным.

$$I_{oa} = \frac{P_0(n)}{U_0(n)}, \quad I_{opn} = \frac{Q_{on}(n)}{U_0(n)}. \quad (7)$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{a\partial} \cdot N_{AD} + \Delta P_{c\partial} \cdot N_{CD} + \Delta P_{oc\alpha} + \Delta P_{mo}, \quad (8)$$

где $\Delta P_{a\partial}$ – потери в АД в зависимости от величины питающего напряжения; $\Delta P_{c\partial}$ – потери в СД в зависимости от величины питающего напряжения; $\Delta P_{oc\alpha}$ – потери в системе освещения в зависимости от величины питающего напряжения; ΔP_{mo} – потери в технологическом оборудовании в зависимости от величины питающего напряжения.

$$\Delta P_{a\partial} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_C, \quad (9)$$

где ΔP_1 – потери в статоре АД, ΔP_2 – потери в роторе АД, ΔP_C – потери в стали АД.

$$\Delta P_{c\partial} = \Delta P_1 + \Delta P_B + \Delta P_C, \quad (10)$$

где ΔP_1 – потери в статоре СД, ΔP_B – потери в системе возбуждения СД, ΔP_C – потери в стали СД.

Потери в осветительном оборудовании и технологическом оборудовании определяются отдельно для каждого конкретного оборудования.

4. Для каждого значения напряжения узла нагрузки $U_0(n)$ определяется величина приведенных затрат с учетом ΔP_Σ и $Q_{oc}(n)$ по выражению:

$$Z(n) = C_a \cdot \Delta P_\Sigma, \quad (11)$$

где C_a – цена активной мощности.

5. Методом перебора для данного режима работы узла нагрузки находится строка с минимальным значением приведенных затрат $Z(n)$, соответствующее напряжение узла нагрузки $U_0(n)$.

6. Определяется значение дефицита (избытка) реактивной мощности системы ΔQ_0 для поддержания в узле нагрузки напряжения $U_0(n)$ путем определения требуемого значения реактивного тока системы:

$$I_{op}(n) = I_{opn}(n) + I_{opco}(n), \quad (12)$$

где $I_{opco}(n)$ – величина реактивного тока узла нагрузки при изменении тока возбуждения группы СД.

Для определения $I_{opco}(n)$ необходимо решить уравнение:

$$A + \sqrt{A} \cdot \cos(\varphi_C - \varphi_0) = B, \quad (13)$$

где $A = (I_{oa}^2(n) + (I_{opn}(n) + I_{opco}(n))^2) \cdot (R_0^2 + X_0^2)$; $\varphi_0 = \arctg\left(\frac{(I_{opn}(n) + I_{opco}(n))}{I_{oa}(n)}\right)$;

$$B = U_C^2 - \frac{U_0^2(n)}{2 \cdot U_0(n)}.$$

По рассчитанному значению $I_{opco}(n)$ определяется дефицит (избыток) реактивной мощности в системе ΔQ :

$$\Delta Q_0(n) = U_0(n) \cdot I_{opco}(n). \quad (14)$$

7. Определяется максимальное количество реактивной мощности, которую может компенсировать синхронный двигатель:

$$Q_{СД\delta} = \alpha_m \sqrt{P_{\text{ном.СД}}^2 + Q_{\text{ном.СД}}^2}, \quad (15)$$

где α_m – коэффициент допустимой перегрузки СД, зависящий от его загрузки по активной мощности.

8. Определяется суммарное количество реактивной мощности, которое могут компенсировать все двигатели:

$$Q_\Sigma = Q_{СД} \cdot N_{СД}, \quad (16)$$

где $N_{СД}$ – количество установленных синхронных двигателей.

9. Устанавливается, достаточно ли синхронные двигатели могут сгенерировать реактивной мощности для компенсации реактивной мощности и какое количество реактивной мощности будет генерировать каждый синхронный двигатель.

По описанному выше алгоритму была написана программа для расчета необходимого количества реактивной мощности, которую необходимо сгенерировать синхронными двигателями. Интерфейс программы представлен на рис. 1.

Все данные вводятся в СИ в именованных единицах				АД		СД	
27000000	P0	10000	dPосв	1,9	bn	1	Xd
10800000	Q0	100000	dPто	0,85	cosφ	0,436	sinφ
6000	U0			2735	dP1	2735	dP1
0,1	R0			7690	dP2	1	Xб
0,3	X0			16489	dPс	6250	Pв
500000	Радн	309000	Qадн	8	Над	750	dPвн
500000	Рсдн	270000	Qсдн	15	Nсд	24729	dPс
50000	Росв	11691296	Qтон				
10000000	Pто						
0,7	Вад	0,7	аад			dQ= 4941300	вар
0,7	Vад	0,7	асд				
0,7	Vто	0,7	ато				

Рассчитать

Мощности установленных синхронных двигателей достаточно для компенсации реактивной мощности

Q1= 329420 вар

Рис. 1. Интерфейс программы

Однако принцип группового управления синхронными двигателями и регулирования токов возбуждения группы двигателей эффективен, как правило, только при значительной неравномерности графика нагрузки узла системы электроснабжения.

В целом при исследовании было установлено, что групповое регулирование реактивной мощности синхронных двигателей имеет ряд преимуществ перед остальными способами регулирования перетоков реактивной мощности. Данные преимущества могут быть реализованы при выполнении следующих условий: 1) неравномерный график нагрузки, 2) распределенная и небольшая по величине потребляемая реактивная мощность в узлах нагрузки и т. д.

Литература

1. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие. Томск : Изд-во Томск. политех. ун-та, 2012. 234 с.
2. Охотников М. Н., Комплексная система управления возбуждением группы синхронных двигателей : дис. ... канд. тех. наук. Нижний Новгород, 1994. 209 с.
3. О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии» : приказ Министерства энергетики РФ от 23.06.2015 № 380 . URL: <http://docs.cntd.ru/document/420285270> (дата обращения: 20.04.2016).

УДК 621.315.1.017

Иванова Е. В., Максимов А. А.
Ivanova E. V., Maximov A. A.

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С УЧЁТОМ РЕЖИМНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

ELECTRIC ENERGY LOSS CALCULATION IN AERIAL LINES NON-INSULATED CABLES DUE TO OPERATION AND CLIMATIC FACTORS

В данной работе рассмотрены и проанализированы зависимости расчета нагрузочных потерь от режимных и климатических факторов, предложены методики нахождения потерь электрической энергии с учетом вышеперечисленных факторов, которые включают наибольшее количество параметров окружающей среды и режимных факторов. Приведены рекомендации программных комплексов для более оперативной и достоверной возможности определения допустимой токовой нагрузки и уровня нагрузочных потерь электрической энергии.

Ключевые слова: воздушная линия, потери электроэнергии, температура провода, программный комплекс, уравнение теплового баланса, метод расчёта потерь.

В настоящее время для анализа нагрева проводов воздушных линий используются различные методы [3; 4; 5]. Однако независимо от используемого подхода в основе расчёта лежит уравнение теплового баланса, которое в установившемся тепловом режиме провода имеет вид [3]:

$$I^2 R_t + W_c = (w_k + w_l) \Delta t, \quad (1)$$

где I – ток в проводе, А;

R_t – сопротивление провода при эксплуатируемой температуре, Ом/м;

W_c – тепло, поглощённое проводом от действия солнечной радиации, Вт/м;

w_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²°С;

w_l – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, Вт/м²°С;

Δt – разность температуры провода и температуры воздуха, °С.

В теории тепловых процессов рассматриваются три способа передачи тепла: теплопроводность, тепловое излучение и конвекция. Однако при вычислениях в большинстве методов используют только последние два способа, что следует из уравнения (1). Отвод тепла от проводов воздушных линий лучеиспусканием невелик, так как они имеют сравнительно малую температуру нагрева. Отвод тепла теплопроводностью ничтожно мал и, как правило, не учитывается из-за незначительной величины коэффициента теплопроводности воздуха. Провода воздушных линий охлаждаются в основном за счёт конвекции, обусловленной движением воздуха по поверхности провода. При этом наибольшие сложности возникают при определении интенсивности охлаждения, так как коэффициент теплоотдачи конвекцией w_k является наиболее неопределённым членом уравнения (1), зависящий от многих факторов: скорости и направления ветра, геометрической формы токопроводящей жилы и т. д.

В зависимости от подходов вычисления различных составляющих уравнения в настоящее время наибольшее распространение получили 3 отечественные методики.

Методика А. А. Герасименко, Г. С. Тимофеева, А. В. Тихоновича [4] описана в статье «Учёт схемно-режимных и атмосферных факторов при расчёте технических потерь электроэнергии в распределительных сетях». По этой методике установившаяся температура

провода может быть определена из условия теплового баланса, при котором количество тепла Q_1 , получаемого проводом от протекающего тока на единицу длины и в единицу времени

$$Q_1 = I^2 R_{20} (1 + \alpha(t_{np} - 20)), \quad (2)$$

равно количеству тепла, отведённого от провода с его поверхности в окружающую среду за это же время

$$Q_2 = wF(t_{np} - t_e) = wF\Delta t, \quad (3)$$

где F – площадь поверхности (m^2) охлаждения провода длиной 1 м;

w – коэффициент теплоотдачи путём конвекции и лучеиспускания, равный количеству тепла, отводимого в 1 сек в окружающую среду с $1 m^2$ поверхности провода при разности температур провода и окружающей среды в $1^\circ C$, Вт/($m^2 \cdot ^\circ C$).

Коэффициент теплоотдачи w имеет две составляющие, одна из которых определяется отдачей тепла лучеиспусканием

$$\alpha_{\lambda} = 7,24\epsilon d (T_{cp} / 1000)^3, \quad (4)$$

где T_{cp} – среднее значение между температурой воздуха и температурой провода в градусах Кельвина

$$T_{cp} = \frac{1}{2}(t_e + t_{np}) + 273. \quad (5)$$

Другая составляющая характеризует отдачу тепла конвекцией и при предположении, что ветер направлен перпендикулярно проводу, может быть определена в виде:

$$\alpha_{\kappa} = 0,16d^{0,75} (\Delta t)^{0,3}, \quad (6)$$

при скорости ветра $v \leq 1,2$ м/с,

$$\alpha_{\kappa} = 1,1\sqrt{dv}. \quad (7)$$

при скорости ветра $v \geq 1,2$ м/с.

Перегрев провода $\Delta t = t_{np} - t_e$ можно определить путём последовательных приближений, приняв первоначальное (или Δt^k) значение перегрева. В результате будет получено $(k + 1)$ – приближение температуры провода

$$t_{np}^{k+1} = t_e + \Delta t^{(k)}. \quad (8)$$

Методика В. Э. Воротницкого и О. В. Туркиной описана в статье «Оценка погрешностей расчёта переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеоусловий» [3]. В основе расчёта лежит уравнение теплового баланса провода для установившегося теплового режима в следующем виде:

$$0,95R_{20} (1 + \alpha(t_{np} - 20)) I^2 = Q_{\lambda} + Q_{\kappa}, \quad (9)$$

где I – рабочий ток, А;

Q_{λ} и Q_{κ} – мощность теплопередачи от поверхности провода лучеиспусканием и конвекцией соответственно, Вт/м;

R_{20} – погонное активное сопротивление при температуре провода $20^\circ C$, Ом/км;

t_{np} – температура провода, $^\circ C$.

Мощность теплового потока излучения провода определяется согласно закону Стефана – Больцмана

$$Q_{\lambda} = \epsilon C_0 (273 + t_{np})^4 S, \quad (10)$$

где ϵ – степень черноты поверхности провода, для окисленного алюминия, равная 0,13 отн. ед.;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, равный $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);
 S – площадь излучающей поверхности проволок провода, м².

Мощность теплового потока, обусловленного теплоотдачей конвекцией, можно описать уравнением

$$Q_k = \alpha_k [(t_{np} - t_{pad}) - t_e] S, \quad (11)$$

где t_{pad} – температура нагрева солнечной радиацией, °С;
 α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°С).

$$\alpha_k = 0,13057 \left(\frac{k_v v d}{a} \right)^{0,71719} \frac{\lambda_e}{d}, \quad (12)$$

где k_v – коэффициент, учитывающий влияние угла направления ветра к оси воздушной линии, равный 0,5;

v – скорость ветра, м/с;

d – диаметр провода, м;

a – коэффициент температуропроводности воздуха, равный $18,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

λ_e – теплопроводность воздуха, равная 0,0244 Вт/(м·°С).

Решая уравнение (9) относительно тока с учётом уравнений (10), (11), (12), получим

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon C_0 (273 + t_{np})^4 \pi d + \alpha_k [(t_{np} - t_{pad}) - t_e] \pi d}{0,95 R_{20} (1 + 0,004(t_{np} - 20))}}. \quad (13)$$

Решая уравнение (13), можно найти зависимости тока от температуры провода, скорости ветра и температуры воздуха. Далее полученные зависимости аппроксимируем в областях температур провода от минус 40 до плюс 40 °С по формуле

$$t_{np} = aI^2 + bI + c, \quad (14)$$

где a , b и c – коэффициенты аппроксимации.

Методика Г. К. Зарудского и С. Ю. Сыромятникова описана в статье «Уточнение выражений для расчёта температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения» [5]. Основой для расчёта служит уравнение теплового баланса провода для установившегося теплового режима в следующем виде:

$$W_R + W_c' d \cdot 10^{-3} = q_l' + q_k', \quad (15)$$

где W_R – потери энергии от тока нагрузки в активном сопротивлении провода, Вт/м;

W_c' – интенсивность солнечного излучения, Вт/м²;

q_l' – тепловой поток излучения провода на 1 м его длины, Вт/м;

q_k' – поток конвективного теплообмена между проводом и воздухом на 1 м длины провода, Вт/м.

Потери энергии от тока нагрузки найдём по формуле

$$W_R = X [1 + \alpha_T (T_{np} - 293 + \Delta t)] d \cdot 10^{-3}, \quad (16)$$

где

$$X = J^2 S_a^2 R_{20} / d, \quad (17)$$

α_T – температурный коэффициент проводника, 1/°С;

J – плотность электрического тока, А/мм²;

S_a – расчётное сечение токоведущей части провода, мм².

Тепловой поток излучения равен

$$q'_l = 71,2513 \cdot 10^{-11} \varepsilon k_{\text{из}} (T + \Delta t / 2)^3 d \Delta t,$$

Поток конвективного теплообмена находится по выражению

$$q'_k = 1,1215 \cdot 10^{-3} Nu (T + \Delta t / 2)^{0,754} \Delta t, \quad (18)$$

где Nu – безразмерный коэффициент теплоотдачи (критерий Нуссельта).

Решая уравнение (15) с учётом выражений для W_R , q'_l , q'_k , получим:

$$\Delta t = \frac{X [1 + \alpha_T (T - 293)] + W'_c + X \alpha_T \Delta t}{0,4275 (T + \Delta t / 2)^3 k_{\text{из}} \cdot 10^{-6} + [1,1215 Nu (T + \Delta t / 2)^{0,754}] / d}. \quad (19)$$

При вынужденной конвекции ($\nu \neq 0$) Критерий Нуссельта является функцией угла атаки и двух безразмерных величин: критерия Рейнольдса Re и критерия Прандтля Pr . Но в широком интервале температур (0–100 °С) $Pr \approx 0,71 = \text{const}$.

В настоящее время существенно обострилась проблема высокого уровня потерь электроэнергии (ПЭ) в электрических сетях сетевых компаний. В связи с этим одной из первоочередных задач является следующая: «Сформировать систему постоянного мониторинга уровня и структуры потерь в электрических сетях всех напряжений ЕЭС России» [2]. Наибольшее распространение получили следующие комплексы программ:

1. Комплекс РТП-3 предназначен для расчета и нормирования потерь, допустимых фактических небалансов и количества неучтенной электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,38 – 220 кВ и внедрен во многих энергосистемах страны [1]. Комплекс обладает развитой графической системой ввода информации о схеме электрической сети, позволяющей, по утверждению разработчиков, сравнительно легко создать полную базу схем сетей 6–220 кВ энергосистемы.

2. Отличительной характеристикой программного комплекса РАП-95 является комплексный подход к расчету всех составляющих потерь электроэнергии и их нормативных характеристик в сетях всех классов напряжений АО-энерго и в оборудовании сетей и подстанций [7]. Все программы комплекса работают в автономном режиме, так как предназначены для различных пользователей – некоторые из них используются в службах режимов РСК, другие – в филиалах РСК, третьи – в энергосбытовых компаниях.

3. Программно-вычислительный комплекс АМУР РС, разработанный в качестве составной части АСДУ района электрических сетей [8], обладает развитыми функциональными возможностями (8 расчетных задач). Основными особенностями ПВК АМУР РС являются: 198 решений разнообразных режимных задач на единой базе данных (БД); графическая система ввода информации о конфигурации и параметрах фидеров 6–10 кВ, максимально приближенная к естественной форме представления этой информации в виде схемы фидера.

4. В ЮРГТУ (Новочеркасск) разработан программно-информационный комплекс «Сеть», позволяющий выполнять расчеты ТПЭ в сетях 0,38 и 10(6) кВ и оптимизацию схем сетей 10(6) кВ. К особенностям программы относится возможность автоматического формирования расчетной схемы по ее графическому образу [2].

5. Комплекс программ RersPC предназначен для автоматизации расчетов и анализа установившихся режимов, токов короткого замыкания, потерь мощности и электроэнергии, мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях различных форм собственности (РСК, муниципальные предприятия и т. д.), проведения экспертизы расчетов нормативов потерь электроэнергии. Отличительными особенностями комплекса являются: мощный специализированный векторный редактор электрических схем, позволяющий осуществлять ввод, корректировку, просмотр и печать информации о топологии и параметрах сетей с отображением их графического представления в любом привычном для персонала

виде; возможность автоматического нанесения и привязки паспортных данных объектов и результатов расчетов к соответствующим элементам сети, а также привязки одного паспорта к различным графическим примитивам (последняя возможность позволяет представлять одни и те же физические объекты на разных схемах в виде любых изображений); возможность просмотра на одних и тех же схемах различной информации в любых требуемых сочетаниях и быстрой ее смены, обеспечиваемой применением технологии «слоев»; интеграция с геоинформационными системами (ГИС), оперативно-управляющими информационными комплексами (ОИУК) АСДУ, программами автоматизации энергосбытовой деятельности.

Все вышесказанное можно обобщить и представить в виде таблицы для более удобного восприятия преимуществ и недостатков распространенных программных комплексов, предназначенных для расчета потерь в электрических сетях, где приняты следующие сокращения: УР – расчет установившегося режима сети; МС – отыскание мест оптимального секционирования сети; ОР – оптимизация режима сети; ПЭ – расчет потерь электроэнергии; ПСУ – учет погрешностей систем учета электроэнергии; БД – интеграция с базами данных; ГИС – интеграция с ГИС; ОИУК – интеграция с ОИУК АСДУ (таблица).

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что наиболее развитыми возможностями в плане интеграции информационных ресурсов, необходимых для осуществления мониторинга ПЭ, обладают программные комплексы РТП-3 и RersPC.

Характеристика различных программных комплексов

Комплекс программ	Решаемые задачи							Возможности			
	УР	МС	ОР	ПЭ в сети, кВ:				ПСУ	ГИС	БД	ОИУК
				0,4	6(10)	35	110				
РТП-3	+	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–
РАП-95	+	–	–	+	+	+	+	+	–	–	–
АМУРРС	+	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Сеть	+	+	–	+	+	–	–	–	–	–	–
RersPC	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Выводы

1. Наиболее точный метод расчета потерь электрической энергии с учетом температуры токопроводящей жилы является метод К. Зарудского и С. Ю. Сыромятникова, учитывающий наибольшее количество параметров окружающей среды и режимных факторов.

2. Основными направлениями повышения точности расчётов потерь электрической энергии являются разработка, создание и внедрение автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого и технического учёта электроэнергии, а также учёт режимных и климатических факторов, которые позволят более точно определить потери во всех элементах электроэнергетической системы.

3. Затраты труда и время, потраченное на подготовку, могут быть значительно сокращены благодаря использованию современных программных комплексов.

4. Существующие программные комплексы не учитывают (либо учитывают не в полной мере) климатические факторы, что ставит задачу разработки новых или усовершенствования уже имеющихся программных комплексов для расчёта потерь с учётом климатических факторов на основе методик, приведённых выше.

Литература

1. Воротницкий В. Э., Заслонов С. В., Калинкина М. А. Комплекс программ для расчета балансов электроэнергии в распределительных электрических сетях // Энергосистема: управление, качество, безопасность : материалы науч. конф. Екатеринбург, 2001. С. 431–434.

2. Воротницкий В. Э., Заслонов С. В., Калинкина М. А. Программа расчета технических потерь мощности и электроэнергии в распределительных сетях 6–10 кВ // Электрические станции. 1999. № 8. С. 38–42.
3. Воротницкий В. Э., Туркина О. В. Оценка погрешностей расчёта потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеоусловий // Электрические станции. 2008. № 10. С. 42–49.
4. Герасименко А. А., Тимофеев Г. С., Шульгин И. В. Учёт схемно-структурных и режимно-атмосферных факторов при расчёте потерь электроэнергии по данным головного учёта // Вестник КрасГАУ. 2008. № 3 (24). С. 287–293.
5. Герасимов В. Г. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 1. / под ред. В. Г. Герасимова. М. : Издательство МЭИ, 1995. 440 с.
6. Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях : руководство для практич. расчетов. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
7. Об организации работ по сокращению потерь электроэнергии в электрических сетях : приказ ОАО РАО «ЕЭС России» от 01.06.05. № 338. М. : Изд-во РАО «ЕЭС России», 2005.
8. Степанов А. С., Ермолаев А. Ю. Программное обеспечение АСДУ РЭС // Электрические станции. 1998. № 7. С. 47–50.

УДК 621.316.001.57

*Иванова Е. В., Куликова А. А.
Ivanova E. V., Kulikova A. A.*

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА В СЕТЯХ 6-35 КВ КАК РЕЦЕПТОРАХ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT IN NETWORKS OF 6-35 KV AS RECEPTORS IN ELECTRIC POWER SYSTEM

Целью работы является декомпозиция научных положений и рекомендаций, обеспечивающих ЭМС сетей напряжением 6–35 кВ как рецепторов в электроэнергетической системе. Для достижения этой цели в работе ставилась и решалась научно-техническая задача: возможность обеспечения ЭМС сетей среднего напряжения как рецепторов при сложной электромагнитной обстановке.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, помехозащитные средства, заземление нейтралей через резисторы, кондуктивные ЭМП (электромагнитные помехи), релейная защита.

Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств в региональных ЭЭС возникает у приёмников электрической энергии и в системах распределения этой энергии, если нарушается их нормальное функционирование. Обнаруживается наличие электромагнитных влияний.

На рис. 1 приведена общая структурная схема содержания проблемы ЭМС технических средств в электрических сетях среднего напряжения, подверженных воздействию кондуктивных низкочастотных ЭМП. Выделяются 6 подпроблем: определение потерь и выбор системы учёта расхода электроэнергии; повышение надёжности работы релейной защиты и сетевой автоматики; разработка методов и средств компенсации реактивной мощности; создание эффективных систем компенсации ёмкостного тока и разработка методов координа-

ции токов замыкания фазы на землю; ограничение коммутационных импульсных перенапряжений; защита рецепторов потребителей.

Теоретические исследования возможности обеспечения ЭМС сетей от 6 до 35 кВ как рецепторов при сложной электромагнитной обстановке (ЭМО) в сетях среднего напряжения при некачественной электроэнергии представлены полем событий и характеризуются таблицей вероятностей всех возможных значений показателей КЭ. Сформулируем условия появления кондуктивных низкочастотных ЭМП, распространяющихся по сетям. Параметрами ЭМС технических средств при некачественной электроэнергии в электрических сетях являются кондуктивные низкочастотные ЭМП, распространяющиеся по проводам.

Подавить эти помехи можно путём применения специальных мер по помехозащищённости и по повышению помехоустойчивости элементов сетей. Под помехозащищённостью понимается способность ослаблять действия кондуктивных ЭМП за счёт специальных помехозащитных средств (ПЗС), не относящихся к принципу действия или построению сети. Помехоустойчивость (ПУ) означает способность электрической сети или системы сохранять заданное качество функционирования при воздействии кондуктивных низкочастотных ЭМП определённого уровня в отсутствие специальных ПЗС. Повышение ПУ достигается параметрическими изменениями некоторых элементов функциональных узлов электрических сетей для того, чтобы, помимо выполнения рабочих функций, эти элементы одновременно выполняли бы защитные функции.

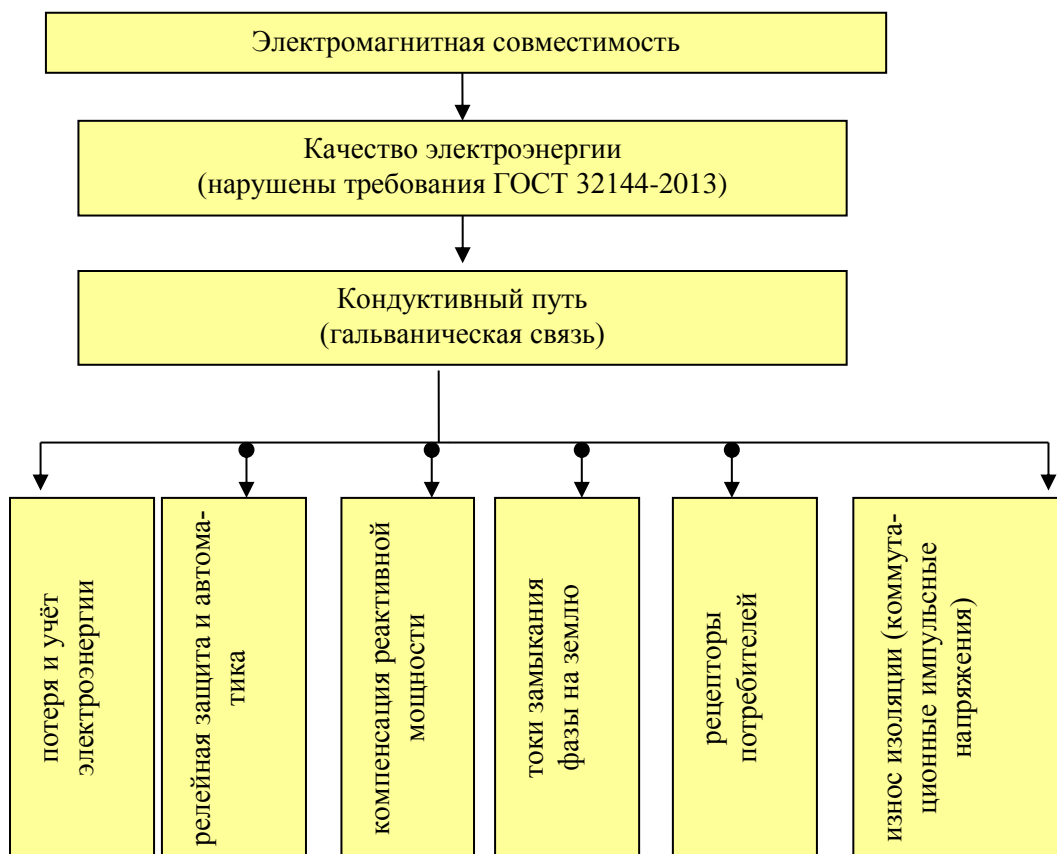


Рис. 1. Содержание проблемы электромагнитной совместимости технических средств в электрических сетях, подверженных воздействию кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех

С точки зрения обеспечения ЭМС технических средств оснащение электрических сетей ПЗС и повышение их ПУ выполняют одну и ту же функцию – обеспечения ЭМС путём подавления кондуктивных низкочастотных ЭМП до приемлемых уровней. Объединим их по

этому признаку в один класс помехоподавляющих технических средств (ППТС). Параметры ППТС составляют множество

$$G_z = \{g_z^{(1)}, g_z^{(2)}, \dots, g_z^{(i)}, \dots, g_z^{(m)}\}, \quad (1)$$

где $g_z^{(1)}, g_z^{(2)}, \dots, g_z^{(i)}, \dots, g_z^{(m)}$ – параметры ППТС; $i = \overline{1, m}$ – замкнутое множество параметров; $g_z^{(i)} \in G_z$

Кондуктивные низкочастотные ЭМП обладают стохастическими свойствами и порождаются превышением нормально и предельно допустимых значений показателей КЭ, установленных ГОСТ 32144-2013. Параметры этих ЭМП составляют множество G_k

$$G_k = \{g_k^{(1)}, g_k^{(2)}, \dots, g_k^{(i)}, \dots, g_k^{(m)}\}, \quad (2)$$

где $g_k^{(1)}, g_k^{(2)}, \dots, g_k^{(i)}, \dots, g_k^{(m)}$ – параметры кондуктивных ЭМП по i -му показателю КЭ; $i = \overline{1, m}$ – замкнутое множество; $g_k^{(i)} \in G_k$.

Множество G_k содержится в множестве $\sum M$

$$G_k \subset \sum M, \quad (3)$$

которое отображает общую ЭМО.

Однако не ясно: можно ли подавить кондуктивные низкочастотные ЭМП путём расчёта отдельных неслучайных параметров ЭМО и выбора необходимых ППТС? Для ответа на этот вопрос рассматривается теорема об эквивалентности параметрических множеств ППТС и кондуктивных низковольтных ЭМП в сетях, обусловленных некачественной электроэнергией и распространяющихся по сетям.

Доказана возможность подавления кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех в едином параметрическом пространстве с помехоподавляющими техническими средствами; определен методический подход к разработке концепции обеспечения ЭМС технических средств путём подавления кондуктивных низкочастотных ЭМП, обусловленных некачественной электроэнергией.

ЭМО исследовалась в действующей сети 10 кВ с помощью ИВК «Омск-М». Обработка результатов измерений производилась при помощи прикладываемого к ИВК программного обеспечения. Обнаружено отклонение от требований ГОСТ 32144-2013 только коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U .

Показано, что (при $K_U > 5\%$) формируется кондуктивная низкочастотная ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения δK_U . Распределение δK_U соответствует нормальному закону распределения случайной величины теории вероятностей. Эта помеха является локальным параметром, характеризуется параметрами распределения ($M[\delta K_U] = 4,62\%$, $\sigma[\delta K_U] = 0,42\%$), появляется с вероятностью (0,13), превышающей допустимую вероятность нарушения (0,05) нормально допустимого значения коэффициентом искажения (5 %) в 2,6 раза.

Оценивалось влияние искажений синусоидальности кривой напряжения на ток однофазного замыкания на землю в сети 10 кВ с изолированной нейтралью. Использовалась математическая модель для прогнозирования токов замыкания фазы на землю в сетях от 6 до 35 кВ

$$I_z = I_c + KI_c M[K_U], \quad (4)$$

где $K = 0,046-0,07$ – коэффициент, учитывающий нелинейную зависимость тока I_z от гармонического воздействия при несимметрии напряжении по обратной последовательности; $M[K_U]$ – математическое ожидание коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, %; I_c – ёмкостный ток замыкания фазы на землю, А.

Относительная ошибка расчёта по этой формуле I_3 с вероятностью 0,95 находится в пределах $\pm 10\%$.

Показано, что действующие сети, рассчитанные для работы при синусоидальном и симметричном напряжении, имеют запас по току замыкания фазы на землю. Этот запас b при гармоническом воздействии на ток замыкания фазы на землю уменьшается и при условии его исчезновения

$$KM[K_{U,b}] > b = \frac{I_{c,d} - I_c}{I_c}, \quad (5)$$

где $I_{c,d}$ – допустимое значение ёмкостного тока замыкания фазы на землю в соответствии с «Правилами устройств электроустановок», А; $M[K_{U,b}]$ – математическое ожидание коэффициента K_U , при котором $I_{c,d} = I_c$, появляется кондуктивная низкочастотная ЭМП по току замыкания фазы на землю $\delta I_3 = I_3 / I_{c,d}$. Для исследуемой сети ($I_c = 19,5$ А) $\delta I_3 = 1,3$.

На рис. 2 приведён график нормальной плотности вероятности распределения кондуктивной ЭМП δK_U за расчётный период, совмещённый с нормально допустимым значением коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения $K_{U,n}$ и расчётной величиной $M[K_{U,b}]$. На участке $\{M[K_{U,b}], \infty\}$ наблюдается равенство вероятностей появления кондуктивных ЭМП δI_3 и δK_U .

Это позволяет составить уравнение

$$P(\delta I_3) = \int_{M[K_{U,b}]}^{\infty} \varphi(\delta K_U, [M\delta K_U], \sigma[\delta K_U]) d(\delta K_U) - a, \quad (6)$$

где $a = 2/24$ – допустимая для сети 10 кВ вероятность превышения I_c в течение 2 ч за сутки величины $I_{c,d}$;

$$\varphi(\delta K_U, M[\delta K_U], \sigma[K_U]) = 0,95 \exp\left[-\frac{(\delta K_U - 4,62)^2}{0,35}\right] - \text{нормальная плотность распределения величины } \delta K_U, 1\%.$$

Подставляя численные значения параметров распределения δK_U и вычисляя определённый интеграл с помощью функции Лапласа, получили $P(\delta I_3) = 0,88$. Эта величина в 6,8 раз больше вероятности появления помехи δK_U (0,13).

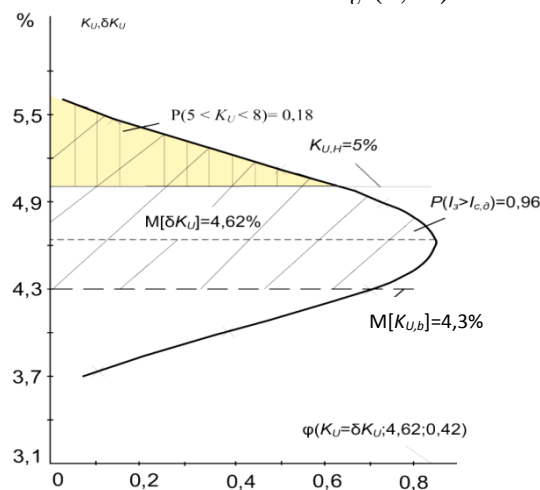


Рис. 2. График нормальной плотности вероятности распределения значений δK_U

за сутки, совмещённый с нормально допустимым значением $K_{U,n}$ и расчётной величиной $M[K_{U,b}]$

Осциллографирование фазных напряжений и тока замыкания на землю проводилось с помощью цифрового осциллографа типа DL-750-8. Программное обеспечение осциллографа позволяет выполнить обработку осциллограмм и передать данные в другие программы для определения гармонического состава и амплитуд. Математические возможности пакета программ Matlab позволяют осуществить эти операции.

Анализ осциллограмм переходного процесса при металлическом замыкании фазы на землю позволяет отметить следующее: частота переходного процесса изменения напряжений составляла от 1,9 до 1,98 кГц; кратность коммутационного импульсного напряжения находилась в пределах от 2,05 до 2,41; номера наиболее выраженных гармоник в фазных напряжениях не всегда совпадают с такими же гармониками в токе замыкания фазы на землю из-за резонансов токов на частотах высших гармонических составляющих.

Исследовались дуговые замыкания фазы на землю. Применялся искровой промежуток (рис. 3) с шаровыми медными электродами. За счёт заданной скорости вращения подвижного электрода (один оборот за 5 с) обеспечивалось горение перемещающейся дуги при схождении – расхождении.

На рис. 4 приведены осциллограммы фазных напряжений при $I_c = 4,7$ А. Установлено, что: частоты переходных процессов по напряжению в неповреждённых фазах составляют от 1,72 до 1,9 кГц, а для повреждённой фазы – от 20 до 25 кГц; кратность коммутационного импульсного напряжения находится в пределах от 2,64 до 4,3; частота высших гармонических составляющих тока дуги находится в пределах от 1,7 до 2,0 кГц; при зажигании дуги наблюдался бросок ёмкостного тока более 1,0 кА.

Обосновывается, что резистивное заземление нейтрали является наиболее эффективным для ограничения параметров переходного процесса при однофазных дуговых замыканиях на землю. Для этого отмечается, что уровень перенапряжений в сети при однофазных замыканиях определяется соотношением между ёмкостной составляющей I_c и активной составляющей I_a тока через резистор

$$\frac{I_c}{I_a} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

Изменением сопротивления резистора можно добиться желаемого значения угла α , обуславливающего допустимый уровень возможных перенапряжений.

Используется математическая модель зависимости кондуктивной ЭМП по току замыкания фазы на землю I_3 (рис. 5) от параметров сети (ёмкостная проводимость фазы ϵ), сопротивлений резистора (R_N) и места пробоя изоляции (R_3), фазного напряжения U

$$\delta I_3 = \frac{U}{I_{c,d}} \cdot \left[\frac{(R_N + R_3) + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3}{(R_N + R_3)^2 + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3^2} + j \frac{3\epsilon R_N (R_N + R_3 - R_N R_3)}{(R_N + R_3)^2 + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3^2} \right]. \quad (8)$$

Относительная ошибка расчётов δI_3 с вероятностью 0,95 не превышает $\pm(7-10)$ %.

Осциллографируются коммутационные импульсные напряжения при дуговом однофазном замыкании на землю. Характерные осциллограммы фазных напряжений приведены на рисунке 6. Определены условия устойчивого горения дуги. Обнаружено (рис. 4 и 6), что кратности коммутационных импульсных напряжений с вероятностью 0,95 снижаются не менее чем в 1,2 раза по сравнению с дуговыми замыканиями фазы на землю в сети с изолированной нейтралью.

Сформулированы технические условия для обеспечения ЭМС сетей от 6 до 35 кВ как рецепторов при некачественной электроэнергии (минимальные значения сопротивлений резисторов и времени разряда ёмкости сети; времени срабатывания релейной защиты фидера подстанции и алгоритм действия сетевой автоматики).

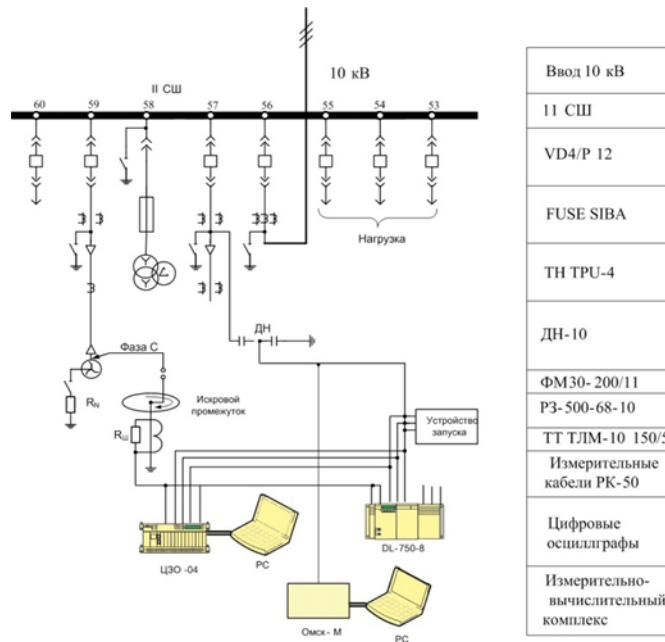


Рис. 3. Электрическая схема подключения приборов и оборудования для измерения параметров электромагнитной обстановки и осциллографирования фазных напряжений и тока замыкания фазы на землю

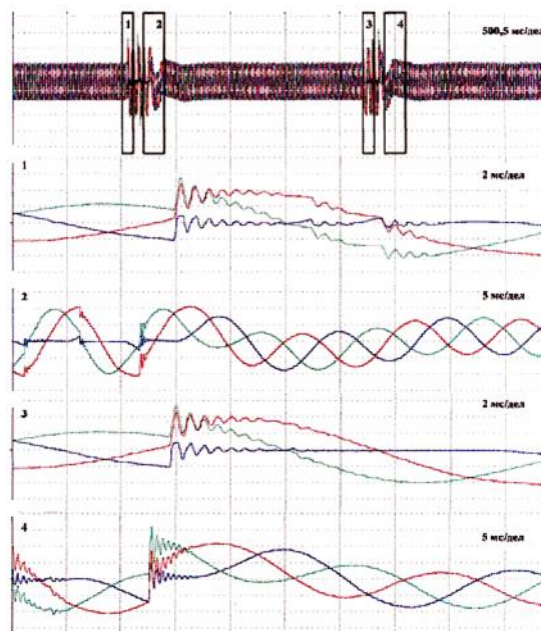


Рис. 4. Осциллограммы фазных напряжений в сети 10 кВ при дуговом однофазном замыкании на землю: масштаб – 7,4 кВ/дел

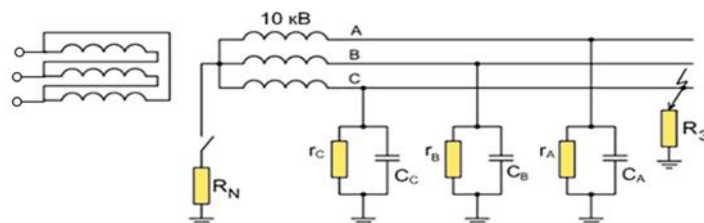


Рис. 5. Схема замещения сети напряжением 10 кВ с резистором в нейтрали

Обоснованы требования и методический подход к определению электромагнитной обстановки в сетях от 6 до 35 кВ и осциллографированию переходных процессов, протекающих при однофазных замыканиях на землю. Рекомендуется использовать комплексный подход на основе применения измерительно-вычислительного комплекса «Омск-М» и цифрового осциллографа типа DL-750-8.

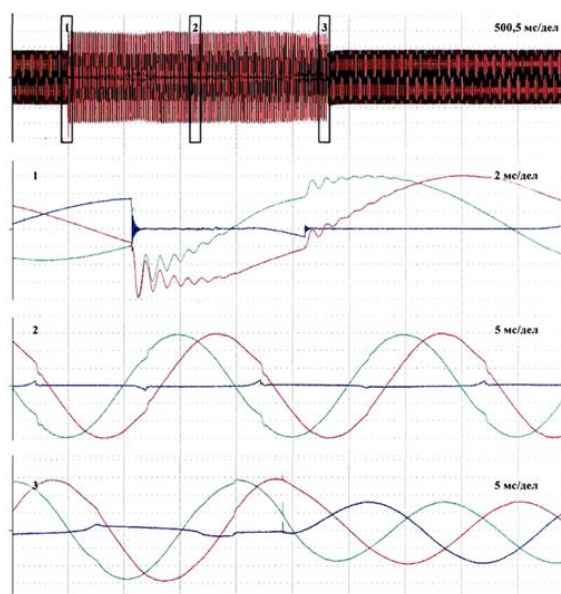


Рис. 6. Осциллограммы фазных напряжений в сети 10 кВ при дуговом однофазном замыкании на землю и резистивном заземлении ($R_N = 500$ Ом) нейтрали: масштаб – 4,86 кВ/дел

Представлен механизм обеспечения электромагнитной совместимости сетей от 6 до 35 кВ как рецепторов путём подавления кондуктивных электромагнитных помех, обусловленных некачественной электроэнергией, и ограничения параметров переходного процесса при однофазном дуговом замыкании на землю.

Представлены условия электромагнитной совместимости сетей от 6 до 35 кВ с изолированными нейтралью как рецепторов при гармоническом воздействии; показано на основании измерений показателей качества электроэнергии в сети 10 кВ полигона исследования, что ГОСТ 13109-97 не защищает её как рецептора.

Предложена методика обеспечения электромагнитной совместимости сетей напряжением от 6 до 35 кВ как рецепторов путём заземления нейтралей через резисторы:

- сопротивление резистора в нейтрали сети 35 кВ не должно быть меньше 1 000 Ом, при этом ёмкость сети разряжается за время от $9 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ с, т. е. за время меньшее, чем полупериод;

- сопротивление резистора в нейтрали сети 10 кВ не должно быть меньше 100 Ом, при этом ёмкость сети разряжается за ещё меньшее время;

- релейная защита фидеров подстанции должна: иметь минимальное время срабатывания (2,0–2,5) с; отстраиваться от напряжения смещения нейтрали при изолированной нейтрали; действовать на отключение повреждённой линии, далее, при необходимости, самого резистора и ввода от трансформатора на секцию шин; выполняться направленной в трёхфазном исполнении.

Литература

1. Апполонский С. М., Вилесов В. Д., Воршевский А. А. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения // Электричество. 1991. № 4. С 1–5.

2. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. М. : УМК МПС, 2002. 638 с.
3. Борисов Р. К. Методы и средства решения практических проблем электромагнитной совместимости на электростанциях и подстанциях // Электро. 2002. № 2. С 44–52.
4. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ Р 54149-2010 ; введ. 01.07.14. М. : Стандарты, 1998. 31 с.
5. Данилов Г. А., Денчик Ю. М., Иванов М. Н., Ситников Г. В. Повышение качества функционирования линий электропередачи / под ред. В. П. Горелова и В. Г. Сальникова. Новосибирск : МГАВТ 2013. 559 с.
6. Кучумов Л. Л. Исследователи ждут большего от современных измерительных приборов // Новости электротехники. 2004. № 4. С. 64–66.
7. Челазнов А. А. Методические указания по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6–10 кВ предприятий ОАО «Газпром» // Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6–35 кВ : тр. IV всерос. науч.-техн. конф. 26–28 сент. 2006. Новосибирск, 2006. С. 9–19.

УДК 621.316.176.052.4:622.323/.324

*Кислицын Е. Ю., Шмарин Я. С.
Kislitsyn E. Yu., Shmarin Ya. S.*

КОНДУКТИВНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ В ЗАМКНУТЫХ СЕТЯХ НЕФТЕ- И ГАЗОДОБЫЧИ

CONDUCTIVE LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN LOOP NETWORKS OF OIL AND GAS PRODUCTION

В статье рассмотрены причины появления кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП) в замкнутых сетях, проведен анализ кондуктивных низкочастотных ЭМП на примере КТП 10кВ Ямбург, питающая промышленную площадку № 1 и № 2 Ямбургского месторождения газа, обозначены проблемы кондуктивной помехоустойчивости, разработана методика определения рациональных мест размыкания замкнутых сетей от 6 до 35 кВ при условии подавления кондуктивных низкочастотных помех.

Ключевые слова: кондуктивная низкочастотная помеха, помехоустойчивость, нефтедобыча, газодобыча, качество электроэнергии, замкнутая сеть.

Нарастающие темпы добычи, транспортировки и первичной переработки природных ресурсов (нефть, газ, полиметаллы, алмазы и т. д.) в районах Сибири и Дальнего Востока России обуславливают интенсивную их электрификацию. Замкнутые электрические сети (далее сети) от 6 до 35 кВ этих объектов в наибольшей мере, по сравнению с питающими от удалённых электроэнергетических систем (ЭЭС) сетями 110 кВ и выше, связаны с особенностями технологических процессов и характером воздействия окружающей среды. В этих сетях должны обеспечиваться уровни электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств для кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП) в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 [1]. Однако в этих сетях наблюдается сложная электромагнитная обстановка, снижающая надёжность и эффективность электроснабжения. Объясняется это нарушением регламентируемой ГОСТом уровней ЭМС технических средств по следующим показателям качества электрической энергии: установившееся отклонение

напряжения δU , %; коэффициент искажения синусоидальности кривой междуфазного (фазного) напряжения K_U , %; отклонение частоты Δf , Гц.

Эти низкие показатели КЭ вызывают появление кондуктивных электромагнитных помех, распространяющихся по проводам, которые нарушают режим работы:

- технических средств (оборудование, аппаратура, изделия или их составляющие части), функционирование которых основано на законах электротехники, радиотехники и электроники;

- систем релейной защиты и автоматики;

- электроэнергетических систем.

Стандарт как основной нормативно-технический и методический документ не комментирует показатели КЭ, которые выходят за установленные значения, как параметры ЭМО, но требует подавления кондуктивных ЭМП.

Базовым полигоном исследования выбрана система электроснабжения Ямбургского месторождения газа. На рис. 1 и 2 представлены схемы электроснабжения промышленных площадок № 1 и № 2 Ямбургского месторождения газа. Питание от Северных электрических сетей (Федеральные электрические сети России) поступает на напряжении 10 кВ. Электростанции собственных нужд (ЭСН) промышленной площадки № 1 «Елец» и площадки № 2 «Тула» расположены вне центров электрических нагрузок этих площадок. В свою очередь каждая эта подстанция состоит из четырёх электростанций типов ПАЭС-2500 М и ПАЭС-2500. Мощность каждого генератора составляет 2,5 МВт. В качестве двигателей используются авиационные газотурбинные двигатели.

Кондуктивные низкочастотные ЭМП не позволяют использовать классическую методику определения рациональных мест размыкания замкнутой сети по приведённым годовым затратам из-за отсутствия информации об ущербах [1]. В связи с этим формулируется целевая функция вида:

$$Z = \frac{1}{U_H^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) R_i = \min, \quad (1)$$

при условии: $\delta U_H = 0$, $\delta(\Delta f) = 0$, $\delta K_U = 0$, где P_i, Q_i, R_i – соответственно, активная и реактивная мощности и сопротивление i -го участка сети при максимальном режиме нагрузки, Вт, Вар, Ом; Z – суммарные потери мощности в n участках сети, В·А.

Учитывая незначительное число узлов нагрузки в исследуемых сетях, решение оптимизационной задачи (1) можно осуществить методом дискретного спуска. Простейший подход заключается в поочередном переборе на персональном компьютере всех возможных сочетаний разрезов с контролем по ограничивающим условиям.

Задача (1) является корректно поставленной, потому что для всяких исходных данных рассматриваемого i -го варианта разрезов сети ($P_i \in P, Q_i \in Q, R_i \in R, i \in n$) существует однозначное решение $Z_i \in Z = \min$. Задача устойчива на пространстве $\sum_{i=1}^k \delta X_i = 0$, где k – количество кондуктивных низкочастотных ЭМП δX_i , распространяющихся по сетям.

Проблема помехоустойчивости [2; 3] электротехнических, электронных и радиоэлектронных систем, потребляющих электрическую энергию низкого качества, обостряется. Она разделяется на проблему кондуктивной помехоустойчивости и проблему индуктивной помехоустойчивости в зависимости от места появления ЭМП: в сети или в пространстве.

Кондуктивные низкочастотные помехи, в свою очередь, разделяют на следующие виды, по каждому из которых вводятся свои нормы и проводится тестирование оборудования на устойчивость: наносекундные импульсные помехи; микросекундные импульсные помехи большой энергии; динамические изменения напряжения электропитания (провалы, прерывания, выбросы); колебательные затухающие помехи (одиночные и повторяющиеся); контактные электростатические разряды (условно).

Подавить кондуктивную низкочастотную ЭМП по установившемуся отклонению напряжения δU_{II} можно путём регулирования напряжения. Основным способом регулирования напряжения в замкнутых сетях (6–10) кВ является регулирование в центрах питания (ЦП). Для этого необходимо определить закон регулирования, соответствующие уставки регулятора и задать их устройству автоматического регулирования (АРН) (рис. 3). Главной задачей при выборе уставок считается обеспечение нормированных отклонений напряжений у электроприёмников (ЭП). Этого можно достичь, если в сети подавлена δU_{II} [3].

В связи с этим рекомендуется определять нижний предел диапазона регулирования напряжения ($\Delta U, \%$) с учётом величины $\Delta M[\delta U_{II}]$

$$\Delta U \geq \Delta M[\delta U_{II}] = M[\delta U_y] - M[\delta U_{II}], \quad (2)$$

где $\Delta M[\delta U_y]$ – математическое ожидание установившегося отклонения напряжения в сети, при котором исчезает кондуктивная ЭМП $\delta U_{II}, \%$; $M[\delta U_{II}]$ – математическое ожидание кондуктивной ЭМП $\delta U_{II}, \%$. Приведён аналитический метод расчёта $\Delta M[\delta U_{II}]$.

Рассматриваемые замкнутые сети характеризуются сравнительно спокойными графиками нагрузок, поэтому рекомендуется режим стабилизации напряжения (закон регулирования напряжения)

$$U_c = U_H (1 \pm \Delta M[\delta U_{II}]), \quad (3)$$

где $\Delta M[\delta U_{II}]$ представлена в о. е.

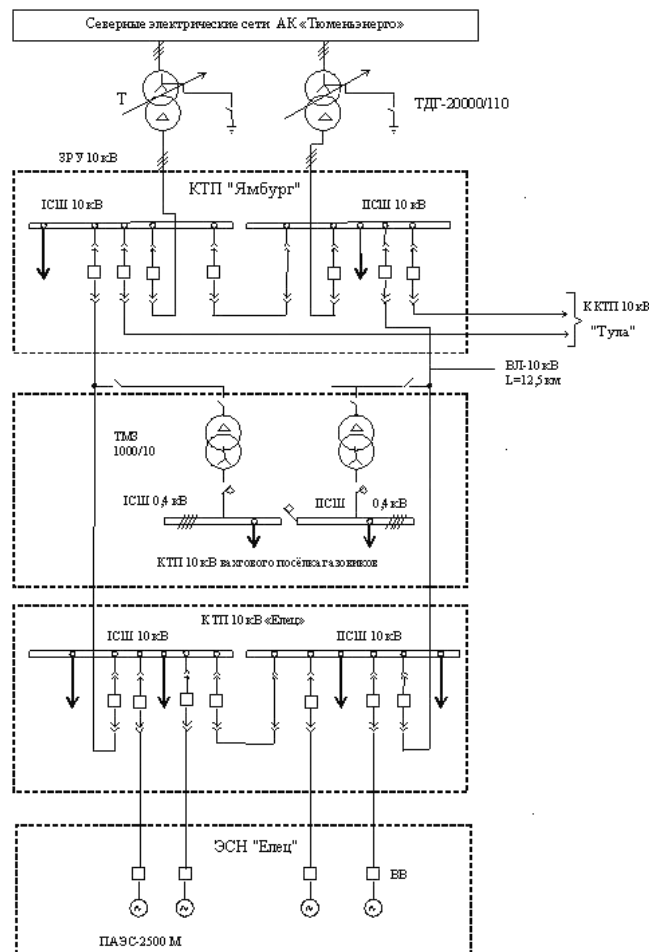


Рис. 1. Схема электроснабжения промышленной площадки № 1 Ямбургского месторождения газа

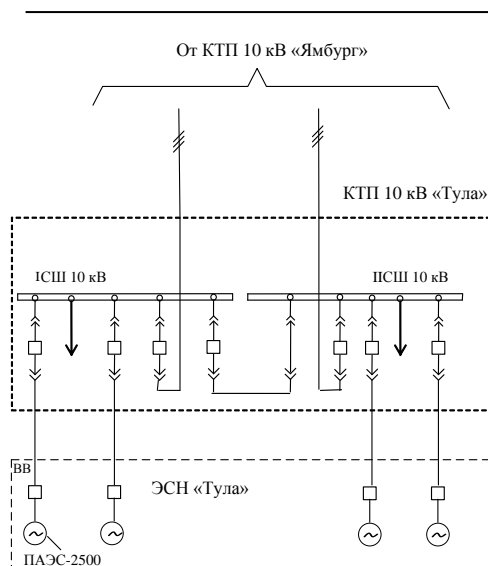


Рис. 2. Схема электроснабжения промышленной площадки № 2 Ямбургского месторождения газа

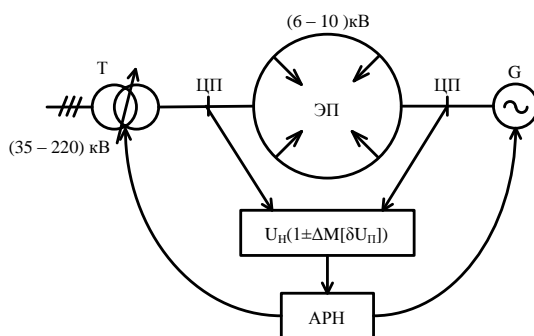


Рис. 3. Режим стабилизации напряжения в центрах питания замкнутой сети (6–10) кВ, при котором подавляется кондуктивная ЭМП δU_n

Выводы

1. Обоснован с помощью методов системного анализа выбор базового полигона с замкнутыми сетями напряжением 10 кВ, удалёнными от электроэнергетических систем для экспериментальных исследований.
2. Кондуктивная электромагнитная помеха по установившемуся отклонению напряжения обнаружена при замкнутом и разомкнутом режимах сети. Она является локальным параметром электромагнитной обстановки и характеризует недопустимые изменения активной и реактивной мощности в узле нагрузки и реакцию на это ближайших источников реактивной мощности.
3. Для ослабления гармонического воздействия на сеть рекомендуется рационально размещать нелинейную нагрузку объекта (вентильные преобразователи) по различным частям разомкнутой сети.

Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-97 ; введ. 25.03.2013. Стандарты, 2014. 31 с.

2. Иванова Е. В., Руппель А. А. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях 6–10 кВ / под ред. В. П. Горелова. Омск : Новосиб. гос. акад. вод. транспорта, 2004. 284 с.

3. Иванова Е. В. Кондуктивные коммутационные помехи в местных электрических сетях промышленных предприятий и электростанций // Промышленная энергетика. 2003. № 7. С. 36–40.

УДК 338.45:621.311.1(571.1-16)«19»

*Колева Г. Ю., Чалков А. С., Шеломенцев В. А.
Koleva G. Yu., Chalkov A. S., Shelomentsev V. A.*

СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В XX ВЕКЕ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

ELECTRIC POWER INDUSTRY ESTABLISHMENT IN THE XX CENTURY ON TERRITORY OF NORTH-WESTERN PART OF WESTERN SIBERIA

В статье рассматриваются основные периоды становления электроэнергетической отрасли на территории северо-западной части Западной Сибири. Выделены четыре основных периода. Подчеркивается, что основные результаты в решении проблемы создания электроэнергетической отрасли связаны с периодом интенсивного нефтегазового освоения территории Тюменской области.

Ключевые слова: строительство, электростанция, нефть, газ, Западная Сибирь.

Тюменская область – ведущий субъект РФ в сфере добычи нефти и газа. С освоением нефтегазовых ресурсов было связано становление индустриального облика территории, составной частью этих процессов явилось формирование мощной энергетической отрасли. Электроэнергетика в период интенсивного нефтегазового освоения региона из вспомогательной сферы превратилась в одну из ведущих отраслей специализации Западно-Сибирского нефтегазодобывающего района [3, с. 287]. До этого длительное время на протяжении XX в. территория северо-западной части Западной Сибири, которая до образования Тюменской области переживала разные территориально-административные переподчинения (Тобольская губерния, Тюменская губерния, Уральская область, Обь-Иртышская область, Омская область, с 1944 – Тюменская область), была лишена своей базы энергоснабжения, что являлось сдерживающим фактором в экономическом развитии не только региона в целом, но и крупных городов, таких как Тюмень, Тобольск.

В развитии электроэнергетики на территории северо-западной части Западной Сибири, которая в настоящее время соотносится с границами Тюменской области, на протяжении XX в. можно выделить ряд периодов:

Первый – с конца XIX в. до 1917 г. – связан с территорией Тобольской губернии. Характеризуется созданием первых электростанций: в Тобольске и Тюмени. Однако первенство принадлежит г. Тюмени. Тюмень, оказавшаяся на транссибирской магистрали, стала отличаться в последней трети XIX в. самыми высокими темпами экономического развития. В этом городе сложился слой наиболее предприимчивого купечества. Первые электростанции связывают с деятельностью купца И. И. Игнатова. Учитывая дату постройки здания для частной локальной электростанции купцом И. И. Игнатовым в 1893 г. по адресу улица Гаспаровская 33, можно датировать появление первой электростанции в Тюмени. Станция располагала двумя генераторами постоянного тока и электроизмерительными приборами, изготовленными в Германии фирмой предпринимателя Михаила Доливо-Добровольского. Гене-

раторы вращались от парового локомотива. Здесь же располагались паровые насосы, перекачивающие воды с реки в водонапорную башню [7, с. 450]. И. И. Игнатов, выступающий как пароходовладелец, в 1898 г. вводит еще одну частную локальную электростанцию на речной пристани по ул. Новозагородной. Электростанция располагала также двумя генераторами постоянного тока с приводом от парового локомотива, топкой и электроизмерительными приборами. В 1909 г. в Тюмени начинает свою работу городская электростанция, располагавшаяся в квартале современных улиц Республики, Кирова, Ленина, Челюскинцев, созданная по проекту Ф. Поля. Она включала в себя 2 двигателя по 40 лошадиных сил, 2 генератора, 120 аккумуляторов и 4 распределительных щита [7, с. 450]. Относительно постройки первой электростанции в Тобольске многие источники выдают 7 августа 1908 г. Но это не совсем верно, к этой дате приурочено освещение первыми электролампочками заседания Тобольской городской управы от машины-генератора водонапорной станции, запущенной в 1902 г. Первая электростанция в Тобольске появилась в 1911 г., работала на дровах, имея первоначальную мощность всего в 40 киловатт [9, с. 11].

После первой мировой войны прорабатывалась идея строительства более крупной электростанции под Тюменью на озере Андреевском. В 1920 г. Ф. Поль предложил электропромотделу Тюменского губсовнархоза использовать напор воды реки Пышмы в районе впадения в нее речки Дуван (исток Андреевского озера) для создания электростанции. Проект, предполагавший значительную экономию топлива и лесов, поначалу получил поддержку, и в мае 1921 г. под руководством Ф. Поля начались предварительные изыскания на местности. Нивелировка трассы канала показала, что для предложенного варианта гидросистемы максимальный перепад уровней воды в Туре и Андреевском явно недостаточен. Впрочем, опытный специалист мог бы прийти к аналогичному выводу и без нивелировочных работ, зная условия сибирских равнин. Надо полагать, Ф. Поль необходимой квалификацией не обладал. Нормальное функционирование электростанции на энергии воды потребовало бы затопления огромных площадей, включая луга, поймы рек, сенокосные угодья, сосновые леса. Изыскания прекратились. Материалы были переданы в архив губсовнархоза. Проект Ф. Поля в 1926 г. был обоснованно развенчан и окончательно похоронен инженером В. Бурковым [8, с. 282]. Таким образом, в рамках существования Тобольской губернии и вновь образованной после революции 1917 г. Тюменской губернии вопрос развития электроэнергетики в регионе не получил сколько-нибудь серьезного решения, что в целом было типичным явлением для страны. Государственный план электрификации страны, под названием «ГОЭЛРО», был принят только в 1920 г.

Второй период в решении проблем энергообеспечения региона связан со временем нахождения территории в составе Уральской, а затем и Омской областей (1923–1933 гг.). Новой чертой экономического развития явилось создание лесопромышленных, рыбодобывающих и рыбоперерабатывающих предприятий, прежде всего, на севере региона. Был сделан шаг в индустриальном развитии образованных национальных округов. По статистическим данным в конце 1920-х гг. электростанций на севере как таковых практически нет. Основу производства электроэнергии составляют электрогенераторы мощностью 1,1 тыс. кВт, производя 2,1 млн кВт·час. Появляются маломощные электростанции в Ханты-Мансийске и Салехарде [12, с. 84–85]. Юг региона в 1920–1930-е гг. не получил сколько-нибудь существенного экономического развития, не уделялось внимания и электроэнергетической проблеме.

Третий период – 1944–1964 гг. – от момента образования Тюменской области до начала нефтегазового освоения территории. Образовавшаяся в 1944 г. Тюменская область получила тяжелое экономическое наследство. По многим экономическим показателям она уступала соседним областям, занимая предпоследнее место в Уральском экономическом районе по объемам промышленного производства [4, с. 54]. В отраслевой структуре промышленности по удельному весу валовой продукции преобладала продукция пищевой, лесной, деревообрабатывающей промышленности, в суммарном объеме составляя почти 60 % [4, с. 54]. В этот период перед Тюменской областью встала проблема поиска промышленного

профиля, однако эта проблема упиралась в отсутствие источников постоянного энергоснабжения. В послевоенные годы Тюменская область продолжала оставаться типичной сибирской глубинкой со слаборазвитой промышленностью. В первые годы после создания Тюменской области Госплан СССР сделал ставку на сохранение традиционных отраслей экономики области (лесной и рыбной). Одним из основных препятствий в индустриальном развитии территории Тюменской области было отсутствие энергетической базы. Уровень электрификации области был низким [4, с. 54]. В начале 1951 г. из 38 районных центров области было электрифицировано только 18, из которых 12 – случайно приобретёнными маломощными автомобильными и тракторными двигателями или локомотивами, демонтированными с мелких предприятий. Мощность электростанций самого областного центра составляла всего 8 кВт при потребности в 30 кВт, по этой причине 153 предприятия и мастерских Тюмени работали на строго принудительном энергетическом режиме, населению было запрещено пользоваться электронагревательными приборами, большинство улиц не освещалось, а жилые дома окраин совсем не получали электроэнергии. Некоторое изменение в развитии электроэнергетики отмечалось в автономных округах: в ХМНО в период 1940–1950-е гг. число электростанций увеличилось с 4 до 317, выработка электроэнергии – с 0,2 до 14 млн кВт·час, в ЯННО количество электростанций возросло с 2 до 71, выработка электроэнергии – с 0,3 до 10,6 млн кВт·час. Внимание было уделено и центрам автономных округов, где отмечается рост числа маломощных источников электроэнергии: в Ханты-Мансийске – до 26 единиц, при выработке электроэнергии до 3,9 млн кВт·час.; в Салехарде число электростанций выросло с 1 до 9, выработка электроэнергии с 0,3 до 5,6 млн кВт·час [13, с. 84–85, 88–89, 93].

В обращении Тюменского обкома партии в ЦК партии от февраля 1956 г. подчеркивалось сдерживающее для экономики области состояние энергетической базы [4, с. 55]. В 1955 г. Министерство строительства электростанций приступило к сооружению в Тюмени ТЭЦ мощностью 300 тыс. кВт·час, однако темпы ее строительства оказались очень низкими. В 1959 г. первый секретарь Тюменского обкома партии В. В. Косов в докладной записке в Бюро ЦК КПСС по РСФСР «Об освоении естественных богатств и заселении малообжитых районов Тюменской области», наряду с прочими предложениями, специальный раздел записки посвятил строительству Нижне-Обской ГЭС. В документе говорилось: «Для обеспечения электроэнергией промышленных районов Уральского и Печорского бассейнов, а также народного хозяйства Тюменской, Курганской и других областей построить в ближайшие две пятилетки Нижне-Обскую ГЭС в районе Салехарда», подчеркивалось, что «ГЭС, находясь рядом с Уралом и Печорским бассейном, будет близка к северным промышленным районам, сыграет огромную роль в их разведке» [4, с. 56]. Просили поставить вопрос перед союзным правительством о строительстве и сроках сооружения ГЭС. В тот период в стране широко развернулось гидроэнергетическое строительство. Тюменский обком партии рассчитывал на перенесение интенсивного гидроэнергетического строительства на территорию Тюменской области. Нижне-Обская ГЭС должна была войти в Обский гидроэнергетический каскад, включающий еще 10 ГЭС [4, с. 56]. Предварительная мощность ГЭС определялась в 6 млн кВт·час, она должна была стать основой энергоснабжения промышленности Урала и Тюменской области. Надо отметить, что к тому времени проект строительства Нижне-Обской ГЭС получил поддержку в научных кругах, проектирование ГЭС с середины 1950-х гг. велось в институте «Гидропроект», получило одобрение на координационном совещании АН СССР по изучению производительных сил Тюменской области.

Расположение электростанции планировалось в 130 км от Салехарда. Предполагалось создание водохранилища с затоплением территории вплоть до Среднего Приобья. Ни у кого не вызывало опасения то, что затоплению подлежали огромные территории. Этот проект активно обсуждался, приобретая как сторонников, так и противников [6, с. 86]. Гидроэнергетическое строительство на территории Тюменской области стало рассматриваться в качестве варианта изменения ее традиционного аграрного облика, шагом к формированию новых производств, но осуществлению этого проекта помешало открытие нефтяных и газовых месторождений.

Четвертый период – 1960–1980-е гг. – осуществление интенсивного нефтегазового освоения территории Тюменской области. Некоторое время вопрос о строительстве Нижне-Обской ГЭС оставался «открытым до завершения нефтепоисковых исследований на затопляемых территориях», ведь в первоначальном плане проекта высота платины должна была составить 42 м, и воды должны были бы затопить 113 тыс. кв. км низменности, чьи богатые запасы нефти и газа стали бы невосполнимой потерей. Несмотря на наличие большого количества сторонников строительства Нижне-Обской ГЭС, постепенно усиливалась позиция тех, кто настаивал на закрытии проекта Нижне-Обской ГЭС по причине её нецелесообразности в Тюменской области [6, с. 87].

Для обеспечения нефтяной, газовой отраслей, строительных предприятий в Тюменской области развернулась работа по созданию собственной мощной энергетической базы.

Еще до создания нефтегазодобывающей сферы областные власти «пробили» вопрос строительства в Тюмени крупной по тем временам тепловой электростанции (установленная мощность: электрическая – 662 МВт, тепловая – 1896,9 МВт). В 1956 г. строительство началось, а 8 октября 1960 г. дал электрический ток первый турбогенератор электростанции мощностью 25 МВт. Основное оборудование (турбоагрегаты и энергетические котлы) станции было введено в работу в период с 1963 по 1972 гг. Начало централизации электроснабжения было положено [2, с. 13]. ТЭЦ создавалась и в Тобольске.

Решение энергетической проблемы в районах добычи нефти и газа стало осуществляться по трем направлениям:

1. Обеспечение добывающих предприятий, строительных организаций временными источниками энергоснабжения: стационарными и передвижными дизельными электростанциями, энергопоездами, газотурбинными электростанциями.

2. Подключение к государственной энергосистеме, создание условий для передачи электроэнергии из южных районов на север Тюменской области.

3. Создание крупного источника энергоснабжения непосредственно в районах нефтегазодобычи. В качестве топлива планировалось использовать попутный нефтяной газ.

Первыми источниками энергоснабжения нефтяных предприятий стали дизельные электростанции мощностью 50–200 кВт·час [11, с. 147]. В 1965 г. было 10 электростанций общего пользования. Начиная с 1965 г. начали сооружать электростанции большей мощности – в 630 кВт·час и использовать паротурбинные энергопоезда мощностью до 4 000 тыс. кВт·час. Первый энергопоезд поступил на Шаимские промыслы в 1964 г., в Среднее Приобье – в 1965 г. Чрезмерная объемность, сложность доставки требовали поиска новых решений проблемы. В 1967 г. в управлении «Шаимнефть» началось испытание газотурбинных электростанций, изготовленных Запорожским моторостроительным заводом. По заказам нефтяников с 1968 г. завод стал изготавливать передвижные ГТЭС, доставлявшиеся тяжелыми транспортными самолетами в пункты назначения. На 1969 г. имелось 6 таких электростанций. С целью подключения районов нефтегазодобычи к государственной энергосистеме, для передачи электроэнергии с юга на север Тюменской области началось увеличение мощности Тюменской ТЭЦ до 450 МВт, развернулось строительство линий электропередач. Началось строительство ЛЭП Тюмень – Шаим, Тюмень – Усть-Балык, Тюмень – Сургут, Сургут – Нефтеюганск, велось соединение Свердловской и Тюменской энергосистем.

Однако кардинальное решение вопроса энергоснабжения территории связано со строительством Сургутской ГРЭС, проект которой, разработанный УралТЭПом, позднее был удостоен премии Совета Министров СССР. Флагман Советской энергосистемы, работающий в основном на попутном газе, она смогла решить проблему дефицита не только самой Тюменской области, но и обеспечить электроэнергией близлежащие регионы.

В сентябре 1964 г. Уральское отделение института «Теплоэлектропроект» получило задание спроектировать ГРЭС мощностью 1,2–2,4 млн кВт, в 1965 г. Сургут как район строительства был определен Министерством энергетики и одобрен Госпланом. Летом 1965 г. на площадке строительства были начаты первые изыскания. Май 1966 г. знаменует собой нача-

ло строительства: прибывают проектировщики, составившие два года проектное задание. Первый отряд строителей из 13 человек сформирован в Сургуте в феврале 1968 г. В феврале 1968 г. была сформирована дирекция строящейся Сургутской ГРЭС. Штаб размещался в частном доме. В марте и апреле этого же года поступала первая рабочая техника и производился ряд подготовительных мероприятий. В 1969 г. велось строительство жилого микрорайона. В 1970 г. началось создание строительной базы. 22 декабря 1970 г. в 19 часов 06 минут поставлен на холостые обороты первый турбогенератор мощностью 12 тысяч кВт – пускорезервная ТЭЦ дала промышленный ток. Перед новогодними праздниками в строй вступил второй турбогенератор. 28 декабря 1972 г. построен первый блок Сургутской ГРЭС мощностью 210 тысяч кВт, 29 августа 1973 г. – второй, а 19 декабря подоспел и третий. В 1977 г. вступил в строй седьмой энергоблок, мощности ГРЭС с 299 МВт в 1972 г. увеличилась до 1500 МВт. Энергия Сургутской ГРЭС поставлялась в Нижневартовский район, в г. Стрежевой Томской области.

Длительное время основные усилия по созданию электроэнергетических мощностей были сконцентрированы в нефтедобывающих районах, на протяжении 1960–1970-х гг. сохранялся дефицит электроэнергии в газодобывающих центрах Тюменской области. Проблема обеспечения электроэнергией газовых районов решалась в основном за счет развития электросетевого строительства.

Во второй половине 1970-х гг. проблема энергоснабжения встала с еще большей остротой. Возрос дефицит энергетических мощностей, одной из главных причин был переход к механизированной добыче нефти, к бурению на электроприводе. Остро ощущалась нехватка электроэнергии в газодобывающих районах, где объемы добычи росли очень высокими темпами. Во второй половине 1970-х гг. только из объединенной системы Урала отбор электроэнергии предприятиями Тюменской области вырос с 13 млн кВт·час до 1 млрд кВт·час [5, с. 100]. В связи с этим в 1982 г. началось строительство Сургутской ГРЭС-2, увеличение мощностей Тобольской и Тюменской ТЭЦ-2, Сургутской ГРЭС-1, запланировано строительство Нижневартовской и Няганьской ГРЭС, ввод новых ЛЭП от Сургутских ГРЭС в район газовых месторождений (до Уренгоя, Тарко-Сале, дополненное задачей строительства Уренгойской ГРЭС [5, с. 101]). Строительство Нижневартовской ГРЭС началось в 1983 г., Уренгойской – в 1982 г. [5, с. 101]. С 1985 г. началось строительство ГТЭС на Ямбурге. Активно велось электросетевое строительство силами 4 всесоюзных строительного-монтажных объединений. При этом объемы энергопотребления продолжали расти очень высокими темпами, к 1985 г. составив 42 млрд куб. м [5, с. 104]. В электроэнергии нуждались нефтяники, все более газовики, в не меньшей степени строители. На вторую половину 1980-х гг. была поставлена задача не только преодолеть дефицит электроэнергии, но и превращение электроэнергетики Тюменской области в «самобалансирующуюся» [5, с. 104]. Основное внимание Министерства энергетики СССР было сосредоточено прежде всего на вводе все новых мощностей Сургутской ГРЭС. На Сургутской ГРЭС-1 вступили в строй вторая и третья очереди, на Сургутской ГРЭС-2 количество энергоблоков составило к 1987 г. – 5, были существенно увеличены мощности Тюменской ТЭЦ-2 [5, с. 104]. К 1987 г. дефицит энергетических мощностей был преодолен [5, с. 104].

В 1987 г. произошло разделение Объединенной Сургутской ГРЭС на две самостоятельные электростанции: Сургутскую ГРЭС-1 и Сургутскую ГРЭС-2. Сейчас на ГРЭС-1 работает 16 блоков, на ГРЭС-2 – шесть по 800 тыс. кВт каждый. Общая мощность электростанций, расположенных на давних сургутских урочищах – Марьиной горе и Долгом мысу – составляет более 8 млн кВт. А это пять с половиной известных планов ГОЭЛРО, мощь и сила, созданная всем народом бывшего СССР в суровых северных условиях непрекращающейся ни на день стройки [1, с. 27; 14, с. 23].

Однако новой проблемой в последней трети 1980-х гг. стала необходимость увеличить темпы электросетевого строительства, так как имеющиеся оказались неспособны передавать создаваемые объемы электроэнергии, в связи с чем в Сургуте было образовано Глав-

ное управление по электросетевому строительству «Главзапсибэлектросетьстрой» [5, с. 105]. В то же самое время велось строительство 6 электростанций (в Сургуте, Нижневартовске, Нягани, Уренгое, Тобольске, Тобольской и Тюменской ТЭЦ-2) [5, с. 105]. В 1980-х гг. производство электроэнергии выросло в 60 раз [5, с. 106].

Таким образом, решение проблемы интенсивно осуществлялось в рамках создания и развития нефтегазодобывающего района. Электроэнергетика из обслуживающей отрасли (проблемы нефтяников) стала самостоятельной отраслью специализации Западно-Сибирского региона к 1989 г. Хотя для газодобывающих центров решение данной задачи продолжалось вплоть до создания Уренгойской ГРЭС, которую начали строить в 1982 г., а закончили по факту 9 ноября 2012 г., на которой установили новый энергоблок парогазовой установки, способный нести большую нагрузку, вплоть до 474 МВт без угрозы технологических нарушений [15].

Литература

1. Захаров И. Пять с половиной ГОЭЛРО // Югра. 2004. № 8. С. 27–29.
2. История создания Сургутских ГРЭС // Боган В. Ф., Каштанов И. Г. Тюменская энергосистема: героические будни созидания : сб. М. : Энергоатомиздат. 1998. С. 139–151.
3. Колева Г. Ю. История отраслей специализации и Западно-Сибирского нефтегазового комплекса (1960–1980-е гг.). Тюмень : Вектор Бук, 2007. 292 с.
4. Колева Г. Ю. Александр Константинович Протозанов (К 100-летию со дня рождения). Тюмень : Вектор Бук, 2012. 256 с.
5. Колева Г. Ю. Создание Западно-Сибирского нефтегазового комплекса в практике хозяйственного освоения Западной Сибири : дис. ... д-ра ист. наук. Тюмень, 2007. 372 с.
6. Комгорт М. В., Колева Г. Ю. Проблема повышения уровня индустриального развития Западной Сибири и проект строительства Нижне-Обской ГРЭС // Вестн. Томск. гос. ун-та, 2008. № 308. С. 85–91.
7. Копылов В. Е. Электростанции г. Тюмени // Большая Тюменская энциклопедия / ред. Г. Ф. Шафранов-Куцев. Тюмень : Сократ, 2009. Т. 4: А–Я. 480 с.
8. Копылов В. Е. Окрик памяти (История Тюменского края глазами инженера). Тюмень : Слово, 2001. 336 с.
9. Княжев А. Через пространство и время // Журнал о нашем городе. Тобольск, 2006. № 4. С. 10–11.
10. Мантикова Э. К. Проектно-изыскательские работы по строительству Сургутской ГРЭС // Северный регион. 2009. № 2. С. 158–161.
11. Нефть Сибири. М. : Недра, 1973. 255 с.
12. Основные показатели развития промышленности Тюменской области: статистический сборник. Тюмень : ЦСУ – РСФСР стат. управление Тюмен. обл., 1972. 114 с.
13. Основные показатели развития промышленности, транспорта и связи Тюменской области: статистический сборник по северному региону. Тюмень : ЦСУ – РСФСР стат. управление Тюменской области, 1964. 118 с.
14. Чечета О. В. Книга из дерева и камня: история Тюмени, написанная старыми мастерами / ред. Р. С. Гольдберг. 2-е изд., испр. и доп. Тюмень : Тюменский курьер, 2014. 221 с.
15. Уренгойская ГРЭС. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Уренгойская_ГРЭС (дата обращения 12.04.2016).

УДК 621.315.1

Конарева Е. А.

Konareva E. A.

СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

AERIAL LINES HIGH-TEMPERATURE WIRES MAIN TYPES COMPARISON

В работе представлен обзор и сравнение современных типов высокотемпературных неизолированных проводов повышенной пропускной способности, оценка потерь электрической энергии в высокотемпературных проводах воздушных линий электроэнергетических систем при учете особенностей, характерных для данных типов проводов.

Ключевые слова: воздушные линии, высокотемпературные провода, повышение пропускной способности, потери электроэнергии.

Развитие современной электроэнергетики нельзя представить без внедрения новых элементов, которые позволят повысить пропускную способность электрических сетей, снизить потери. Использование таких элементов предполагается в концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью, которая нашла свое отражение в энергетической стратегии России. Одними из инновационных элементов, позволяющих повысить пропускную способность электрических сетей, являются высокотемпературные провода.

Высокотемпературные провода, производимые в настоящее время, можно классифицировать по следующим конструктивным особенностям:

- с круглыми токопроводящими проволоками (рис. 1);
- с токопроводящими проволоками трапециевидной формы (рис. 2);
- с токопроводящими проволоками Z-образной формы (рис. 4).

На рис. 2 приведена конструкция высокотемпературного провода с трапециевидными проволоками, в которой сердечник и внутренний повив токопроводящих проволок разделены зазором. Токопроводящие проволоки внутреннего повива имеют трапециевидную форму, внешние – могут иметь как круглую, так и трапециевидную форму. На рис. 3 представлен провод, сердечник и токоведущие проволоки которого не разделены зазором.

Небольшие размеры провода дают возможность изменять его диаметр, увеличивать площадь поперечного сечения токопроводящей части, если сохранится диаметр, который будет равен диаметру провода с круглыми проволоками. Во втором случае провод гарантирует значительную пропускную способность и меньшие потери активной мощности на нагрев, чем у провода с круглыми проволоками [3].

Чтобы изготовить токопроводящие проволоки проводов с повышенной пропускной способностью при производстве используются: целиком отожженный мягкий алюминий (А0, 300 °С); термообработанные сплавы алюминия-циркония (Al-Zr) марок А1Т, А2Т, А3Т, А4Т (до 230 °С) [4].

Основные производители высокотемпературных проводов повышенной пропускной способности и наименования их продукции: «J-Power System Corporation» (GTACSRs, GZTACSRs); «ЗМ» (ACCR); «Lumpi-Berndorf и Seilwerk GmbH» (TACSRs/ACS, TACSR/HACIN); «Nexans» (AERO-Z, AAAC, ACAR, ACSR/AW); ООО «ЭМ-Кабель» (АСПТ АТ1 /20SA).

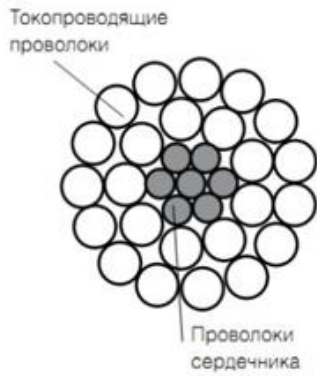


Рис. 1. Поперечное сечение провода с круглыми токопроводящими проволоками

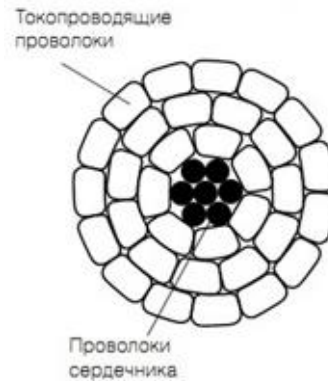


Рис. 2. Поперечное сечение провода с трапециевидными проводящими проволоками

Продукция предприятий, указанных выше, за то время, пока они производятся, показала себя с лучшей стороны. Эти провода занимают основную долю на мировом рынке высокотемпературных проводов. В 2007 г. данные марки проводов нашли свое применение на линиях ОАО «Кубаньэнерго», а, кроме того, провода с повышенной пропускной способностью используются в электроэнергетических системах США, Канады, Финляндии, Латвии, Швеции, Канаде и прочих государств.

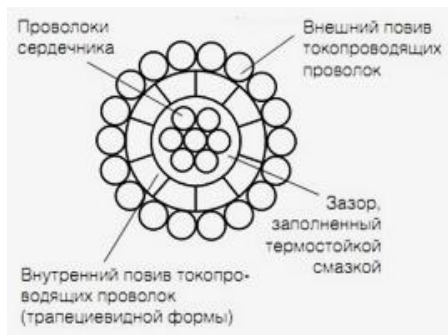


Рис. 3. Поперечное сечение провода с зазором

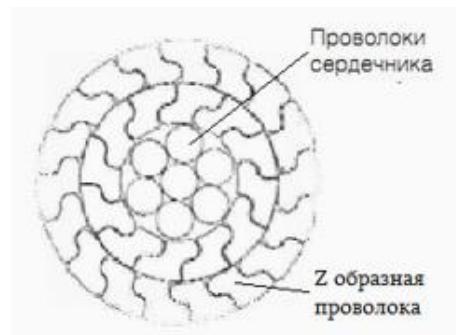


Рис. 4. Поперечное сечение провода с Z образной проводящей проволокой

1. Провода GTACSR компании «J-Power», Япония

Увеличение пропускной способности провода GTACSR обеспечивается так же, как и провода «Lumpri Berndorf» – большей рабочей температурой. Эти провода устойчивы к высокой температуре, могут в условиях продолжительного времени нести высокую токовую нагрузку.

Конструктивные особенности:

Особенность провода GTACSR заключается в том, что между токопроводящими слоями провода и стальным сердечником имеется зазор (рис. 5), отсюда и название – «провод с зазором».

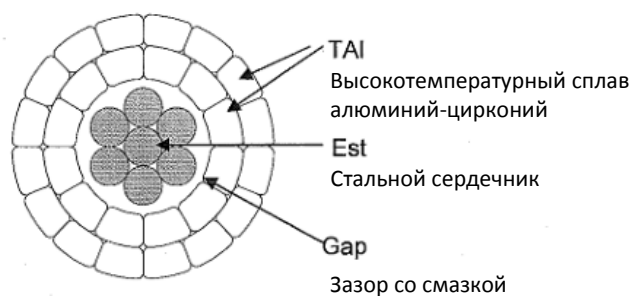


Рис. 5. Структура провода GTACSR компании «J-Power», Япония

Провода J-Power аттестованы межведомственной комиссией ОАО «ФСК ЕЭС».

Недостатки: сложная конструкция провода, сложная технология монтажа провода, необходимость специального оборудования, обучение персонала, сложный ремонт провода, высокая стоимость провода за километр: ~ 400 % в сравнении с проводом АС [1; 2].

2. Провода ACCR компании «ЗМ», США

Конструкция и свойства, которыми обладает данный провод, дает возможность осуществлять передачу электрической энергии мощностью в 2–3 раза больше, чем обычные провода.

Преимущества:

- значительно повышает механические и прочностные характеристики линий электропередач;
- без существенных реконструкций и модернизаций инфраструктуры возможно повысить пропускную способность ЛЭП в разы.

ACCR соответствуют абсолютно всем современным требованиям, предъявляемым к высоковольтным проводам:

- обладают максимально высокой электропроводностью (в 4 раза выше, чем у стали);
- отличаются легкостью (только на 20 % тяжелее чистого алюминия) и высокой механической прочностью;
- устойчивы к температуре до 210 °С и до 240 °С в аварийных режимах работы (материал внешних повивов – температуроустойчивый сплав алюминия-циркония);
- устойчивы к ветровому и гололедному воздействию, а также старению в течение всего срока службы;
- обладают малой стрелой провеса (особенно важно для протяженных пространств – горных ущелий, прибрежных районов).

Особенности: стальной сердечник отсутствует; максимальная температура – 210 °С; высокая коррозионная стойкость [5].



Рис. 6. Структура провода ACCR компании «ЗМ», США

3. Провода TACSR/ACS и (Z)TACSR/HICIN компании «Lumpi-Berndorf», Австрия

Увеличение пропускной способности проводов TACSR/ACS и (Z)TACSR/HICIN обеспечивается их большей рабочей температурой. Эти провода устойчивы к высокой температуре, могут в нормальных условиях продолжительное время нести более высокую токовую нагрузку, чем традиционные сталеалюминевые провода.

Конструктивные особенности:

Провода по конструкции напоминают классические провода АС: стальной сердечник и токопроводящие повивы (рис. 7). В проводах Lumpi-Berndorf в качестве материала для сердечника применяется сталь с алюминиевым покрытием. Для повышения прочностных свойств и уменьшения стрел провеса в проводах (Z)TACSR/HICIN вместо простой стали применяется специальный сплав «Инвар».

Даже по сравнению с проводом АС при увеличении пропускной способности в полтора раза высокотемпературные провода имеют меньший диаметр, что также позволяет либо снизить нагрузку на опоры, либо увеличить пролеты линии. Провода TACSR/ACS и (Z)TACSR/HICIN по конструкции не отличаются от классических проводов.

Еще одной особенностью провода TACSR/ACS Lumpi-Berndorf является его невысокая стоимость – 270 % от стоимости АС за км. Провода Lumpi-Berndorf аттестованы межведомственной комиссией ОАО «ФСК ЕЭС».

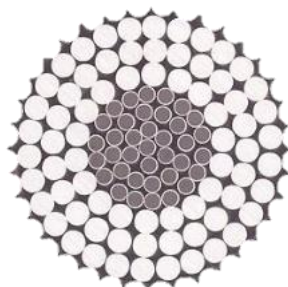
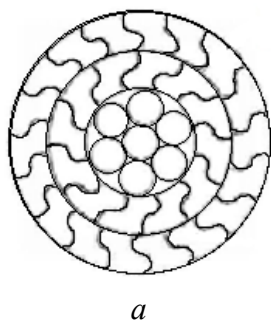


Рис. 7. Структура провода TACSR/ACS “Lumpi-Berndorf”, Австрия

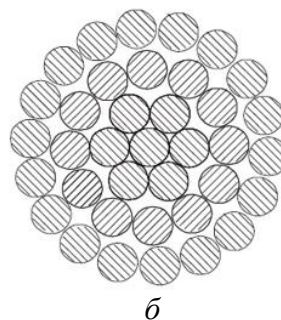
4. Провода AERO-Z компании «Nexans», Бельгия

Конструктивные особенности:

Одним из путей решения проблемы повышения пропускной способности является применение так называемых компактных проводов типа AERO-Z (рис. 8). Преимущества ВЛ с высокотемпературными проводами отражены в табл. 1.



а



б

Рис. 8. Поперечное сечение проводов:
а – AERO-Z; б – провод АС

Таблица 1

Преимущества ВЛ с высокотемпературными проводами

Преимущества	Чем обусловлены
Сечение проволок напоминает букву «Z» (рис. 8а)	Более компактная конструкция при том же диаметре имеет большее сечение алюминия.
Относительно большая контактная поверхность между двумя Z-образными проволоками одного слоя	Эффективную защита от просачивания консистентной смазки изнутри провода.
Обрыв проволоки внешнего повива провода	Остается на месте до тех пор, пока не произойдет обрыв пяти смежных проволок.
Увеличенное самозатухание провода	Уменьшает проблемы пляски, если она возникает, её амплитуда будет значительно меньше.
Повышенная крутильная жесткость	Хорошо противостоит снегу и обледенению.

Недостатки:

Стоимость за километр провода AERO-Z примерно в шесть раз выше по сравнению с проводом АС. В проводе AERO-Z не допускается длительного повышения температур выше 80 °С [1].

5. Провода АСПТ АТ1/20SA компании ООО «ЭМ–Кабель», Россия.

Новый завод, специализирующийся на изготовлении высокотемпературных проводов марки АСПТ (рис. 9), грозозащитных коррозионностойких тросов марки ГТК, самонесущих изолированных проводов марки СИП, силовых кабелей с пластмассовой изоляцией на рабочее напряжение 0,6, 1 и 3 кВ, в том числе огнестойких, не распространяющих горение, с низким дымо- и газовыделением.

Провод АСПТ имеет значительные преимущества по сравнению с обычными проводами АС:

- обычный алюминий при температуре 90 °С отжигается и резко теряет прочность, сплав Al-Zr сохраняет свои свойства до 150 °С, с пиковыми нагрузками до 180 °С.
- повышение пропускной способности ЛЭП при том же сечении фазных проводов в 2 раза;
- практически полное отсутствие внешней коррозии стали сердечника;
- облегчается процесс плавки гололеда;
- небольшие стрелы провеса.

Виды проводов АСПТ: Марка АСПТк (компактированный); Марка АСПТз (с зазором) [6].



Рис. 9. Структура провода марки АСПТ

Сравнение проводов

Необходимо направить внимание на то, что сравнение проводов является непростой задачей, потому что существенных параметров у этих проводов несколько. Если сравнение по одному параметру показывает бесспорное преимущество одного провода, то сравнение по другим характеристикам может показать противоположный результат. Следует подобрать наиболее критические параметры и согласно им производить оценку целесообразности применения того или иного типа провода в определенной ситуации.

Затраты на приобретение проводов с повышенной пропускной способностью весьма быстро окупаются при его эксплуатации.

Преимущества, которые дает применение проводов с повышенной пропускной способностью по сравнению со стандартными неизолированными линиями:

- повышенная надежность в зонах снегопадов, гололедообразования и тяжёлых ветровых районах;
- высокая механическая прочность жил и, соответственно, меньшая вероятность их обрыва;
- отсутствие внутренней коррозии проводов;
- самодемпфирование;
- небольшие стрелы провеса повышают механическую прочность жил;
- облегчается процесс плавки гололеда, что приводит к более высокой плотности тока, следовательно, становится более высокая температура провода;
- повышение пропускной способности ЛЭП при том же сечении фазных проводов в 1,5–2,5 раза, в связи с этим увеличивается рабочая температура, если при одинаковом сечении более низкое сопротивление.

Но также нужно отметить и основные недостатки проводов с повышенной пропускной способностью:

- стоимость ВЛ намного дороже стоимости воздушной линии с голым проводом в 1,5–2 раза;
- более высокие требования к защитной аппаратуре;
- сложность монтажа при низких температурах.

В табл. 2 приведено технико-экономическое сравнение семи разных проводов для проекта ВЛ 220 кВ. Самые жесткие требования предъявлялись по стреле провеса, массе, максимальной токовой пропускной способности (МТПС) и стоимости. Сравнение выполнено для пролета длиной 360 м при условии достижения максимально допустимого по ПУЭ-7 натяжения провода – 45 % от разрывного усилия, но не превышая уровень 42,5 кН.

Таблица 2

Технико-экономическое сравнение семи разных проводов для проекта ВЛ

Характеристика провода	Компания – производитель						
	Российские производители			Lumpi-Berndorf	Lumpi-Berndorf	J-Power Systems	Nexans
Марка	АС 240/39	АС 300/56	АС 400/22	TACSR/HACIN 212/49	TACSR/ACS 212/49	GTACSR 217/49	366-2Z
Диаметр, мм	1,6	4,2	6,6	1	1	0,3	3,1
Масса, кг/км	952	1257	1261	939	914	1015	1014
МТПС, А	480	600	830	861	871	840	732
Стоимость, евро/м	1735 (76 %)	2291 (100 %)	2300 (100 %)	10500 (450 %)	6200 (270 %)	10500 (450 %)	13700 (600 %)
Стрела при T = max, м	10,1	11,05	12,3	10,5	11,6	9,1	9,9

Исходя из анализа данных таблицы, провода Lumpi-Berndorf типа TACSR/HACIN имеют неоспоримое преимущество по стреле провеса, а TACSR/ACS дают существенное увеличение токовой пропускной способности при низком весе и невысокой цене.

Пропускная способность ВЛ за счет применения компактных или высокотемпературных проводов может возрастать от нескольких десятков до нескольких сот процентов по отношению к проводам АС (ACSR). Опыт применения проводов повышенной пропускной способности в Европе, Японии и Америке уже насчитывает более двух десятков лет. В 2008 г. некоторые производители проводов повышенной пропускной способности вышли на российский рынок. В настоящее время представлен широкий спектр проводов нового поколения, что позволяет более эффективно решать задачи оптимизации конструкции линий. Однако в связи с тем, что конструкция и работа проводов отличаются от классических, потребуются изменение расчетных программ для проектирования линий, а также изменение подхода к оптимизации [2].

Литература

1. Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Петрова Е. В. Применение численных методов расчета тепловых полей для вычисления потерь энергии в электрических сетях с учетом температуры проводников // Омск. науч. вестн. 2008. № 1 (64). С. 84–86.
2. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений. URL: <http://www.essp.ru/upload/iblock/f5c/f5c5d85e7c8f2706dbdc373aa95e482f.pdf> (дата обращения: 20.04.2016).
3. Русский кабель // Энергетика. Электротехника. Связь. URL: <http://www.ruscable.ru/> (дата обращения: 20.04.2016).

4. Русский кабель. Оптимизация воздушных линий электропередачи через повышение эффективности. URL: http://www.ruscable.ru/article/Optimizaciya_vozdushnyx_linij_elektroperedachi/ (дата обращения: 20.04.2016).

5. Увеличение пропускной способности сети электрической, ЛЭП. URL: http://solutions.3mruussia.ru/wps/portal/3M/ru_RU/EMD_ACCR/ACCR_Home/ProductBenefits/MoreAmps/ (дата обращения: 20.04.2016).

6. Эм-Кабель. Высокотемпературный провод. URL: <http://www.emcable.ru/vysokotemperaturny-provod> (дата обращения: 20.04.2016).

УДК 628.97:621.32:644.3

*Мальцева Л. А.
Maltseva L. A.*

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАМП ОСВЕЩЕНИЯ В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ

USAGE EFFICIENCY ECONOMIC CALCULATION OF LIGHT BULBS IN RESIDENTIAL AREA WITHIN STATE PROGRAM PERFORMANCE

В статье обращается внимание на инновационные решения при выборе ламп для освещения жилых и производственных помещений, которые уменьшают потребление энергии и воздействие на окружающую среду, в связи с реализацией Государственной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года». Основная задача этой программы – снижение энергопотребления и модернизация систем энергосбережения. Изготовлен демонстрационно-измерительный стенд, проведены замеры потребляемой энергии и освещенности ламп освещения, представлены экономические расчеты потребляемой энергии, приведены обоснования целесообразности использования светодиодных ламп с экономической и экологической точки зрения. Освещен вопрос о реализации проекта по переработке ртутьсодержащих отходов в ХМАО – Югре и г. п. Федоровский.

Ключевые слова: экономия, эффективность, светодиодное освещение, экология.

Главными условиями новых источников света являются низкое энергопотребление и более высокая световая отдача, долговечность и безопасность. Для решения проблемы были исследованы наиболее распространенные в быту осветительные лампы, их преимущества и недостатки с учетом влияния на здоровье людей, и проведен экономический расчет целесообразности использования ламп исходя из затраченной энергии и мощности.

Проведенные расчеты и обоснования перехода на светодиодные лампы могут быть применены для использования в квартирах, образовательных учреждениях, офисах или производственных помещениях. В статье освещен вопрос по реализации в Югре уникального проекта по переработке ртутьсодержащих отходов, вопрос пункта сбора и утилизации ртутьсодержащих ламп в г. п. Федоровский.

Решение вопроса выбора ламп для освещения жилых и производственных помещений уменьшает потребление энергии и воздействие на окружающую среду. Постоянно растущие потребности человечества в освещении требуют увеличения производства электроэнергии. Сохранение окружающей среды заставляет людей искать новые способы экономии энергии. В России энергетическая проблема актуальна особенно. Без освещения не обходится ни один день. Освещение влияет на ощущение пространства, формы, цвета. Также свет воздействует на многие процессы жизнедеятельности. Причина многих недугов, ухуд-

шения зрения и общего состояния здоровья – некачественное освещение. Поэтому выбор подходящего источника света очень важен для каждого.

За последнее десятилетие технология освещения светодиодными источниками активно внедряется и используется в повседневной жизни. Применение светодиодного освещения, или как его называют управляемый «умный свет», перспективен в ряде областей:

- агротехника: условия освещения (стимулировать рост растений);
- повышать урожайность, скорость созревания плодов;
- повышать устойчивость к заболеваниям;
- музейное освещение (цветовая палитра живописи, предотвращение повреждений экспонатов ИК и УФ излучениями);
- использование управляемых полноцветных (RGB) светодиодных искусственных источников света в медицине: диагностика, эндоскопия, освещение операционных и «ювелирных» хирургических операций;
- подсветка архитектурных сооружений, вывесок на магазинах;
- использование подсветок, встроенных в мебель (кухни, гостиные);
- светофор, алфавитно-цифровое табло и дисплеи, пешеходные переходы, гирлянды и др.

Расчет экономической эффективности светодиодных, энергосберегающих люминесцентных ламп по сравнению с обычными лампами накаливания. Проведем измерения, учитывая анализ характеристик наиболее распространенных видов ламп домашнего освещения.

Цель эксперимента: определить, использование каких ламп при освещении жилого помещения наиболее целесообразно с экономической точки зрения.

Для этого был изготовлен демонстрационно-измерительный стенд (рис.1), при помощи которого можно наблюдать свечение ламп, а также произвести замер потребляемой энергии и освещенность исследуемых ламп и помещения.



Рис. 1. Демонстрационно-измерительный стенд

Сравнивая полученные результаты, видим, что:

1. Самая недорогая лампа – обычная лампа накаливания.
2. Наилучшая световая эффективность у светодиодных ламп.
3. Наибольший срок эксплуатации так же у светодиодных ламп.

Для расчета экономической эффективности рассмотрим в качестве примера типовую однокомнатную квартиру с высотой потолков 2,7 м.

1. Определим стоимость потребляемой электроэнергии за 1 ч работы исследуемых ламп путем умножения тарифа за 1 кВт/ч (для нашего региона тариф составляет 1,71 руб/кВт·ч) на потребляемую мощность лампы и на общее количество ламп в квартире.

$$\begin{aligned} \text{Стоимость потребленной электроэнергии} &= \text{тариф} \cdot \text{работу} \cdot \text{количество ламп} = \\ &= \text{тариф} \cdot \text{мощность} \cdot \text{время} \cdot \text{количество ламп} \end{aligned}$$

$$C_{\text{лампы накалив.}} = ((1.71 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} \cdot 0.04 \text{ кВт} \cdot 1 \text{ ч})7 \text{ шт} + (1.71 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} \cdot 0.06 \text{ кВт} \cdot 1 \text{ ч}) 9 \text{ шт} = \\ = (0.06840 \text{ руб} \cdot 7 \text{ шт}) + (0,10260 \text{ руб} \cdot 9 \text{ шт}) = 0.4788 \text{ руб.} + 0.9234 \text{ руб.} = 1.4022 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{свет. лампа}} = 1.71 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} \cdot 0.007 \text{ кВт} \cdot 1 \text{ ч} \cdot 16 \text{ шт} = 0.01197 \text{ руб.} \cdot 16 \text{ шт} = 0.19152 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{люмин. лампа}} = 1.71 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} \cdot 0.011 \text{ кВт} \cdot 1 \text{ ч} \cdot 16 \text{ шт} = 0.01881 \text{ руб.} \cdot 16 \text{ шт.} = 0,30096 \text{ руб.}$$

2. Определим затраты на использование ламп, для этого разделим цену приобретения лампы на срок ее эксплуатации и умножим на количество ламп в квартире (16 шт.)

Затраты на использование ламп = цена/срок службы · количество ламп

$$C_{\text{лампы накл.}} = 35 \text{ руб./1000 ч} \cdot 16 \text{ шт.} = 0.56 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{свет. лампы}} = 200 \text{ руб./32000 ч} \cdot 16 \text{ шт.} = 0.1 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{люминесц. лампы}} = 180 \text{ руб./12000 ч} \cdot 16 \text{ шт.} = 0.24 \text{ руб.}$$

3. Исходя из максимального срока эксплуатации, равному у светодиодной лампы 32 000 ч, рассчитаем общие затраты при использовании с расходом за потребленную электроэнергию и расходами на приобретение ламп.

Общие расходы на 32 000 ч эксплуатации

$$\text{Суммарное потребление}_{\text{лампы накл.}} = (0.56 \text{ руб.} + 1.40220 \text{ руб.})32000 \text{ ч} = 62\,790.40 \text{ руб.}$$

$$\text{Суммарное потребление}_{\text{светод. лампы}} = (0.1 \text{ руб.} + 0,19152 \text{ руб.})32000 \text{ ч} = 9\,328.64 \text{ руб.}$$

$$\text{Суммарное потребление}_{\text{люминесц. лампы}} = (0.24 \text{ руб.} + 0,30096 \text{ руб.})32000 \text{ ч} = 17\,310.72 \text{ руб.}$$

Из проделанных расчетов видно, что при использовании светодиодных ламп вместо обычных ламп накаливания мы:

- сокращаем расходы на освещение квартиры в $(62\,790,4/17\,310,72) = 3,63$ раза;
- применение светодиодных ламп даст экономию в $(62\,790,4/9\,328,64) = 6,73$ раз;
- замена энергосберегающих люминесцентных ламп на светодиодные сократит затраты на освещение в $(17\,310,72/9\,328,64) = 1,86$ раз.

Проект по переработке ртутьсодержащих отходов. В ХМАО – Югре запущен уникальный проект по переработке ртутьсодержащих отходов. В результате реализации проекта по переходу России на энергоэффективные источники освещения, начатой несколько лет назад, среди населения получили широкое распространение энергосберегающие люминесцентные лампы, которые, как известно, содержат пары ртути. С распространением данных осветительных приборов встал экологический вопрос: как избавляться от таких ламп? Инфраструктура по утилизации ртутных отходов в стране фактически отсутствует, но в Югре данный вопрос, по проанализированной мною информации, решен полностью.

Если говорить о ХМАО – Югре, то в Сургуте 9 августа 2011 г. администрацией города было издано постановление № 5146 «О порядке организации обращения с ртутьсодержащими отходами на территории города Сургута». В 2012 г. здесь же важным прецедентом стало постановление суда Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, которым на администрацию города Сургута была возложена обязанность по организации схемы обращения с ртутьсодержащими отходами, подразумевающей создание пунктов сбора таких отходов от населения и обеспечение их передачи на утилизацию специализированной организации.

Главной проблемой организации такой схемы было отсутствие в Сургуте, и в целом в ХМАО – Югре, организаций, готовых обеспечить утилизацию ртутьсодержащих ламп в соответствии со всеми предъявляемыми к этой деятельности требованиями. Видя острую потребность Ханты-Мансийского автономного округа в организации схемы по обращению с ртутьсодержащими отходами, общественная организация «Эконадзор» запустила в городе Сургуте уникальный проект по утилизации энергосберегающих ламп. Много времени занял выбор оборудования, при помощи которого предстояло производить обезвреживание ртутных ламп. Организацией приобретена установка ЭКОТРОМ-2У, производство которой осуществляется в г. Абнине Краснодарского края. При компактных размерах она обладает довольно высокой производительностью – до 900 ламп в час. Фактически опытный оператор с учетом времени, затрачиваемого на подготовку к работе, может ежечасно обезвреживать порядка 400 ламп. Применяемая в установке технология утилизации ламп является практически безотходной.

В результате, в соответствии с техническими условиями, образуется продукт минерализации люминофора, который абсолютно безопасен для окружающей среды и может при-

меняться в качестве инертного материала в строительных смесях. Еще одним преимуществом установки ЭКОТРОМ-2У является её универсальность: она позволяет обезвреживать лампы разных типов и размеров, таким образом, представляя собой оптимальное решение.

Важно, что ЭКОТРОМ-2У – единственная из представленных на рынке технологическая установка, которая имеет необходимую разрешительную документацию, включая положительное заключение государственной экологической экспертизы на технологию.



Рис. 2. Свалка с люминесцентными лампами

В настоящее время проект по переработке ламп уже запущен и активно развивается, «Эконадзор» заключает договоры с предприятиями и управляющими компаниями. Как показала практика, работа с предприятиями, которые сдают на обезвреживание собственные лампы, выстраивается достаточно просто, а вот управляющие компании сталкиваются с некоторыми проблемами в части организации сбора ртутьсодержащих ламп от населения. Общественники предлагают коммунальщикам осуществлять сбор ламп при помощи так называемых экокбксов, специально оборудованных металлических антивандальных контейнеров. Работу по демеркуризации ртутьсодержащих ламп общественники осуществляют в специализированном цехе на муниципальном полигоне ТБО города Сургута, где для этого были организованы все необходимые экологические, технические и санитарные условия. По словам руководителя проекта, директора ООО «Эконадзор» Ивана Неривенько, производительность технологической установки в настоящее время позволят покрыть потребность в утилизации ртутьсодержащих ламп не только города Сургута, но и всего округа. Вопрос остается и по сей день очень актуальным, так как сотрудники отдела каждый год после схода снега обнаруживают в лесных массивах огромное количество выброшенных ламп. Подрядчик забирает лампы и увозит их, а поскольку дальнейшую судьбу ламп никто не отслеживает, нет ничего удивительного в том, что они не доезжают до пункта назначения, а остаются в ближайшем лесу. Свалку с люминесцентными лампами обнаружили инспекторы Природнадзора Югры 28 сентября 2015 г. в ходе патрулирования леса (рис. 2): 290 штук, 5 навалов.

Безнаказанность влечет рост правонарушений в сфере экологии и создает условия для совершения уголовно-наказуемых деяний, поэтому вопрос стоит очень остро с точки зрения экологии. На основании постановления от 25 сентября 2015 г. № 472-п/нпа «Об организации сбора и определении места первичного сбора и размещения отработанных ртутьсодержащих ламп на территории городского поселения Федоровский» рассмотрела вопрос о реализации проекта в г. п. Федоровский. На территории базы МУП «Федоровское ЖКХ» по адресу ул. Пионерная, 34 А определено место первичного сбора и размещения отработанных ртутьсодержащих ламп. Договор заключен с компанией ООО «Эконадзор», оказывающей услугу по утилизации ламп.

Есть способы сбережения окружающей среды и природных ресурсов. Они не такие сложные, как альтернативные электростанции. Например, замена всех ламп накаливания на светодиодные лампы. При использовании светодиодных ламп вносится большой вклад в

энергосбережение и экологическую безопасность страны. В условиях регулярного роста тарифов на электроэнергию светодиодные лампы могут позволить добиться существенной экономии.

Литература

1. Абрашкина М. Л., Рожкова Т. А., Терешкин А. И. Стандартизация – один из путей прогресса в области светодиодных источников света // Светотехника. 2012. № 4. С. 19–22.
2. Алфёров В. Ю., Митрохин Ю. В. Внедрение полупроводниковых инноваций в ОАО «РЖД» // Светотехника. 2009. № 5. С. 9–12.
3. Давиденко Ю. А., Высокоэффективные современные светодиоды // Современная электроника. 2004. № 1. С. 36–43.
4. Коган Л. М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов / под ред. Ю. Б. Айзенберга. М., 2001. 47 с. (Новости Светотехники / Дом света. Вып. 7–8).

УДК 621.395.623.43.083.7

Уразалиев И. Б.
Urazaliev I. B.

ДИАГНОСТИКА КОНДЕНСАТОРОВ СВЯЗИ 110 КВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ (ОБМЕН ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОПЫТОМ)

DIAGNOSIS OF COUPLING CAPACITORS 110 KV DURING OPERATION (EXCHANGE OF WORK EXPERIENCE)

В статье рассмотрен вопрос оценки состояния конденсаторов связи в процессе эксплуатации по результатам диагностики. Представлены результаты тепловизионного обследования с выявленными явно выраженными локальными и неравномерными нагревами на фарфоровой крышке конденсаторов связи. Проведены высоковольтные испытания и измерения данных конденсаторов, а также физико-химический и хроматографический анализ конденсаторного масла. В целях подтверждения обнаруженных дефектов выполнено вскрытие КС и осмотр их составных частей. Сделан вывод о времени развития дефекта в представленных КС на напряжение 110 кВ. По результатам проведённой работы, в качестве эксперимента для выявления дефектов КС на ранней стадии, даны рекомендации по рассмотрению изменений действующей периодичности выполнения тепловизионной диагностики.

Ключевые слова: тангенс угла диэлектрических потерь, ёмкость, конденсатор связи.

В процессе эксплуатации конденсаторов связи 110 кВ в филиале АО «Тюменьэнерго» Сургутские электрические сети за последние годы участились случаи повреждения конденсаторов с разрушением фарфоровых корпусов, связанные с внутренними дефектами. Взрыв колонны происходит после пробоя всех секций, когда фаза оказывается закороченной на землю через пробитые конденсаторы. Протекание тока короткого замыкания приводит к выделению в конденсаторах значительного количества энергии, что и приводит к их разрушению.

Помимо этого, при плановых испытаниях имеют место случаи, когда контролируемые параметры, такие как ёмкость конденсатора C_x и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, не удовлетворяют существующим нормам.

Тепловизионное обследование конденсатора связи 110 кВ на подстанции «Геолог».
Тепловизионная диагностика входит в общую систему технического контроля электрообору-

дования распределительных устройств, регламентированную нормами [1, с. 241]. В нашем филиале в соответствии с годовыми планами выполнения работ проводится данная диагностика электрооборудования. Она основана на том, что наличие некоторых видов дефектов высоковольтного оборудования вызывает изменение температуры дефектных элементов и, как следствие, изменения интенсивности инфракрасного излучения, которое может быть зарегистрировано тепловизионным прибором.

В феврале 2013 г. проведено внеплановое тепловизионное обследование оборудования подстанции 110/10/10 кВ «Геолог». При осмотре конденсатора связи воздушной линии 110 кВ – «Победа» фазы «С» типа СМПВ-110/ $\sqrt{3}$ -6,4ХЛ1 производства ТОО «Усть-Каменогорского конденсаторного завода» (республика Казахстан) – был обнаружен явно выраженный локальный нагрев на фарфоровой крышке между 10 и 11 рёбрами (рис. 1, крайняя справа). В связи с чем, данная воздушной линии была выведена в ремонт и данный конденсатор заменён.

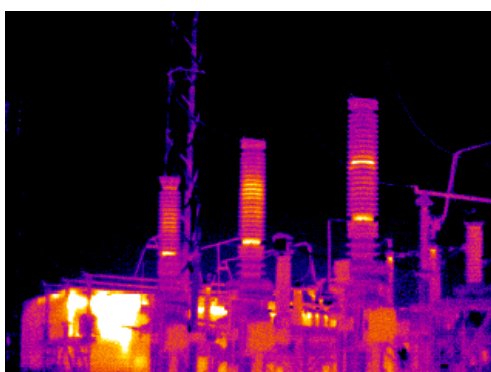


Рис. 1. Термограмма ПС Геолог КС-110 «Победа»

Единичные случаи браковки конденсаторов связи связаны с частичным пробоем секции пакета, что будет наблюдаться по локальному нагреву на фарфоровой крышке, а также при полном пробое одной или несколько секций пакета [2, с. 86].

При выявлении локального или общего нагрева конденсатора необходимо:

- провести пофазное сравнение температур конденсаторов и характер их распределения по периметру и высоте;
- рекомендовать произвести дополнительное измерение ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

При тепловизионном контроле конденсаторов оценка их состояния помимо указанных выше, должна учитывать следующие факторы:

1. Характер тепловыделения в конденсаторе. При локальном тепловыделении его источник определяется и анализируется построением вертикального термопрофиля, измерение ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

2. Характер распределения превышения температур по высоте элемента конденсатора. Анализируется закономерность изменения температур с течением времени, значений ёмкости элементов и т. п.

Следует отметить, что во время обработки термограммы при построении вертикального термопрофиля по высоте конденсатора, температура в зоне локального нагрева составила 9 °С, а избыточная температура, т. е. превышение измеренной температуры конденсатора фазы «С» над температурой других фаз, находящихся в одинаковых условиях, – 2,1 °С (рис. 1).

Предыдущее тепловизионное обследование данного оборудования было проведено в июле 2012 г., замечаний по результатам тепловизионного осмотра не было. Избыточная температура составляла 0,5 °С.

После демонтажа конденсатор связи был доставлен в производственную лабораторию службы изоляции и защиты от перенапряжений для проведения высоковольтных испытаний.

Первые измерения были проведены на собранном конденсаторе, после чего конденсатор связи разобрали (сняли фарфоровую крышку) и провели повторные измерения значений ёмкости и тангенса дельта (табл. 1).

Таблица 1

Результаты высоковольтных испытаний конденсатора связи фазы «С»

t, °C	U, кВ	tgδ, %	C _{изм.} , нФ	C _{зав.} , нФ	Отличие C _{изм.} от C _{зав.} , %
В собранном виде					
7 (21)	5	0,0287 (0,0285)	7,39 (7,36)	–	–
	10	0,0239 (0,0251)	7,39 (7,36)	–	–
	20	0,0172 (0,0223)	7,39 (7,36)	–	–
	30	0,0148 (0,0243)	7,39 (7,36)	–	–
	40	0,0132 (0,0252)	7,39 (7,36)	–	–
	50	0,0125 (0,0249)	7,39 (7,36)	–	–

Примечание: без скобок приведены данные, измеренные на собранном конденсаторе; в скобках – в разобранном виде (без крышки).

Из представленной таблицы видно, что отклонение измеренного значения ёмкости C_{изм} конденсатора от емкости, измеренной на заводе C_{зав.}, составило 15 %, что превышает допустимые значения ± 5 % [1, с. 121], [3, с. 20].

В соответствии с нормативной документацией данный конденсатор был снят с эксплуатации.

Конденсатор связи состоит из четырёх пакетов, с последовательным соединением секций, поочередно уложенных друг на друга. Пакет включает в себя плоскопрессованные секции, пропитанные минеральным конденсаторным маслом.

В диэлектрической системе конденсатора связи используется:

- полипропиленовая конденсаторная плёнка в качестве твёрдого диэлектрика;
- минеральное конденсаторное масло в качестве жидкого диэлектрика.

При рассоединении пакетов обнаружен явно выраженный след пробоя (выгорания) между обкладками внутри первой секции третьего пакета, ориентировочное место на фарфоровой крышке между 10 и 11 рёбрами (рис. 2).

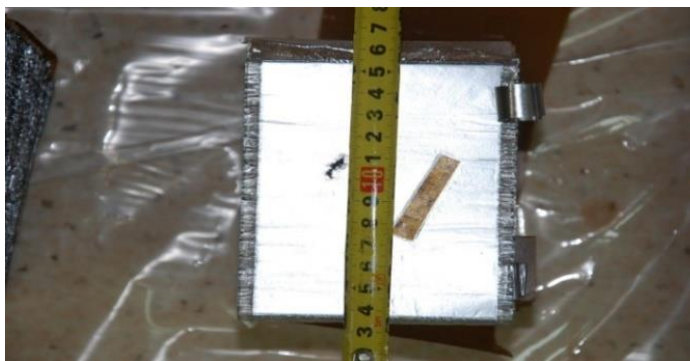


Рис. 2. Разобранный КС-110 (след пробоя на первой секции третьего пакета)

После разматывания первой секции наблюдается пробой (выгорание) на протяжении нескольких обкладок (рис. 3).



Рис. 3. Следы пробоя между обкладками первой секции третьего пакета

Твёрдый диэлектрик, в данном случае полипропиленовая пленка, находясь в электрическом поле, может потерять изоляционные свойства, если напряжённость поля превысит некоторое критическое значение. Явление образования проводящего канала в диэлектрике под действием электрического поля называется пробоем. Пробой в диэлектрике может возникнуть в результате электрических, тепловых или электромеханических процессов, обусловленных действием электрического поля.

1. Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепловой энергии, выделяющейся в диэлектрике за счёт диэлектрических потерь, превышает то количество энергии, которое может рассеиваться в данных условиях, при этом нарушается тепловое равновесие.

Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих расплавлению, обугливанию. Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды и др. Кроме того, электротепловое пробивное напряжение зависит от нагревостойкости материала. Одним из признаков теплового пробоя является снижение электрической прочности с увеличением времени выдержки диэлектрика в электрическом поле.

2. Электромеханическая деформация имеет локальный характер и развивается там, где имеется высокая локальная напряжённость поля. Такая высокая напряжённость поля будет иметь место в участках расположения неоднородности структуры полипропиленовой пленки. Именно в месте расположения неоднородности может произойти продавливание с образованием углубления.

Электродные поверхности также не являются идеально гладкими и содержат различные неровности (углубления, бугорки), которые искажают электрическое поле в диэлектрике. Также на поверхности диэлектрической плёнки могут возникнуть трещины за счёт механических напряжений.

В данном случае мы наблюдаем тепловой пробой обкладок первой секции третьего пакета.

Диагностика конденсатора связи 110 кВ на подстанции «Олимпийская». В декабре 2014 г. проведен внеплановый тепловизионный осмотр оборудования подстанции 110/10/10 кВ «Олимпийская». При осмотре конденсатора связи воздушной линии 110 кВ – «Победа» фазы «В» типа СМПВ-110/ $\sqrt{3}$ -6,4ХЛ1 производства ОАО Серпуховского конденсаторного завода «КВАР» (г. Серпухов) – был обнаружен явно выраженный локальный нагрев на фарфоровой крышке между 6 и 7 рёбрами (рис. 4, в центре). В связи с чем данная воздушная линия 110 кВ была выведена в ремонт и данный конденсатор заменён.

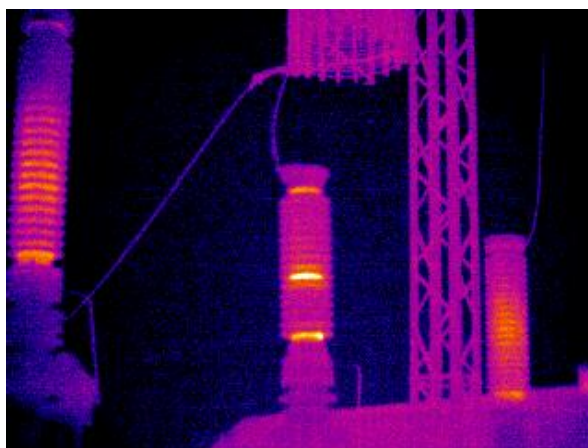


Рис. 4. Термограммы ПС Олимпийская КС-110 «Победа» ф. «В»

Следует отметить, что при построении вертикального термопрофиля по высоте конденсатора, температура в зоне локального нагрева составила $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а избыточная температура, т. е. превышение измеренной температуры конденсаторы фазы «С» над температурой других фаз, находящихся в одинаковых условиях, $-3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4).

Предыдущее тепловизионное обследование данного оборудования было проведено в мае 2014 года, замечаний по результатам тепловизионного осмотра не было. Избыточная температура составляла $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По данному факту было направлено письмо заводу-изготовителю с просьбой дать рекомендации по дальнейшей эксплуатации и объяснить причины развивающихся дефектов для исключения подобных инцидентов. На наш запрос завод рекомендовал на основании представленных нами материалов (термограммы, протокол высоковольтных испытаний) демонтировать и заменить указанный конденсатор связи воздушной линии 110 кВ – «Победа» фазу «В».

Также следует упомянуть, что ранее, в сентябре 2014 г., были проведены плановые испытания конденсаторов связи всех трёх фаз, установленных на данной воздушной линии (все конденсаторы принадлежат одной партии изготовления), результаты которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты высоковольтных испытаний конденсаторов связи
в сентябре 2014 года**

Фаза	t, °C	U, кВ	C _{изм.} , нФ	C _{зав.} , нФ	Отличие C _{изм.} от C _{зав.} %
А	10	10	10,15	6,24 (6,27)	62,6
В			6,27	6,22 (6,25)	0,8
С			6,75	6,24 (6,26)	8,1

Примечание: в скобках указаны значения ёмкости, измеренной при пусконаладочных испытаниях.

По результатам испытаний конденсаторов связи фаз «А» и «С» отклонение измеренных значений ёмкости C_{изм.} конденсаторов от ёмкости, измеренной на заводе C_{зав.}, превысило допустимые значения $\pm 5\%$ [1, с. 121], они были заменены.

После демонтажа конденсатор связи фазы «В» был доставлен в производственную лабораторию службы изоляции и защиты от перенапряжений для проведения высоковольтных испытаний.

Первые измерения были проведены на собранном конденсаторе, после чего конденсатор связи разобрали (сняли фарфоровую крышку) и провели повторные измерения значений ёмкости и тангенса дельта (табл. 3).

Таблица 3

Результаты высоковольтных испытаний конденсатора связи фазы «В»

t, °C	U, кВ	tgδ, %	tgδ _{зав.} , %	C _{изм.} , нФ	C _{зав.} , нФ	Отличие C _{изм.} от C _{зав.} , %
В собранном виде						
24	5	0,0044 (0,0044)	–	6,23	–	–
	10	0,0053 (0,0060)	0,007	6,23	6,22	0,19
	20	0,0083 (0,0130)	–	6,23	–	–
	30	0,0137 (0,0232)	–	6,23	–	–
	40	0,0190 (0,0289)	–	6,23	–	–
	50	0,0237 (0,0366)	–	6,23	–	–

Примечание: без скобок приведены данные, измеренные на собранном конденсаторе, а в скобках – в разобранном виде (без крышки).

Из полученных результатов видно, что контролируемые значения соответствуют допустимым показателям [1, с. 121].

Анализ результатов измерений указывает на изменение тангенса угла диэлектрических потерь от приложенного напряжения. То есть при повышении напряжения происходит увеличение тангенса дельта (5/8 раз). Явно видно, что величина напряжения, приложенного к конденсатору, оказывает существенное влияние на величину тангенса угла диэлектрических потерь.

При наличии в конденсаторе остаточного воздуха или вновь образованных газов между обкладками повышение напряжения вызывает возрастание тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора, обусловленное ионизацией воздушных или иных включений внутри диэлектрика или у края обкладки.

Можно предположить, что для органических диэлектриков (полипропиленовая конденсаторная плёнка) превышение рабочей напряжённости электрического поля над напряжённостью частичных разрядов может вызвать быстрое развитие ионизационных процессов и, как следствие, выхода из строя конденсатора не только за счёт возрастания температуры, но и за счёт непосредственного разрушения диэлектрика при воздействии на него частичных разрядов.

Из термограммы (рис. 4) виден локальный тепловой нагрев высокой температуры. Так как при вскрытии конденсатора связи на обкладках следов частичных разрядов, обугливания и т. д. не обнаружено, то возможно, что при снятии напряжения с конденсатора диэлектрические свойства диэлектриков восстановились в результате охлаждения полипропиленовой плёнки и конденсаторного масла.

Отобранное конденсаторное масло имело светло-желтый цвет. Провели физико-химический анализ масла и определили некоторые его показатели:

- тангенс угла диэлектрических потерь при температуре 100 °C и частоте 50 Гц составил 0,0015;

- пробивное напряжение при частоте 50 Гц и температуре 21 °C составило 50 кВ.

Полученные результаты соответствуют нормируемым значениям [4, с. 2].

Чтобы обеспечить компенсацию давления конденсаторного масла внутри конденсатора связи при колебаниях температуры окружающей среды, применяют расширители, представляющие собой набор мембранных коробок, которые укладываются над пакетом. Мембранные коробки изготавливают из двух стальных тарельчатых мембран, герметично сваренных между собой.

После вскрытия конденсатора обнаружены следы электрических разрядов («подгара») между нижней мембранной коробкой и металлической крышкой, установленной над первым пакетом (рис. 5).

В связи с тем, что мембранные коробки не имеют чёткой (фиксированной) электрической связи с высоковольтным выводом, образуется так называемый «плавающий» контакт.

То есть при колебаниях температуры окружающей среды происходит изменение давления масла внутри конденсатора связи, соответственно изменяется плотность соприкосновения как между мембранной коробкой относительно высоковольтного вывода, так и относительно верхней обкладки первого пакета. Вследствие чего и произошёл электрический разряд.



Рис. 5. След «подгара» между нижней мембранной коробкой и металлической крышкой

Следует также отметить, что мембранные коробки по всей высоте изолированы диэлектрическим кортом от токопроводящего поводка, который подсоединяется к верхней крышке и верхней обкладки первого пакета. Следы копоти (нагара) внутри фарфоровой покрывки отсутствуют.

Исходя из вышеизложенного, в данном конденсаторе выявлены: локальный нагрев на фарфоровой покрывке; увеличение тангенса угла диэлектрических потерь при повышении напряжения; следы электрических разрядов («подгара») между нижней мембранной коробкой и металлической крышкой.

Однозначно можно утверждать, что дефект – локальный нагрев на фарфоровой покрывке в конденсаторе связи, связанный с частичным пробоем секции пакета, – выявлен на ранней стадии, до частичного или полного пробоя одной или нескольких секций пакета.

Диагностика конденсатора связи 110 кВ на подстанции «Западная». В январе 2014 г. на подстанции 110/10/10 кВ «Западная» вследствие развития внутреннего дефекта разрушился конденсатор связи воздушной линии 110 кВ – «Сургут» фазы «С» типа СМПВ-110/ $\sqrt{3}$ -6,4ХЛ1 (2008 г.в.) производства ТОО «УККЗ».

В связи с чем на его место установили конденсатор типа СМП-110/ $\sqrt{3}$ -6,4ХЛ1 производства ТОО «УККЗ» 1996 г. выпуска. В ноябре 2015 г. при осмотре подстанции 110/10/10 кВ «Западная» оперативным персоналом было обращено внимание на отсутствие легкого снежного покрова на одном из двух конденсаторов – фазы «С». В результате чего было проведено внеплановое тепловизионное обследование оборудования подстанции. При осмотре указанного конденсатора связи было выявлено неравномерное распределение нагрева на фарфоровой покрывке (рис. 6). В связи с чем данная воздушная линия была выведена в ремонт и данный конденсатор заменён.

Следует отметить, что при построении вертикального термопрофиля по высоте конденсатора разность температур нагрева составила 8,5 °С, а избыточная температура – 11,4 °С (рис. 6).

Предыдущее плановое тепловизионное обследование данного конденсатора было проведено в августе 2015 г. При построении вертикального термопрофиля разность температур нагрева – 7,3 °С, а избыточная температура – 10 °С (рис. 6). После чего указанный конденсатор поставили на тепловизионный контроль.

По предоставленной термограмме (рис. 6) видно, что в верхней части фарфоровой крышки процесс нагревания происходит неравномерно по всей поверхности, имея так называемый «срез».

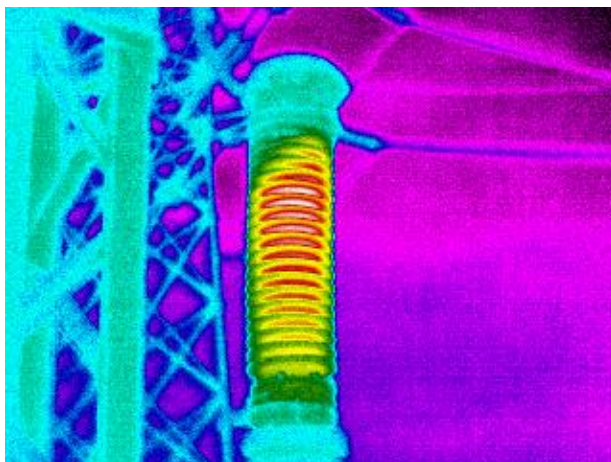


Рис. 6. Термограммы ПС Западная КС-110 «Сургут» ф. «С»

После демонтажа конденсатор связи фазы «С» был доставлен в производственную лабораторию для проведения комплекса диагностических процедур. Результаты высоковольтных испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты высоковольтных испытаний конденсатора связи фазы «С»

t, °С	U, кВ	tgδ, %	tgδ _{пред.} *, %	C _{изм.} , нФ	C _{паспорт.} , нФ	C _{сред.} *, нФ	Отличие C _{изм.} от, %	
							C _{паспорт.}	C _{сред.}
В собранном виде								
19	10	2,496	0,359	6,397	6,4	6,229	0,13	2,9

Примечание: «*» указаны значения предыдущих измерений (от 2014 г.)

Из полученных результатов видно, что измеренные значения тангенса угла диэлектрических потерь значительно выше допустимой нормы (0,8 %) [1, с. 121].

При вскрытии конденсатор оказался под избыточным давлением, во время снятия верхней крышки, являющейся электрическим выводом конденсатора, ощущался явно выраженный кислый запах конденсаторного масла.

При визуальном осмотре выявлено:

- уровень масла ниже допустимого начиная примерно с 18 мембранной коробки, скорее всего, в результате чего и происходит нагрев в верхней части конденсатора;
- после поднятия фарфоровой крышки обнаружены не затянутые гайки крепления самой конструкции (пакеты, стяжные диэлектрические рейки и т. д.) относительно нижней крышки (рис. 7), что, возможно, и указывает на неравномерный нагрев по поверхности крышки, имея так называемый «срез».



Рис. 7. Нижняя часть КС-110 Сургут ф. С

Для дальнейшего определения технического состояния конденсатора было отобрано конденсаторное масло.

Провели физико-химический анализ масла и определили некоторые его показатели:

1. Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре 100 °С и частоте 50 Гц составил 0,0201.

2. Пробивное напряжение при частоте 50 Гц и температуре 21 °С составило 46 кВ.

Полученные результаты не соответствуют нормируемым значениям [4, с. 2].

Провели хроматографический анализ растворённых в масле газов (табл. 5).

Таблица 5

Результаты хроматографического анализа конденсатора масла

Тип оборудования	ХАРГ						
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	CO ₂	CO
Норма для силового трансформатора	0,01	0,01	0,001	0,005	0,01	0,8	0,06
Результаты испытания	5,928	0,855	0,003	0,648	0,013	0,147	0,0169

Так как в соответствии с действующими нормами испытаний электрооборудования [1, с. 120] конденсаторное масло не подлежит хроматографическому анализу газов, растворённых в масле, то применительно оценка была проведена в соответствии с методическими указаниями для трансформаторного оборудования [5, с. 6].

С помощью хроматографического анализа можно обнаружить две группы дефектов: электрического и термического характера.

Дефекты электрического характера:

- водород (H₂) – частичные разряды, искровые и дуговые разряды;
- ацетилен (C₂H₂) – электрическая дуга, искрение.

Дефекты термического характера:

- метан (CH₄) – нагрев масла в диапазоне температур 400–600 °С;
- этан (C₂H₆) – нагрев масла в диапазоне температур 300–400 °С.

Из табл. 5 видно, что основными (ключевыми) газами, наиболее характерными для определённого вида дефекта, являются водород (H₂), метан (CH₄), этан (C₂H₆). Наличие в пробе масла упомянутых газов указывает на развитие повреждения внутри конденсатора. Исходя из полученных результатов наблюдается дефект термического и электрического характера, а именно: нагрев масла, частичные, искровые и дуговые разряды.

При анализе состава растворённых в масле газов для диагностики эксплуатационного состояния конденсатора связи необходимо учитывать условия их эксплуатации и факторы, вызывающие изменения этого состава газов.

С воздействием на конденсаторное масло разрядов высокого напряжения или дуги приходится встречаться, например, при работе масляных выключателей, а также в случае аварийных режимов, которые могут иметь место при эксплуатации маслonaполненного оборудования высокого напряжения (кратковременный пробой, более или менее длительное горение дуги и т. д.)

Электрическая дуга, возникающая в масле, представляет собой один из видов газового разряда. Она отличается высокой температурой, большой плотностью тока и сравнительно низким падением напряжения. При воздействии частичных разрядов на масло и пропитанные им изоляционные части в основном образуется водород, затем метан. Процесс термического разложения масла начинается с 300–400 °С, и скорость разложения возрастает по мере повышения температуры. То есть всякое повреждение или возникновение сильных местных перегревов вызывают выделение газа определённого состава.

Можно предположить, что в данном случае фактором, вызвавшим увеличение концентрации газов в масле, явились ослабленные болтовые соединения, вследствие чего произошёл нагрев масла и искровые разряды.

Исходя из вышеизложенного, в данном конденсаторе выявлены: неравномерное распределение нагрева на фарфоровой крышке; увеличение тангенса угла диэлектрических потерь выше допустимой нормы; низкий уровень масла; не затянутые гайки крепления самой конструкции; увеличение концентрации газов в масле; не соответствие нормируемым значениям результатов физико-химического анализа масла.

Диагностика конденсатора связи 110 кВ на подстанции «Чёрный мыс». В январе 2015 г. проведено внеплановое тепловизионное обследование оборудования подстанции 110/10/10 кВ «Чёрный мыс». При осмотре конденсатора связи воздушной линии 110 кВ – «Победа–2» фазы «А» типа СМПВ-110/ $\sqrt{3}$ -6,4ХЛ1 производства ОАО «КВАР» – был обнаружен явно выраженный локальный нагрев на фарфоровой крышке между 1 ребром и нижним фланцем (рис. 8). В связи с чем данная воздушной линии была выведена в ремонт и данный конденсатор заменён.

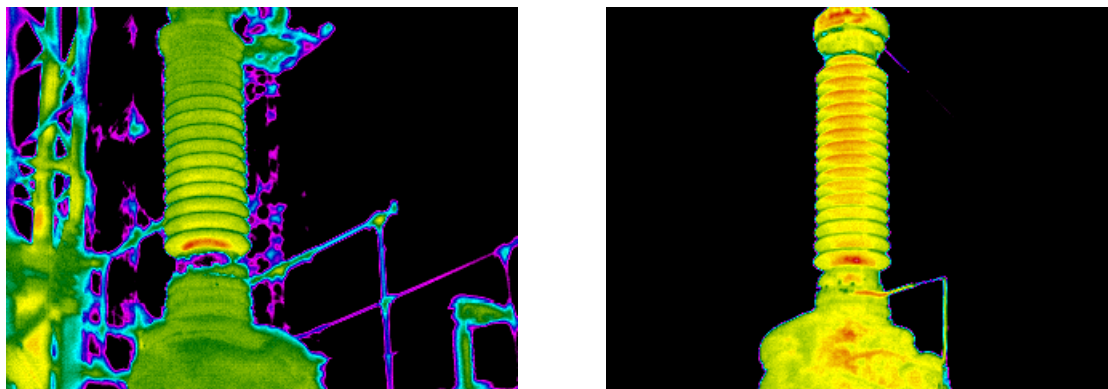


Рис. 8. Термограммы ПС Чёрный мыс КС-110 «Победа–2» ф. «А»

При построении вертикального термопрофиля по высоте конденсатора температура в зоне локального нагрева составила 23,1 °С, а разность температур по профилю (высоте) – 6,2 °С (рис. 6). На данной подстанции конденсатор связи установлен один, поэтому отсутствует возможность сравнения по избыточной температуре.

Предыдущее тепловизионное обследование данного конденсатора было проведено в сентябре 2015 г., замечаний по результатам тепловизионного осмотра не было. Разность температур по профилю – 0,9 °С.

После демонтажа конденсатор связи был доставлен в производственную лабораторию для выявления причины дефекта.

Результаты высоковольтных испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты высоковольтных испытаний конденсатора связи фазы «А»

t, °C	U, кВ	tgδ, %	tgδ _{пред} *, %	C _{изм} , нФ	C _{паспорт} , нФ	C _{пред} *, нФ	Отличие C _{изм.} от, %	
							C _{паспорт}	C _{пред.} *
В собранном виде								
17	10	0,006	0,0176	6,317	6,4	6,345	1,3	0,9

Примечание: «*» указаны значения предыдущих измерений при температуре 24 °С (протокол от 24.06.2015).

Из полученных результатов видно, что контролируемые значения соответствуют допустимым показателям [1, с. 121].

При вскрытии конденсатор оказался под давлением, во время снятия верхней крышки произошёл выброс конденсаторного масла тёмного цвета.

При визуальном осмотре выявлено:

1. Ярко выраженные следы электрических (искровых) разрядов («подгара») (рис. 9): между верхним фланцем и металлической крышкой, установленной над первой мембраной; на токопроводящем поводке; в центре верхнего фланца и металлической крышки; между нижней мембранной коробкой и металлической крышкой, установленной над первым пакетом.

2. На поверхности верхнего фланца, металлической крышке, в фарфоровой рубашке обнаружены продукты разложения углеводородов в виде чёрного осадка, образовавшиеся в конденсаторном масле при воздействии на него искровых разрядов высокого напряжения.

Следы копоти (нагара) внутри фарфоровой покрывки присутствуют.



Рис. 9. Следы электрических (искровых) разрядов

Как упоминалось выше (во втором примере), мембранные коробки не имеют чёткой (фиксированной) электрической связи с высоковольтным выводом, образуется так называемый «плавающий» контакт. То есть при колебаниях температуры окружающей среды происходит изменение давления масла внутри конденсатора связи, соответственно изменяется плотность соприкосновения между мембранной коробкой как относительно высоковольтного вывода, так и относительно верхней обкладки первого пакета.

Образование газов при эксплуатации конденсаторов связи может происходить в результате разрушения электроизоляционных материалов под действием локального выделения теплоты, дуги, частичных разрядов и т. д. При горении в масле дуги в конденсаторе образуются продукты глубокого разложения углеводородов. Основной реакцией любых углеводородов при дуговом электрическом разряде следует считать деструктивное разложение (крекинг) с выделением углерода, водорода, углеводородных газов и жидких продуктов разложения.

Также следует отметить, что в результате искровых разрядов внутри конденсатора значительно ухудшается электрическая прочность масла, снижается температура его вспышки, растёт количество осадка. Накопление этого осадка в масле происходит главным образом за счёт термического разложения масла в зоне горения дуги. Накопление проводящих частиц осадка на изоляционных деталях даже при нормальных условиях работы могут послужить причиной возникновения скользящих разрядов, а при перенапряжениях привести к сплошному перекрытию.

В данном случае наблюдаются характерные следы искровых (дуговых) разрядов, особенно в центре верхнего фланца, металлической крышки и на токопроводящем поводке (в двух местах оплавление металла).

Вывод. В данной работе представлена проведённая комплексная диагностика четырёх конденсаторов связи 110 кВ. В рассмотренных случаях первичной причиной для вывода данного оборудования из работы явился результат тепловизионного обследования. С целью определения технического состояния проведены высоковольтные испытания, измерения конденсаторов, физико-химический и хроматографический анализ конденсаторного масла. В целях подтверждения обнаруженных дефектов выполнено вскрытие конденсаторов и осмотр их составных частей. Проанализировав все случаи, можно увидеть, что время развития дефекта в представленных конденсаторах связи составило от пяти до восьми месяцев, т. е. не превысило и одного года. Исходя из этого, в качестве эксперимента, для более эффективного контроля в эксплуатации за конденсаторами связи, будет целесообразным выполнение тепловизионной диагностики с периодичностью один раз в год, для возможного выявления дефектов на ранней стадии развития.

Литература

1. Алексеев Б. А., Коган Ф. Л., Мамиконянец Л. Г. Объём и нормы испытаний электрооборудования. М. : ЭНАС, 2008. 256 с.
2. Бажанов С. А., Кузьмин А. В., Вихров М. А. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. М. : РАО «ЕЭС России», 2000. 136 с.
3. ГОСТ 15581-80. Конденсаторы связи и обора мощности для линий электропередач». М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1981. 44 с.
4. ГОСТ 5775-85. Масло конденсаторное. М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 4 с.
5. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворённых в масле / Департамент науч.-техн. политики и развития. М. : РАО «ЕЭС России», 2001. 41 с.

УДК 621.316.1:621.316.771

Ширковец А. И.
Shirkovets A. I.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ 6-35 КВ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ПОСРЕДСТВОМ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ В НЕЙТРАЛЬ

NETWORKS OPERATING RELIABILITY GROWTH AT 6-35 KV AT POWER STATIONS BY CONNECTION RESISTORS TO NEUTRAL POINT

Представлены технические решения, направленные на предупреждение аварийных ситуаций в сетях выдачи мощности и собственных нужд электростанций. Выполнены расчеты по ограничению перенапряжений при замыканиях на землю, приведены преимущества и

способ включения резисторов в нейтраль сети. Нормативно обоснована целесообразность применения резисторов на основе композиционного материала, проанализирован опыт их эксплуатации на электростанциях, в том числе в условиях Севера.

Ключевые слова: сеть выдачи мощности, сеть собственных нужд, замыкание на землю, режим заземления нейтрали, компенсация емкостного тока, высокоомный резистор.

Постановка задачи. В настоящее время актуальной является задача снижения повреждаемости силового электрооборудования напряжением 6-35 кВ в сетях выдачи мощности и собственных нужд (СН) электрических станций. Высокий уровень повреждаемости обусловлен как физическим износом электрооборудования, так и воздействием на его изоляцию перенапряжений. Первичной причиной повреждения изоляции оборудования, как правило, являются пробой из-за однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), переходящих в многоместные и междуфазные короткие замыкания (КЗ) [2].

Вероятность развития аварийной ситуации в значительной мере определяется режимом заземления нейтрали сети. В схемах выдачи мощности 6-10 кВ в главном распределительном устройстве (ГРУ), с кабельной сетью большой протяженности, для компенсации емкостного тока (КЕТ) и ограничения перенапряжений традиционно используются дугогасящие реакторы (ДГР). Это решение не является оптимальным, поскольку на электростанциях остается большое число ступенчатых ДГР, в одной и той же сети могут быть включены реакторы с разными принципами регулирования, наблюдаются отказы автоматики управления. Еще одна проблема связана с отсутствием селективных релейных защит от ОЗЗ: поиск фидера с однофазным повреждением выполняется методом поочередных отключений. Компенсация высших гармоник тока однофазного замыкания с помощью ДГР, как правило, не предусмотрена.

Сети 6-35 кВ на электростанциях питают крупные промышленные предприятия и также заземляются через ДГР, сети СН эксплуатируются с изолированной нейтралью. Это обуславливает возможность длительного воздействия на изоляцию сети перенапряжений и ведет к выходу из строя электродвигателей (ЭД), кабельных линий (КЛ) и другого оборудования. На рис. 1 показаны последствия возгорания в кабельном коллекторе, возникшего из-за не отключенного ОЗЗ в сети 10 кВ со ступенчатыми ДГР. В результате произошло повреждение 64 силовых кабелей. Аварийно-восстановительные работы проводились непрерывно в течение нескольких суток, с заменой участков по 20–30 м кабеля и монтажом соединительных муфт. Общая длина таких кабельных вставок составила 1,5 км.



Рис. 1. Пожар в кабельном сооружении из-за возгорания силовых кабелей 10 кВ

Возможность возникновения аварийных, в том числе пожароопасных, ситуаций определяет актуальность перехода сетей 6–35 кВ электростанций на новый режим нейтрали, который обеспечит надежную защиту от перенапряжений при ОЗЗ и позволит выявлять отходящее присоединение с однофазным повреждением до его перехода в междуфазное КЗ.

Техническое обоснование и схема подключения. Для ограничения перенапряжений предлагается оптимизация режима заземления нейтрали сетей 6-35 кВ на электростанции с применением высокоомных резисторов, что нормативно закреплено в ПУЭ [4, п. 1.2.16, п. 1.4.166]. Резистор может быть установлен на станции как самостоятельно, так и параллельно силовой обмотке ДГР. Первый вариант является характерным для сетей выдачи мощности, второй – для сетей СН.

Анализ натуральных осциллограмм подтверждает, что эффективность КЕТ существенно снижается при раскомпенсации $\nu \geq 10\%$: уровень перенапряжений при этом $K_{II} = U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}} \geq 3,0$. На рис. 2 приведены расчетные осциллограммы дугового ОЗЗ, полученные на модели сети ГРУ-6 кВ Саратовской ТЭЦ-2 при заземлении нейтрали через реактор типа РЗДСОМ-230/6 ($I_{\text{ДГР}} = 50 \text{ А}$, $I_{\text{С}} = 40 \text{ А}$, $\nu = -25\%$). Особенностью схемы является совместная работа секций ГРУ и СН. Включение резистора сопротивлением 800 Ом параллельно ДГР на каждой секции позволяет в наиболее тяжелом расчетном режиме на 17 % снизить уровень перенапряжений, а также снизить вероятность повторных пробоев из-за уменьшения переходных восстанавливающихся напряжений на неповрежденных фазах.

На основании результатов расчетов и экспериментов в действующих сетях 6-35 кВ с КЕТ была выполнена оценка снижения перенапряжений за счет включения резистора в нейтраль сети (рис. 3).

Типовая схема и пример подключения ДГР и резисторов в нейтраль сети приведены на рисунке 4 (ФНП – фильтр нулевой последовательности со схемой «зигзаг», ОПФ – определение поврежденного фидера; на фотографии – ФНП слева, резистор посередине, ДГР справа). При отсутствии КЕТ схема (рис. 4) сохраняется: высокоомный резистор подключается в нейтраль фильтра типа ФЗМ, ФМЗО, ФЗГ, но уже без ДГР и шкафа автоматики.

Включение резистора в нейтраль сети позволяет устранить недостатки работы сети с КЕТ и изолированной нейтралью, а именно:

- ограничить перенапряжения при дуговых ОЗЗ на 15–30 %, что ведет к уменьшению числа перекрытий изоляции;
- исключить переходы ОЗЗ в двойные замыкания и многоместные повреждения;
- повысить чувствительность токовых релейных защит для надежного ОПФ;
- исключить опасные резонансные явления с увеличением амплитуды фазных напряжений до $(1,8-2,0) U_{\text{Фmax}}$.

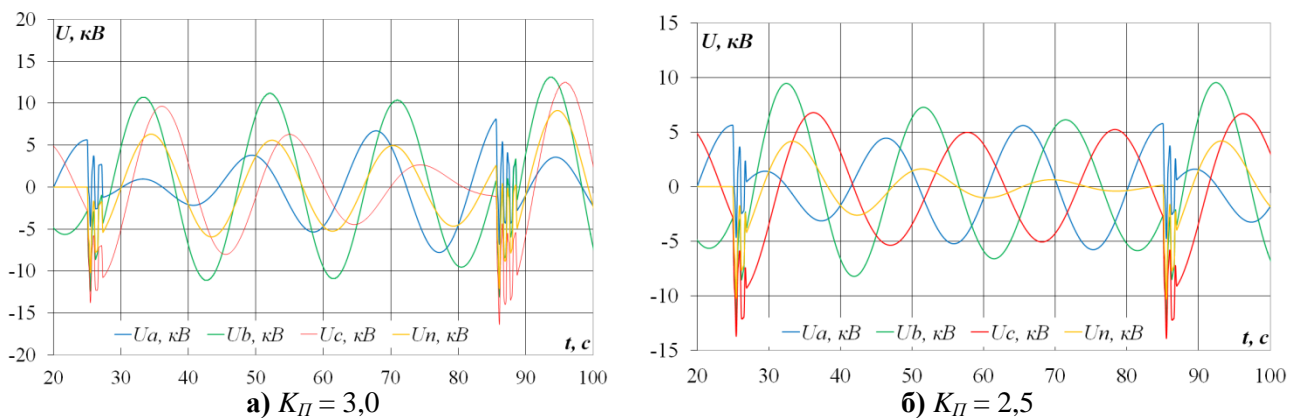


Рис. 2. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах и нейтрали:
а) при дуговом ОЗЗ в сети 6 кВ с ДГР в нейтрали;
б) при установке параллельно ДГР резистора

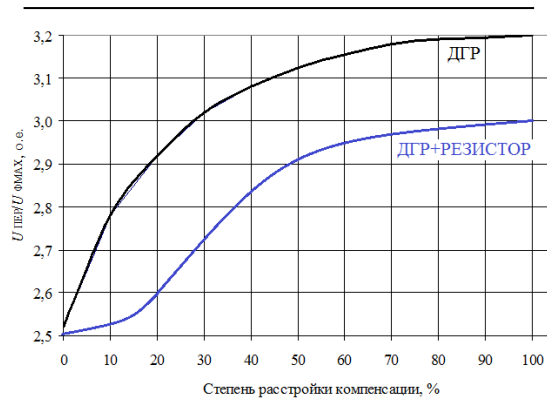


Рис. 3. Инженерная оценка зависимости перенапряжений от степени расстройки КЕТ

Для сетей электростанций с КЕТ благодаря резистору, обеспечивающему стекание избыточных зарядов с нейтрали, появляется возможность ввести напряжение смещения нейтрали в допустимые пределы согласно требованиям ПТЭ электроустановок потребителей [3, п. 2.8.16].

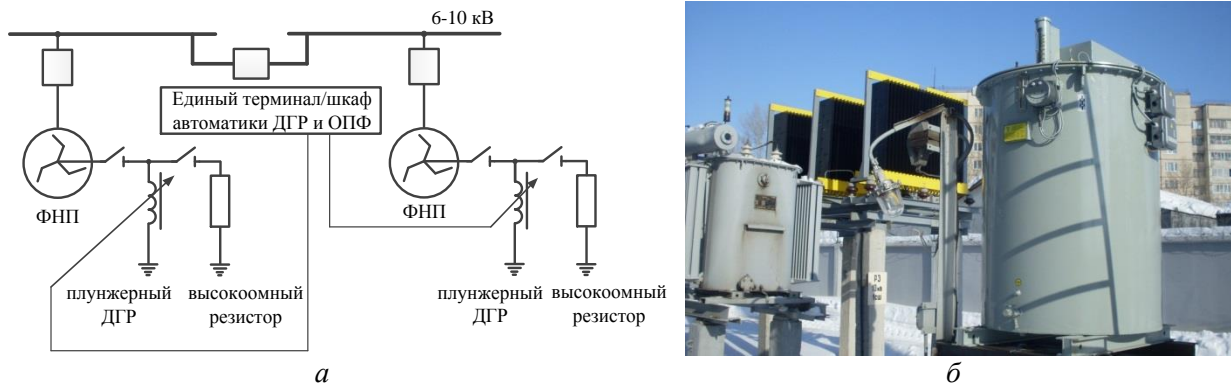


Рис. 4. Схема (а) и внешний вид (б) подключения резистора параллельно ДГР

В схеме рисунка 4 задача выбора и настройки релейных защит от ОЗЗ может быть решена за счет использования систем ОПФ – централизованных устройств, работающих на разных принципах, например, сравнения полярностей первых полуволн тока $3I_0$ и напряжения $3U_0$, сравнительного замера тока $3I_0$ промышленной частоты и высших гармоник в этом токе на разных фидерах, определения направления мощности нулевой последовательности.

Особенности резистивного материала. В задаче повышения эксплуатационной надежности оборудования 6–35 кВ на электростанциях важную роль играют технические характеристики материала, из которого изготавливаются резисторы для заземления нейтрали. В конструкции металлических резисторов в качестве активной части используются разные виды нержавеющей стали с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). При нагревании таких резисторов до 640–790 °С, что допускается стандартом IEEE 32 [6] происходит рост сопротивления до 2 раз относительно номинального. При этом активный ток резистора пропорционально уменьшается, что приводит к снижению чувствительности релейных защит от ОЗЗ.

Предельная допустимая температура нагрева стальных проводников согласно ПУЭ [4, п. 1.4.16] составляет 300–400 °С. Поэтому применение в отечественных условиях резисторов со стальными токоведущими частями, которые нагреваются до температур более 600 °С неправомерно.

У резисторов из композиционного материала [5] температура в рабочем режиме в 5–10 раз меньше, чем у металлических, что удовлетворяет требованиям отечественных нор-

мативных документов. Применение композиционных резисторов с предельной температурой не более 200 °С позволяет обеспечить их высокую надежность, а повышение активного тока при нагревании резистора (за счет отрицательного ТКС) гарантирует требуемую чувствительность релейных защит. Резисторы серии РЗ на основе композиционного материала эксплуатируются в сетях 6–35 кВ России, Белоруссии, Украины, Казахстана, Кыргызстана, Вьетнама, Ирана с начала 2000-х гг., нареканий не отмечено.

Опыт эксплуатации резисторов на электростанциях

Резисторы серии РЗ установлены в сетях выдачи мощности на Уфимской ТЭЦ-3 (2011), Кемеровской и Новокемеровской ТЭЦ (2001–2003), Саратовской ГРЭС (2003–2005), Новосибирских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 (2008), Тобольской ТЭЦ (2011), Нижневартовской ГРЭС (2006), Иркутской ТЭЦ-11 (2010) и ряда других электростанций. Применяемый резистивный материал обеспечивает работоспособность резисторов в сложных климатических условиях и при низких температурах, что характерно для северных регионов России.

Положительный эффект от внедрения резисторов подтверждается опытом эксплуатации. Так, в августе 2010 года на мощной ТЭЦ в Башкирии при возникновении ОЗЗ на потребительском фидере произошел пробой изоляции кабеля 6 кВ с последующим его возгоранием, а также повреждение двух ЭД. Величина емкостного тока сети 6 кВ от шин ГРУ составляла ≈ 128 А. Для исключения подобных аварий в дальнейшем было выполнено обследование сети, разработан рабочий проект и в 2011 г. реализовано заземление нейтрали сети 6 кВ на ТЭЦ с использованием резисторов. На рис. 5а приведена сравнительная оценка повреждаемости за период 01.10.2007 ÷ 01.12.2011 г. и 01.12.2011 ÷ 01.06.2015 г. – до и после установки защитных резисторов (ЗР) соответственно. Резисторы РЗ-300-40-6 (рис. 5б) были установлены на двух секциях ГРУ-6 кВ параллельно реакторам типа РДМР-480/6, управляемых автоматикой, совмещенной с терминалами ОПФ в шкафу серии «Бреслер 0117.168».

Основной задачей установки резисторов в сетях СН электростанций является предупреждение выхода из строя приводных высоковольтных ЭД технологических установок: циркуляционных и питательных насосов, шаровых мельниц, вентиляторов, механизмов подачи топлива. Причиной повреждения ЭД является воздействие дуговых перенапряжений высокой кратности на ослабленную статорную изоляцию, из-за термического воздействия наблюдается перегорание витковой изоляция (рис. 6) [1].



а



б

Рис. 5. Повреждаемость в сети 6 кВ мощной ТЭЦ (а) и фотографии установленных на ОРУ двух резисторов 300 Ом (б)



а



б

Рис. 6. Внешний вид приводного электродвигателя 6 кВ/630 кВт (закрытого исполнения) шаровой мельницы (а) и его поврежденный при ОЗЗ статор (б)

В таблице приведены нормированные уровни испытательного напряжения ЭД, определенные согласно [4, п. 1.8.15, табл. 1.8.9]. Приведены действующие значения испытательного напряжения частотой 50 Гц при времени испытания 1 мин. Неограниченные высокочастотные перенапряжения, воздействующие на изношенную изоляцию ЭД при дуговых ОЗЗ, могут достигать в амплитуде примерно $3U_{\text{фmax}}$, т. е. 15,5 кВ при номинальном напряжении 6,3 кВ и 25,8 кВ – при напряжении 10,5 кВ. Сопоставление их с данными в табл. 1 позволяет заключить, что такие перенапряжения представляют опасность с точки зрения надежности эксплуатации ЭД в режимах ОЗЗ, если сеть не защищена резисторами.

Таблица 1

Уровень испытательного напряжения электродвигателей, кВ

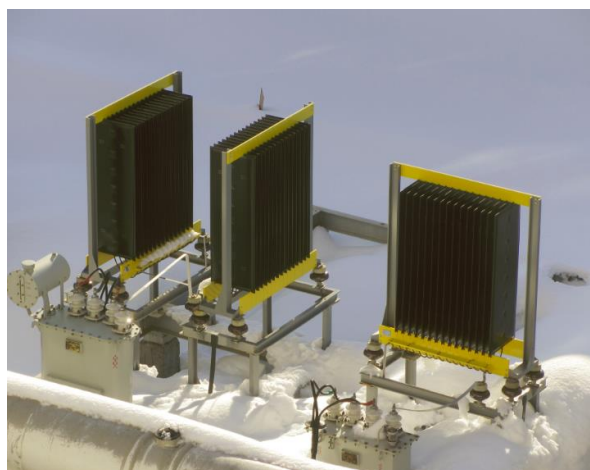
$U_{\text{ном}}$ \ $S_{\text{ном}}$	до 1 МВт	свыше 1 МВт
6,0 – 6,6 кВ	10,4 – 11,4	12,0 – 13,2
10 – 10,5 кВ	16,8 – 17,6	10,4 – 10,8

Выявлено, что из-за перенапряжений при однофазных пробоях в сетях СН 6 кВ Энгельсской ТЭЦ-3 (эксплуатируется 65 ЭД) и Саратовской ТЭЦ-2 (эксплуатируется 110 ЭД) до установки резисторов ежегодно повреждалось до 6 машин. После установки резисторов, в 2000 г. и 2004 г. соответственно, повреждения прекратились. Таким же образом была решена проблема останова технологических ЭД в схемах СН на Камчатской ТЭЦ-2, где резисторы 1000 и 700 Ом были введены в 2012 г. (рис. 7), а также на Сахалинской ГРЭС в 2008 – 2011 гг.

В 2008 г. произошел ряд технологических нарушений и аварий с многократным каскадным повреждением трансформаторов напряжения электромагнитного типа из-за феррорезонанса, возникавшего при ОЗЗ в сети 35 кВ объектов нефтедобычи, питаемой от газотурбинных электростанций (ГТЭС). Это приводило к потере сигналов напряжения в цепях учета и телемеханики, погасанию секций 35 кВ на станции, потере питания приводных технологических механизмов, таких как буровые установки скважин. Перерыв в добыче нефти из-за простоя оборудования приводил к существенному экономическому ущербу. Для исключения и предупреждения таких ситуаций высокоомными резисторами были оснащены сети выдачи мощности 35 кВ Ватъеганской ГТЭС-72 (2008), Тевлинско-Русскинской ГТЭС-48 (2009), Каменной ГТЭС-48 (2011) и других станций.



а



б

Рис. 7. Линейная ячейка в помещении РУСН-6 кВ (а) для подключения оборудования резистивного заземления нейтрали (б)

Техническое решение по резистивному заземлению нейтрали сетей 10 и 35 кВ в настоящее время используется как типовое при проектировании и строительстве систем генерации и электроснабжения на крупных месторождениях Северного региона – Покачевском, Повховском, Бованенковском, Заполярном и других.

Заключение. Установка резисторов позволяет повысить надежность и безопасность функционирования, эксплуатационного обслуживания основного и вспомогательного технологического оборудования сетей 6–35 кВ на электростанциях в режимах, связанных с однофазными повреждениями изоляции. Это достигается за счет ограничения перенапряжений и исключения множественных повреждений и каскадных отключений.

Литература

1. Иванов А. В. Аварийные ситуации, возникающие при эксплуатации электрооборудования 6–10 кВ в сетях газоперерабатывающих заводов // *Электротех.* 2008. № 5. С. 66–69.
2. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М. : Энергия, 1971. 152 с.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. приказом Минэнерго РФ от 13.01.2003 № 6.
4. Правила устройства электроустановок. 7 изд. : утв. приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002 № 204.
5. Состав для композиционного электропроводного материала: пат. 2289172 Рос. Федерация, МПК H01B 1/18. / Л. И. Сарин, Н. Г. Царегородцев, В. М. Копылов ; заявл. 12.05.04; опубл. 10.12.06. Бюл. № 34.
6. IEEE Standard 32-1972 (Reaffirmed 1997) Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices. URL: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/32-1972.html> (дата обращения: 14.01.2016).

УДК 621.315.1.015.001.57

Шуманская Е. В.
Shumanskaya E. V.

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОПРОВОДНОЙ
НЕСИММЕТРИЧНОЙ ЛЭП С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
НАВОДОК НА ОТКЛЮЧЕННЫЕ ФАЗЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЛ**

**MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT OF MULTIWIRE ASYMMETRIC
ETL FOR PURPOSE OF DETERMINING ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE
ON DISCONNECTED PHASE AND PARALLEL AERIAL LINES**

Корректный расчет наведенных напряжений на параллельных ЛЭП связан с обеспечением безопасной работы персонала. Целью исследовательской работы является разработка достоверной и универсальной модели оценки наведенных напряжений в квазистационарном и переходном режимах с учетом распределенности параметров ЛЭП и несимметрии. Разработанная модель является универсальным инструментом, позволяющим производить оценки наведенных напряжений в различных эксплуатационных ситуациях при проведении ремонтных работ с учетом различных факторов, ранее не учитываемых в других упрощенных методиках, дающих значительные ошибки или даже недостоверные результаты. Предварительные расчеты наведенных напряжений с помощью данной модели в реальной ремонтной или эксплуатационной схеме позволят обеспечить безопасное проведение работ персонала на ВЛ в любых прогнозируемых режимах работы и способах расстановки ЗУ по трассе.

Ключевые слова: наведенное напряжение, ЛЭП, безопасность, переходные процессы, модальные каналы, заземляющие устройства.

Электроснабжение объектов нефтегазового комплекса осуществляется при помощи воздушной линии (ВЛ) 35-110 кВ протяженностью десятки километров, а также при помощи ВЛ 6-10 кВ с длиной, достигающей одного или более километров. Воздушные линии могут проходить по всей длине или на отдельных участках вблизи действующих ВЛ более высокого напряжения, т. е. в одном коридоре. Осуществление любых работ на ВЛ (ремонтных, измерительных и пр.) происходит в условиях влияния параллельной ВЛ более высокого класса напряжения. Наведенные через электростатическое и магнитное влияние напряжения и токи на отключенной и заземленной ВЛ воздействуют на работающих как опасный и вредный производственный фактор.

Актуальность и значимость темы в теоретическом и практическом плане обусловлена тем, что оценка наведенных напряжений имеет важное значение для обеспечения безопасного проведения работ персоналом на ЛЭП, потому как в реальных условиях эксплуатации могут возникать не только наведенные напряжения в стационарном режиме, но и наведенные перенапряжения, сопровождающиеся короткими замыканиями и коммутациями ЛЭП. Существующие нормы и методы оценок наведенных напряжений не удовлетворяют эксплуатацию, зачастую при проведении измерений дают оценки, отличные от фактических. Нормы и методы требуют доработки, и в этой связи данная работа является полезной и имеет практическое значение для организации безопасных работ.

Новизна темы заключается в том, что инструкции и правила по безопасному проведению работ содержатся в ряде нормативных документов и в стандартах предприятий, на которых производятся работы. Однако практика показывает, что ряд положений, правил и ин-

струкций неоднозначно трактуются представителями различных организаций и служб, которые задействованы в процессе подготовки работ на линиях.

В работе проведен аналитический обзор проблемы определения наведенных напряжений (Унав) на отключенных фазах или параллельных ЛЭП при производстве ремонтных или иных работ на ВЛ, анализ существующих методов расчета и измерения наведенных напряжений, в результате которого разработана и реализована модель многопроводной линии электропередачи (ЛЭП) с учетом распределенности параметров, несимметрии расположения проводов и потерь в земле и проводах, позволяющая производить расчеты одновременно электростатической и электромагнитной составляющих наведенных напряжений в квазистационарном режиме и в переходных режимах, связанных с коммутациями ЛЭП или аварийными режимами [3]. Достоверность модели проверена в волновом и квазистационарном режимах.

В отличие от имеющихся методик модель позволяет производить расчеты распределения наведенных напряжений (Унав.) по длине подверженных влиянию участков ВЛ с учетом различных способов заземления по трассе.

Метод, учитывающий большее количество влияющих факторов, является более совершенным в сравнении с ранее известными, в том числе и в сравнении с предлагаемой методикой стандарта ФСК.

Метод модальных координат работоспособен как для оценки наведенных напряжений на отключенной фазе трехпроводных ЛЭП, так и для оценки наведенных напряжений на параллельных ЛЭП более низкого напряжения.

При помощи разработанной модели возможно получение не только оценок наведенных напряжений, но и распределение наведенного напряжения по длине ВЛ, в том числе с учетом дополнительных заземляющих устройств, что позволяет рекомендовать разработанную модель как инструмент предупреждающих оценок опасности для персонала при проведении ремонтных и иных работ на действующих линиях электропередачи либо вблизи влияющих электропередач при их параллельном следовании.

Возможно производить экспертные оценки параметров и оптимальной расстановки заземляющих устройств по трассе ВЛ и в месте проведения работ с целью обеспечения безопасной работы персонала в любых характерных эксплуатационных ситуациях при помощи разработанной модели.

При моделировании несимметричной линии определяются основные параметры, характеризующие распространение волн по многопроводной линии над землей: коэффициентов распространения, волновых сопротивлений и соотношений токов и напряжений в проводах для всех волновых каналов (мод) линии, матриц фазных коэффициентов распространения и волновых сопротивлений.

Для связи фазных и модальных координат по току и по напряжению в схеме ВЛ применяются матричные преобразователи из фазных координат в модальные ($\lambda^{-1}, \delta^{-1}$) и из модальных в фазные (λ, δ) [1]. Фазная система координат в разрабатываемой модели необходима в тех узлах, где ВЛ соединяется с другими элементами схемы, а также по трассе ВЛ в промежуточных точках для получения фактической информации о токах и напряжениях в проводах. Элементами схемы, примыкающими к ВЛ, могут быть: эквивалентные источники ЭДС, коммутаторы, активные и реактивные сопротивления и др.

Таким образом, в общем случае модель длинной ВЛ представляется в виде 4–5 участков определенной длины, соединенных между собой матричными преобразователями и соответствующими примыкающими элементами схемы (рис. 1).

Такая модель способна давать реальные результаты при оценке наведенных напряжений на отключенной фазе, а также получать уточненные результаты расчетов наведенных напряжений между цепями ВЛ при влиянии линии более высокого напряжения на линию более низкого напряжения.



Рис. 1. Математическая модель несимметричной 6-проводной ЛЭП в системе с модальными волновыми каналами

Аварийные режимы в программе реализуются в виде расчета переходного процесса с выходом на квазистационарный режим, например, различные виды короткого замыкания, обрыва проводов и т. д. В модели участки ЛЭП между узлами моделируются в виде линии с распределенными параметрами, что для протяженных ВЛ также является необходимым уточнением. Возможности модели позволяют получать уровни наведенных напряжений в любой точке ВЛ, а также кривые распределения наведенных напряжений по отключенной фазе, в том числе при различных параметрах и количестве защитных заземлений [4].

Проверка достоверности модели проводилась в квазистационарном режиме и в начальной стадии волновых процессов. При подаче прямоугольного импульса волновой процесс для симметричной ЛЭП в точности совпадает, для несимметричной ЛЭП расхождение результатов соответствует несимметрии параметров ЛЭП. Плавный выход на режим частоты 50 Гц необходим для определения электростатических наводок, этап сопровождается аналитическим расчетом и совпадает с электростатическими наводками, полученными по разработанной модели [4].

Как показательный вариант обработки модели и демонстрации ее результатов для параллельных цепей, т. е. исследуя влияние ВЛ более высокого класса на ВЛ более низкого класса напряжения, уровень наведенного напряжения на отключенной линии 110 кВ по графикам распределения показывает, что при заземлении ВЛ в двух точках максимальные значения наведенных напряжений составляют 700 В в середине линии, а применение дополнительного заземляющего устройства снижает его до 150 В, но по концам этот уровень соответствует 450 В (рис. 2).

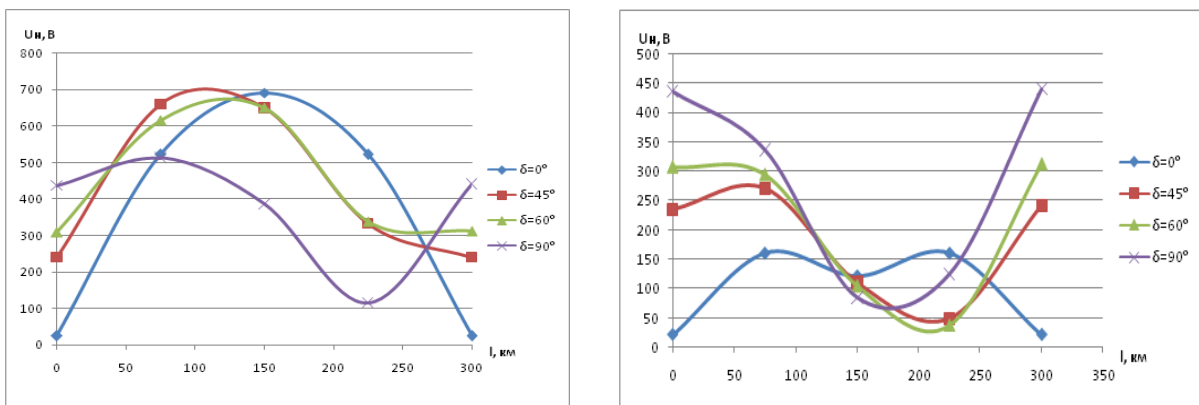


Рис. 2. Кривые распределения наведенного напряжения на отключенной ВЛ 110 кВ с различными углами передаваемой мощности ВЛ 500 кВ в аварийном режиме

Моделируя внезапное короткое замыкание на ВЛ 500 кВ, наводки на ВЛ 110 кВ составляют: для ВЛ, заземленной в 2 точках, уровень наведенного напряжения соответствует 258 кВ, а для заземленной в трех точках дополнительное заземление приводит к снижению уровня до 8,5 кВ (рис. 3).

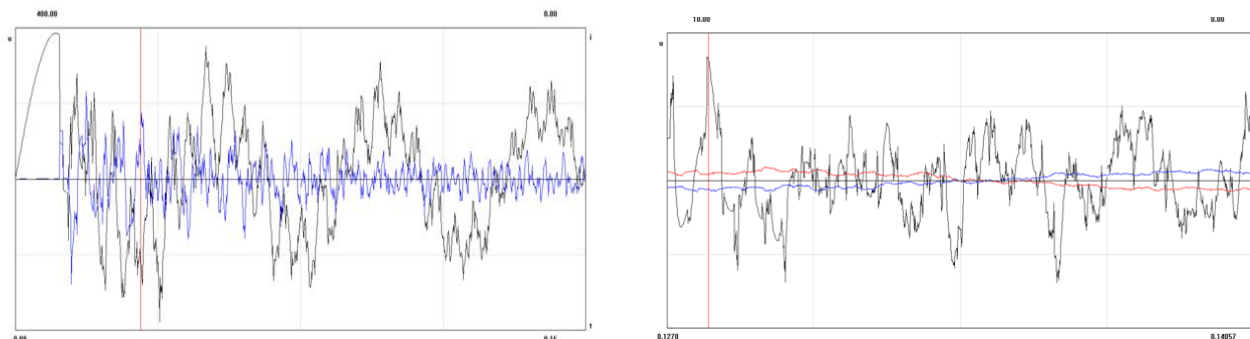


Рис. 3. Осциллограмма наведенных напряжений на заземленной в двух и трех точках линии 110 кВ при внезапном однофазном КЗ в конце ВЛ 500 кВ на максимуме фазного напряжения

Полученные результаты оценки наведенных напряжений по разработанной модели необходимо сравнить с результатами расчета наведенных напряжений по предлагаемой методике ФСК [2].

Сравнение полученных результаты оценки наведенных напряжений по методике стандарта ФСК с результатами расчета наведенных напряжений по разработанной модели для отключенной и заземленной по концам ВЛ 110 кВ показало:

$$\begin{aligned}U_{\text{нав}} &= 78,4 \text{ В} < U_{\text{нав}^*} = 436 \text{ В}; \\U_{\text{нав}} &= 78,4 \text{ В} - \text{стандарт ФСК}; \\U_{\text{нав}}^* &= 436 \text{ В} - \text{разработанная модель}.\end{aligned}$$

Сравнение доказывает, что неэффективное применение упрощенной методики расчета наведенных напряжений, в которой не учитывается электростатическая составляющая наведенного напряжения, приводит почти к шестикратному увеличению значений наведенного напряжения.

В результате проведенных расчетов, характерных для эксплуатации ЛЭП, доказана принципиальная работоспособность метода модальных координат, дающая возможность производить оценки наведенных напряжений в сложных схемных ситуациях, не поддающихся аналитическим расчетам.

Далее в качестве примера практического использования разработанной математической модели проведена серия расчетов наведенных напряжений на отключенной цепи двухцепной ВЛ-110 кВ Ай-Пимская-Северолаботюганская общей длиной 90 км в различных ситуациях. Предварительное проведение такого рода анализа дает информацию о возможных длительных наведенных напряжениях по трассе и может использоваться для организации безопасного проведения работ, в частности определения числа и оптимальной расстановки заземляющих устройств с целью снижения уровня наведенного напряжения до безопасного – менее 25 В.

Информация о наведенных напряжениях в аварийных режимах рабочей цепи также необходима ввиду вероятного совпадения по времени момента КЗ и нахождения персонала вблизи опоры или вблизи дополнительного заземляющего устройства.

Предварительный расчет уровней наведенных напряжений позволит не только обеспечить выполнение мероприятий по безопасному проведению работ на ВЛ высокого напряжения в соответствии с Правилами по охране труда при эксплуатации электроустановок, утв.

приказом Минтруда России от 24.07.2013 №328н, но и позволит правильно организовать работы выездной бригады в части снижения затрат на перевозку технических средств, необходимых для снижения уровней наводящихся потенциалов, т. е. дополнительное число заземляющих устройств и специальной техники.

Внедряя данное рационализаторское предложение в системную работу предприятия, обслуживающего распределительные и магистральные электрические сети, целенаправленно создается условие для безопасного функционирования и мониторинга работы высоковольтных линий электропередач, повышающие уровень хозяйственного управления производственной и экономической деятельности предприятия. А расчет экономического эффекта при внедрении разработанной методики, который показан как разница затрат между действующей и предлагаемой методикой, составит около 5 424 919 руб.

Проблема наведённых напряжений и обеспечения безопасности работы ремонтного персонала на отключённых ВЛ обсуждается в печати долгое время, и всё же остаётся актуальной. Трудность решения этой проблемы обеспечивается разработанной моделью, которая может применяться как инструмент для предварительных расчетов наведённых напряжений перед началом организации работ на линии электропередачи.

Учет распределенности параметров ЛЭП в сочетании с методом модальных координат позволяет производить корректные оценки наведённых напряжений практически в любой эксплуатационной ситуации, характерной для ВЛ.

Предложенный метод и разработанная модель за счет точных расчетов и проявления, как следствие, объективной картины обеспечит повышение безопасности и позволит упростить организацию работ на ВЛ, находящихся под наведенным напряжением.

Литература

1. Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарин Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М. : Энергия, 1971. 270 с.
2. Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ : СТО 56947007-29.240.55.018-2009 ОАО «ФСК ЕЭС». М., 2009.
3. Шуманская Е. В., Голдобин Д. А. Разработка математической модели многопроводных воздушных ЛЭП с целью расчета наведённых напряжений на параллельных линиях электропередачи // *Фундаментальные и прикладные научные исследования* : сб. ст. междунар. науч.-практич. конф. 17 мая 2015 г. Москва). М. : РИО Европейского фонда инновационного развития, 2015. С. 24–26.
4. Шуманская Е. В., Голдобин Д. А. Электромагнитные наводки на отключенные фазы и параллельные ЛЭП. Германия : LAP LAMBERT ; Academic Publishing, 2015. 116 с.

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СИСТЕМНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕВЕРА РОССИИ

УДК 630*431:536.46: 001.891.55

*Антонов С. Ю., Исаков Г. Н.
Antonov S. Yu. Isakov G. N.*

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ПОЛУНАТУРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

SYSTEM ANALYSIS OF HEAT AND MASS TRANSFER AND SIMULATION MODEL OF GROUND FOREST FIRE IN SEMINATURAL EXPERIMENT

В результате проведенного эксперимента были получены три математические модели, описывающие процесс развития и распространения низового лесного пожара в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры.

Ключевые слова: системный анализ, имитационная модель, низовые лесные пожары.

Трудно найти человека, который не любил бы в жаркий летний день провести свободное время в лесу. В любое время года он прекрасен. Сколько хороших слов сказано о русском лесе нашими писателями и поэтами! Посмотрите, куда стремятся люди на выходной – в лес. Но не все бережно относятся к нему. Как правило, виновниками лесных пожаров являются люди, их небрежность в обращении с огнем, незнание элементарных противопожарных правил, неумение пользоваться огнем в лесу.

Лесной пожар редко бывает повальным, когда огнем объята стволы и кроны деревьев и пламя бушует, выбрасывая многометровые языки. Чаще всего случаются «низовые» пожары, при которых горит валежник, сухая трава и т. п. Высота пламени редко бывает более 0,5 м, а скорость продвижения кромки огня 1–2 м в мин. Но сколько вреда приносит такой пожар. Уничтожается вся лесная молодежь, сгорают хвойный подрост и молодняки. Огонь повреждает поверхностно расположенные корни деревьев и кустарников, и спустя некоторое время начинается отмирание части деревьев. В древостоях, ослабленных пожаром, создаются благоприятные условия для массового размножения вредных лесных насекомых, которые в последствии нападают и на соседние, не поврежденные огнем участки леса. Много еще можно сказать о вреде, приносимом лесными пожарами народному хозяйству.

Для эффективной борьбы с низовыми лесными пожарами необходим прогноз пожарной опасности. Для прогнозирования любого явления, состояния, процесса (в том числе динамики низового лесного пожара) необходимо выполнение следующих условий: наличие понятийного аппарата и наличие методов, способов и систем прогнозирования. Важно четко выделить объект прогнозирования и построить максимально адекватную прогностическую модель (совокупности прогнозных моделей), имеющую прикладное значение.

Для разработки достоверных прогнозов динамики развития и распространения низового лесного пожара, верификации моделей необходима система мониторинга, поставляющая исходные данные для проведения необходимых расчетов и позволяющая верифицировать методы, модели и методики прогнозирования. Рассматривая методические основы прогнозирования, целесообразно выделить следующие их составляющие: методы прогнозирования; систему прогнозирования. Целью анализа объекта прогнозирования является разработка

прогностической модели объекта. Для этого необходимо иметь метод или совокупность методов прогнозирования. Из всех существующих направлений моделирования или моделей более рациональным будет использование оперативного моделирования – моделирование распространения и развития низовых лесных пожаров по неоднородной территории лесной площади.

Рассмотрим участок лесного массива площадью 2 400 м². Для того чтобы построить физическую модель развития и распространения низового лесного пожара, необходимо проанализировать структуру данного участка леса и выделить основные составляющие величины, которые необходимо перенести на натуру с учетом их критерия подобия.

Основная величина, которая непосредственно влияет на развитие и распространение низового лесного пожара, – это горючая нагрузка данного участка леса. Горючая нагрузка лесного массива складывается из количества древесины на единицу площади данного участка.

При расчётах будем использовать утверждение, что рассматриваемый участок (натура) покрыт равномерно насаждениями. Растительность лесного массива представляет собой смешанную породу деревьев с преобладанием хвойных пород плотностью размещения 2,5 шт./ар. [5], что составляет 0,025 шт./м². Таким образом, количество стволов деревьев на рассматриваемом участке составит 60 шт. Для того чтобы определить горючую нагрузку древесины на единицу площади рассматриваемого участка, необходимо определить средний объем растущего дерева, который будет зависеть от среднестатистических геометрических параметров ствола дерева. Исходя из данных, полученных в результате наблюдений и измерений параметров стволов деревьев, можно сказать, что среднестатистический диаметр ствола дерева на высоте 1,3 м (уровень груди) составляет 25 см.

На основании этого, согласно способу Н. Денцина, определяем средний объем растущего дерева [2]:

$$V = 0,001 \cdot D_{1,3}^2, \quad (1)$$

где V – объем растущего дерева (м³);

$D_{1,3}$ – диаметр ствола дерева на высоте 1,3 м (уровень груди) (см).

Среднестатистический объем ствола растущего дерева участка лесного массива равен:

$$V = 0,001 \cdot D_{1,3}^2 = 0,001 \cdot 25^2 = 0,625 \text{ (м}^3\text{)} \quad (2)$$

Для определения массы дерева необходимо знать плотность соответствующего вида древесины. Исходя из условия, что в районах Западной Сибири нашей страны самыми распространенными являются хвойные породы деревьев, для расчета массы дерева примем плотность сосны, равную 650 кг/м³ при влажности 50 %. Таким образом, среднестатистическая масса одного растущего дерева составит 406,25 кг., масса древесины на рассматриваемом участке 24 375 кг (60 деревьев), а горючая нагрузка древесины 10,15625 кг/м².

Для создания макета участка лесного массива потребуются контейнер размерами 0,6 × 0,4 м, земля, листва, ветки деревьев. Массу веществ, принимающих участие в процессе горения, следует принимать в соответствии с их коэффициентом подобия k , который равен отношению геометрических параметров рассматриваемого участка к параметрам макета и определяется на основании анализа размерностей и следствий из общей теории подобия.

Обозначим участок низового лесного пожара переменной F , а его физическую модель переменной F' . На основании теоремы подобия, физическая модель F' получается из участка лесного массива F путем преобразования с коэффициентом подобия k :

$$F = k \cdot F'. \quad (3)$$

Важным моментом является тот факт, что такие величины, как площадь и объем имеют коэффициенты подобия соответственно k^2 и k^3 :

$$S(F) = k^2 \cdot S(F'), \quad (4)$$

$$V(F) = k^3 \cdot V(F'). \quad (5)$$

Таким образом, основной величиной физической модели и природы будет являться такая размерность, как длина, измеряемая в метрах, характеризуемая коэффициентом подобия k и определяемая отношением длин природы к длинам макета:

$$k = \frac{60}{0,6} = \frac{40}{0,4} = 10^2. \quad (6)$$

Для создания макета потребуется количество древесины массой m' . Для определения данной величины необходимо вычислить коэффициент подобия, с которым количество древесины массой m будет переходить в подобную ей величину физической модели m' .

Объем вещества определяется по формуле:

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (7)$$

где V – объем древесины (м^3); ρ – плотность древесины ($\text{кг}/\text{м}^3$); m – масса древесины (кг).

Как уже ранее говорилось, на основании теории подобия, объем древесины можно выразить через объем соответствующего вещества макета с учетом коэффициента подобия:

$$V = k^3 \cdot V', \quad (8)$$

где V – объем древесины (м^3); k^3 – коэффициент подобия; V' – объем древесины (м^3).

В формуле (7) вместо объема древесины подставляем значение объема, выраженного в формуле (8), и получаем:

$$k^3 \cdot V' = \frac{m}{\rho}. \quad (9)$$

В результате математических преобразований получаем:

$$V' = \frac{m \cdot k^{-3}}{\rho}. \quad (10)$$

Используя допущение, что плотность древесной природы и плотность древесины, используемых в физической модели одинаковые, определим:

$$V' = \frac{m'}{\rho}. \quad (11)$$

Таким образом, на основании выражения (10) и формулы (11) получаем равенство:

$$m' = m \cdot k^{-3}, \quad (12)$$

где m' – масса древесины физической модели (кг); k^{-3} – коэффициент подобия для переноса массы древесной природы на макет ($k = 10^2$).

В результате анализа горючей нагрузки участка лесного массива, проведенного в данной работе, масса древесины составила 24 375 кг. Таким образом, масса количества древесины, необходимого для создания физической модели, будет определяться по формуле (12) и будет равняться:

$$m' = 24375 \cdot 10^{-6} = 0,024 \text{ кг}.$$

В рамках исследований, проводимых в данной работе, создание макета с использованием расчетных величин связано с неким числом трудностей. Эксперимент по получению статистических данных развития и распространения низового лесного пожара проводится в естественных условиях, что требует от макета мобильности и удобства в его использовании. В связи с чем применение расчетных величин масс веществ, участвующих в процессе горения, не рационально.

Основной величиной, характеризующей скорость развития и распространения низового лесного пожара физической модели, является горючая нагрузка древостоя и подстила, следовательно, при изменении количественной характеристики данного параметра следует уделить особое внимание критериям подобия, которые будут оказывать непосредственное влияние на выходящую величину имитационной модели в натуре.

В то время как горючая нагрузка лесного подстила будет оказывать влияние на скоростные характеристики низового лесного пожара, горючая нагрузка древесины будет задавать структуру распространения пожара. Таким образом, на распространение лесного пожара будет в большей степени оказывать влияние структура размещения моделей деревьев, которая будет задавать направления развития низового лесного пожара, нежели масса древесины. На основании этого в данном эксперименте позволим себе сделать допущение относительно количественной характеристики горючей нагрузки древесины модели по отношению к натуре и применить для создания макета около 0,5 кг древесины.

Скорость развития и распространения низового лесного пожара, как и любая другая скорость, характеризуется изменением какого-либо параметра в единицу времени, в нашем случае это [м/с]. Так как время является величиной, которая имеет постоянное значение в обеих системах, то

$$v' = \left[\frac{m \cdot k}{c} \right] = v \left[\frac{m}{c} \right] \rightarrow v' \cdot k = v, \quad (13)$$

где v' – скорость распространения фронта пожара физической модели (м/с); v – скорость распространения фронта пожара в реальных условиях (м/с); k – коэффициент подобия ($k = 10^2$).

Аналогичный анализ размерностей проведем и со значением горючей нагрузки древесины, которая измеряется в [кг/м²]:

$$\Gamma' \left[\frac{\text{кг} \cdot k^3}{\text{м}^2 \cdot k^2} \right] = \Gamma \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right] \rightarrow \Gamma' \cdot k = \Gamma, \quad (14)$$

где Γ' – горючая нагрузка древесины физической модели (кг/м²); Γ – горючая нагрузка древесины в реальных условиях (кг/м²); k – коэффициент подобия ($k = 10^2$).

В результате проведенного анализа размерностей скорости распространения фронта низового лесного пожара и горючей нагрузки соответственно природы и физической модели (13) и (14), получаем:

$$\frac{v}{v'} = \frac{\Gamma}{\Gamma'} = k \rightarrow v = v' \cdot \frac{\Gamma}{\Gamma'}. \quad (15)$$

Использование расчетного количества древесины для создания макета вызывает неудобства для проведения эксперимента, в связи с чем для создания физической модели развития и распространения низового лесного пожара массу используемой древесины примем равную 2 кг. Таким образом, горючая нагрузка древесины физической модели составит 8,3 кг/м², а коэффициент подобия для скорости развития и распространения низового лесного пожара на основании формулы (15) составит:

$$k_v = \frac{\Gamma}{\Gamma'} = \frac{10,15625}{8,3} = 1,23. \quad (16)$$

Место проведения эксперимента – полигон ФГКУ «1 Отряд ФПС МЧС России по ХМАО – Югре». Для проведения эксперимента потребуется макет участка лесного массива психрометр, термометр, компас и измерительные приборы для измерения расстояния, пройденного фронтом пламени (линейка, циркуль измеритель).

Устанавливаем контейнер так, чтобы его стороны были в направлении сторон света и укладываем в него землю в таком количестве, чтобы хватило места для количества торфа принимаемого в эксперимент (рис. 1).

Далее покрываем слой почвы слоем листвы и перегноя, имитирующим слой лесной подстилки и вставляем макеты деревьев (древесные палочки), измеряем значения факторов входящих величин, скорость ветра принимаем исходя из метеопокзаний, температуру воздуха по термометру, а его влажность по психрометру и производим поджог в центре макета.

Далее производим контроль динамики развития и распространения физической модели низового лесного пожара (рис. 3), а также фиксируем результаты измерения пути, пройденного фронтом пламени S за период времени t .

В ходе измерений результатов натурального эксперимента, проведенного в количестве тридцати опытов, была составлена таблица 1, в которой показана средняя скорость развития и распространения низового лесного пожара в каждом из опытов и соответствующие ей погодные условия (скорость ветра, температура воздуха, влажность воздуха).

Согласно результатам экспериментов, представленных в табл. 1, с помощью программы Microsoft Excel построим графики зависимостей величины скорости развития и распространения низового лесного пожара от величин, характеризующих условиями эксперимента. На рис. 4 представлен график скорости движения фронта пламени низового лесного пожара.



Рис. 1. Слой почвы, имитирующий слой грунта натуре



Рис. 2. Слой, имитирующий слой лесной подстилки



Рис. 3. Динамика развития низового лесного пожара

На рис. 5 построен график скорости движения фронта пламени в зависимости от влажности воздуха. К данному графику была проведена линия тренда (тонкая линия) с точностью [6] и коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9698$.

График скорости движения фронта пламени в зависимости от температуры воздуха, представленный на рисунке 6, приближен к линии тренда (тонкая линия) с точностью [6], о чем свидетельствует коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,8548$.

Таким образом, на основании экспериментальных данных, полученных в результате натурального эксперимента и метода наименьшего квадрата, реализованного с помощью программы Microsoft Excel, были выведены математические зависимости (17), (18) и (19), описывающие скорость развития и распространения низового лесного пожара физической модели в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры. Во всех трех мо-

делях выходящая величина функции, а именно скорость развития и распространения низового лесного пожара, измеряется в мм/ч.

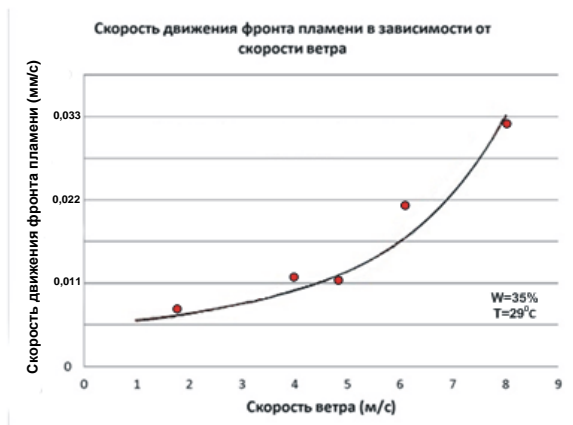


Рис. 4. График скорости движения фронта пламени в зависимости от скорости ветра

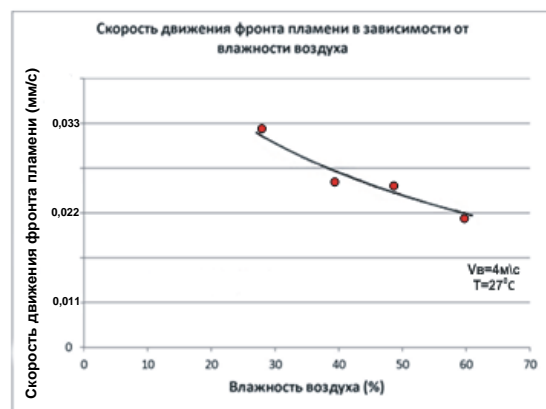


Рис. 5. График скорости движения фронта пламени в зависимости от влажности воздуха

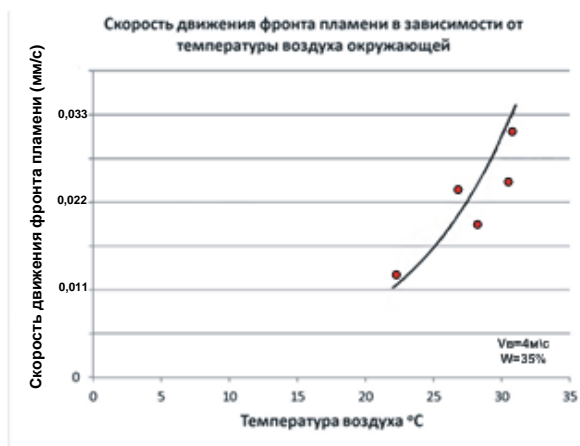


Рис. 6. График скорости движения фронта пламени в зависимости от температуры окружающего воздуха

Ранее в данной работе был определен коэффициент подобия $k_v = 1,23$ для перехода от скорости развития и распространения низового лесного пожара физической модели к скорости низового лесного пожара в реальных условиях. Следовательно, с учетом данного коэффициента функции, описывающие рассматриваемый процесс, примут следующий вид:

$$V_{II} = 0,0133293(v_B)^4 - 0,1241521(v_B)^3 + 0,595432(v_B)^2 - 0,1262463(v_B) + 5,851025, \quad (17)$$

где V_{II} – скорость развития и распространения низового лесного пожара (м/ч); v_B – скорость ветра (м/с).

$$V_{II} = -6,43542 \ln(f) + 34,78352, \quad (18)$$

где f – влажность воздуха (%).

$$V_{II} = 1,3469e^{0,1236t}, \quad (19)$$

где t – температура воздуха (°C).

Таблица 1

**Результаты эксперимента по развитию и распространению
низового лесного пожара**

№	Дата и время проведения эксперимента	Условия эксперимента				Результаты
		Скорость ветра V^B , м/с	Влажность воздуха f , %	Направление ветра (метеорологическое)	Температура воздуха t , °С	Средняя скорость развития фронта пламени V^n , мм/с
1	09:00 10.07.15	4	37	ЮВ	+27	0,010
2	14:00 10.07.15	4	35	Ю	+29	0,013
3	09:30 11.07.15	6	35	ЮЗ	+30	0,022
4	13:30 11.07.15	6	31	ЮЗ	+31	0,025
5	09:00 12.07.15	3	50	С	+25	0,006
6	14:30 12.07.15	3	39	СЗ	+27	0,010
7	09:30 13.07.15	3	48	СВ	+27	0,007
8	15:00 13.07.15	2	37	В	+28	0,006
9	19:00 13.07.15	1	69	–	+22	0,004
10	09:30 14.07.15	3	48	В	+27	0,008
11	13:00 14.07.15	5	42	СВ	+28	0,011
12	09:30 15.07.15	4	45	В	+27	0,010
13	14:00 15.07.15	5	35	В	+29	0,012
14	10:00 16.07.15	5	61	В	+25	0,011
15	15:00 16.07.15	6	48	ЮВ	+28	0,012
16	09:30 17.07.15	5	39	ЮВ	+27	0,011
17	13:30 17.07.15	6	27	ЮВ	+31	0,015
18	17:00 17.07.15	3	45	В	+27	0,009
19	09:00 18.07.15	4	24	ЮЗ	+32	0,011
20	14:00 18.07.15	4	27	Ю	+31	0,011
21	18:00 18.07.15	4	41	ЮВ	+25	0,010
22	09:00 19.07.15	2	26	–	+32	0,007
23	14:30 19.07.15	1	26	–	+33	0,007
24	10:00 20.07.15	4	29	СВ	+32	0,012
25	16:00 20.07.15	8	42	ЮЗ	+27	0,033
26	09:30 21.07.15	4	51	СЗ	+27	0,009
27	14:30 21.07.15	4	58	З	+26	0,008
28	18:00 22.07.15	3	61	З	+23	0,007
29	09:00 22.07.15	5	42	СЗ	+27	0,011
30	13:30 22.07.15	6	40	З	+28	0,011

На основании результатов эксперимента были построены графики скорости развития и распространения низового лесного пожара и на основании метода наименьших квадратов, реализованного с помощью Microsoft Excel, были определены функции наиболее точно из возможных описывающие данные процессы.

В результате, в данной работе были получены три отдельные математические модели (17), (18) и (19), описывающие процесс развития и распространения низового лесного пожара, соответственно в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры, а также принятые с учетом коэффициента подобия, что позволяет с некой вероятностью утверждать, что данные зависимости описывают рассматриваемый процесс в реальных условиях.

Литература

1. Антонов С. Ю., Исаков Г. Н. Динамика лесных пожаров и их экологических последствий на территории ХМАО – Югры // Биотические компоненты экосистем : науч. симпозиум V междунар. эколог. конгресса «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2015». 2015. Т. 2.

2. Гришин А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2008. № 2 (3). Математика и механика.
3. Ефименко В. М. Лесная таксация : практич. пособие по выполнению лабораторных работ для студ. спец. 1-75.01.01 Лесное хозяйство. М., 2013.
4. Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск : ИЛиД СО АН СССР, 1970. С. 3–5.
5. Подрезов Ю. В. Анализ современных методов прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Человек и катастрофы: проблемы обучения новым технологиям и подготовки населения и специалистов к действиям в чрезвычайных ситуациях : материалы междунар. симпозиума. М. : ВНИИ ГОЧС, 1999.

УДК 331.45/.46:622.3(571.122)

*Газя Г. В.
Gazia G. V.*

**ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА
К СНИЖЕНИЮ УРОВНЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ**

**SYSTEMATIC APPROACH IMPLEMENTATION PROSPECTS AND PROBLEMS
TO REDUCE ACCIDENT FREQUENCY RATE
AT OIL AND GAS ENTERPRISES
OF KHANTY-MANSI AUTONOMOUS OKRUG – UGRA**

Системный подход к управлению охраной и безопасностью труда является стержневой составляющей безопасности условий труда нефтегазовой организации, направленной на формирование и поддержание превентивных мер и мероприятий по оптимизации опасностей и рисков, в том числе по предупреждению аварий, несчастных случаев на производстве и профзаболеваний. Инструментом реализации системного подхода к управлению охраной и безопасностью труда на любом крупном нефтегазовом предприятии служит трехступенчатый контроль в системе управления охраной труда.

Ключевые слова: охрана и безопасность труда, системный подход, управление, трёх-ступенчатый контроль.

Системный подход в организации работы по снижению уровня производственного травматизма на предприятиях нефтегазового комплекса предусматривает правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, реабилитационные и иные мероприятия [3].

В Ханты-Мансийском автономном округе – Югре наиболее наглядным примером успешной реализации системного подхода к снижению уровня производственного травматизма является деятельность нефтегазовых организаций региона в области охраны труда, пожарной, промышленной и электробезопасности.

19 апреля 2016 г. в городе Сочи на ежегодной Всероссийской неделе охраны труда лучшим муниципальным образованием в области охраны труда стал город Сургут. Во многом залогом такого успеха муниципального образования является успешная деятельность в области охраны труда предприятий нефтегазового комплекса, зарегистрированных в городе Сургуте, которые выделяют беспрецедентные денежные средства на профилактику случаев

производственного травматизма, количество которых является главным показателем эффективной работы предприятия в области безопасности труда.

Престиж нефтегазового предприятия заключается не только в количестве добытых тонн нефти и кубометров газа, но и производственной деятельности без случаев производственного травматизма. Несмотря на финансовый кризис, обусловленный снижением цен на энергоносители, в ведущих нефтегазовых предприятиях округа продолжается стабильное финансирование организационно-технических предприятий по профилактике случаев производственного травматизма.

Крупные предприятия нефтегазовой отрасли для сохранения рентабельности производства и увеличения прибыли вынуждены наращивать объемы добычи за счет освоения новых месторождений нефти и газа, находящихся на отдаленных территориях.

Структурные подразделения предприятий топливно-энергетического комплекса, занимающиеся разработкой и эксплуатацией отдаленных месторождений на нефть и газ, нуждаются в усиленном в контроле за безопасностью труда на непосредственных местах производства работ.

Обусловлено это, прежде всего, удаленностью мест производства работ от медицинских учреждений, отсутствием возможности постоянного надзора и контроля за безопасностью условий труда со стороны руководства и главных специалистов предприятия.

В связи с этим усиливается степень ответственности за безопасную организацию работ непосредственного руководителя организационной единицы предприятия (бригады, цеха, участка и т. д.), находящейся на отдаленном месторождении.

Решение данного вопроса – в системном подходе к управлению охраной и безопасностью труда, который является стержневой составляющей безопасности условий труда, направленной на формирование и поддержание превентивных мер и мероприятий по оптимизации опасностей и рисков, в том числе по предупреждению аварий, несчастных случаев на производстве и профзаболеваний.

Инструментом реализации системного подхода к управлению охраной и безопасностью труда на любом крупном нефтегазовом предприятии служит трехступенчатый контроль в системе управления охраной труда (далее – производственный контроль). Производственный контроль является основной формой контроля представителями работодателя и трудового коллектива нефтегазовой организации за состоянием условий и безопасности труда на рабочих местах, производственных участках, цехах и других подразделениях.

При этом приоритетным направлением контроля является соблюдение всеми службами, должностными лицами и работниками нефтегазового предприятия требований законодательства о труде и об охране труда. Производственный контроль представляется также важным фактором в системе мероприятий по оздоровлению условий труда и повышению культуры производства нефтегазовых компаний. Кроме того, он способствует коллективной ответственности за состояние охраны труда всех работников – от рядового сотрудника до руководителя организации.

Трехступенчатый контроль не исключает проведение административно-управленческого и других видов контроля в соответствии с должностными обязанностями руководителей и инженерно-технических работников организаций, а также общественного контроля.

На сегодняшний день утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 21.04.2009 № 138-ст национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.0.007-2009 «ССБТ. Система управления охраной труда в организации. Общие требования по разработке, применению, оценке и совершенствованию», в котором изложен многоступенчатый контроль состояния условий труда на рабочих местах. Причем расписан алгоритм работы руководителей, специалистов, работников организаций, осуществляющих текущий контроль за состоянием условий труда на рабочих местах в виде многоступенчатого механизма контроля. Определенные сведения по данному вопросу содержатся и в других документах.

В ведущих нефтегазовых предприятиях ХМАО – Югры трехступенчатый контроль применяется в следующем виде:

I ступень. Мастер и уполномоченное (доверенное) лицо по охране труда профсоюза обходят все рабочие места ежедневно. Обнаруженные неполадки устраняются немедленно. Для наиболее квалифицированных работников на своем рабочем месте допускается применение самоконтроля с устранением всех обнаруженных отклонений до начала работы.

II ступень. Начальник цеха (большого участка) и уполномоченный по охране труда с инженером по охране труда совершают обход один раз в неделю. Результаты проверки заносят в журнал с назначением исполнителей и установлением срока устранения несоответствия.

III ступень. Комиссия организации изучает состояние охраны труда в подразделении один раз в месяц. По итогам проверки оформляют акт о нарушениях и издают приказ об их устранении.

Сам порядок выполнения работ и назначение ответственных лиц за проведение производственного контроля за охраной труда предусматриваются приказами или распоряжениями руководителя нефтегазового предприятия. Координация работ и организация взаимодействия между подразделениями по обеспечению безопасных методов и здоровых условий труда осуществляются специалистами служб охраны труда нефтегазовых предприятий. На них также возлагается ответственность за организационно-методическую работу по управлению процессом и (или) его отдельными процедурами.

Соответствующие элементы системы контроля выполняются руководителями согласно должностным инструкциям и положениям, утвержденным по структурным подразделениям нефтегазового предприятия.

Руководители подразделений и служб несут ответственность за выполнение и соблюдение мероприятий по безопасности условий труда согласно законодательству и локальным правовым актам нефтегазового предприятия.

Распределяя приоритеты, работодатель кроме общей деятельности должен всегда иметь в виду, что работа рядовых сотрудников осуществляется в большинстве случаев под эгидой непосредственных руководителей. Именно на этом уровне будет вестись большая часть деятельности по внедрению в жизнь политики в области охраны труда.

Причем ответственность работников на каждом уровне организации должна быть четко и логично делегирована. Важна их компетентность для выполнения положений утвержденной политики организации в сфере охраны труда с гарантией, что они понимают и принимают свои обязанности.

В последнее время все чаще используются такие понятия, как культура производства, культура безопасности труда, адресованные непосредственно человеку.

Культура охраны труда напрямую связана с ответственностью и контролем каждым работником своих действий. Ее понимают как совокупность ценностей, отношений, правил, управленческих систем и методов, принципов участия и режимов труда, обеспечивающих создание безопасной и здоровой рабочей среды, влияющей, в свою очередь, на качество и производительность труда. Большое значение для формирования культуры охраны труда имеет Всемирный день охраны труда, который ежегодно проводится 28 апреля под эгидой МОТ.

Граница навыков каждого работника тесно связана с уровнем риска, на который работник готов пойти. Любой человек обладает определенными знаниями о разнообразных типах рисков, хотя многие из них не так очевидны или просто незаметны.

Оценки и мнения в этой области непрерывно меняются, потому что появляются новые технологии, результаты медицинских и научных исследований, изменяются социальные отношения и т. д. А это означает, что безопасность и степень риска на определенном этапе будут зависеть от факторов, определяющихся поведением человека, в основе которого соответствующие знания, квалификация, возможность и желание действовать так, чтобы обеспечить безопасность на рабочем месте. То есть на первый план выступает создание благоприятной производственной среды, стержневым фактором которой являются те или иные аспекты психологического климата коллектива, где главная проблема – исключение производственных стрессов.

Здесь может проявиться несовершенство самого работника (влияние его негативных качеств на микроклимат). Кроме того, работник может фокусировать на себе недостатки используемой им техники и прочие внешние причины, провоцирующие несчастные случаи.

Грамотно проведенный производственный контроль позволит выявить в организации потенциально опасные факторы:

- недостаточную профессиональную подготовку работников,
- слабую организацию какой-то службы,
- конструктивные недостатки оборудования, помещений и т. д.

Если в ходе контроля будет выявлено, что причиной травмирования явился допуск к работе необученного работника, следует выяснить, нет ли таких случаев на других участках. Поэтому по итогам проведения всех видов контроля необходим комплексный сравнительный анализ потенциального риска и опасности возникновения несчастных случаев на производстве и профзаболеваний для принятия должных профилактических мер.

Трехступенчатый контроль за охраной труда логично вписывается в любую из существующих и (или) разрабатываемых систем управления охраной труда нефтегазового предприятия, в том числе и с целью проведения работ по оценке профессиональных рисков.

Обеспечение на приемлемом организационном и техническом уровне безопасных методов и условий проведения работ на всех стадиях производственного процесса – основа любого многоступенчатого контроля за охраной здоровья работников и условиями их труда [2].

Политика ведущих нефтегазовых предприятий округа построена на следующих основных принципах:

Все несчастные случаи можно предотвратить.

Безопасность труда – обязанность каждого.

Руководство несет ответственность за непредотвращение несчастных случаев и профзаболеваний.

Обучение – важный элемент обеспечения безопасности работ.

Изучение причин травматизма и профзаболеваний также важно, как и изучение инцидентов, при которых травматизм отсутствовал.

Профилактика несчастных случаев – эффективное капиталовложение.

Основной задачей системы управления охраной труда ведущих нефтегазовых предприятий округа является переход от реагирования на случаи производственного травматизма и профзаболеваемости к управлению рисками повреждения здоровья работников. С учетом этого значимость работы по улучшению условий и охраны труда на нефтегазовых предприятиях еще более повышается [1].

Литература

1. Практикум по охране труда. 2014. № 4. М. : Охрана труда и социальное страхование, 2014. С. 24–26.
2. Практикум по охране труда 2014. № 5. М. : Охрана труда и социальное страхование, 2014. С. 57–61.
3. Служба охраны труда в организации : практич. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Альфа-Пресс, 2015. С. 3.

УДК 614.841.41.002.71:535.233:622.69

Годовников А. И., Исаков Г. Н.
Godovnikov A. I., Isakov G. N.

**РАСЧЕТ БЕЗОПАСНОГО РАССТОЯНИЯ ОТ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОГНЕННОГО ШАРА ПРИ АВАРИЯХ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ**
**CALCULATION OF SAFE DISTANCE FROM FIREBALL THERMAL RADIATION
IN EMERGENCY AT MAIN PIPELINES**

В данной статье рассмотрен пример расчета теплового излучения огненного шара попутного нефтяного газа. Выявлены зависимости температуры теплового излучения от компонентов смеси, а также посчитано расстояние, при котором возможно проводить мероприятия по организации тушения пожара.

Ключевые слова: огненный шар, расчет теплового излучения, попутный нефтяной газ.

Основная часть газотранспортной системы РФ была построена в 70–80 гг. прошлого века. К настоящему времени износ основных фондов составляет: по линейной части магистральных газопроводов (далее – МГ) 57,2 % [4]. Большая часть магистральных газопроводов имеет подземную конструктивную схему прокладки. На подземные трубопроводы воздействуют коррозионно-активные грунты. Под воздействием коррозионного износа металла уменьшается толщина стенки труб, что, в свою очередь, может привести к возникновению аварийных ситуаций на МГ. Безопасность объектов трубопроводного транспорта должна быть максимально высокой для обеспечения надежных бесперебойных поставок углеводородного сырья, а угроза возникновения аварий – минимизирована.

Основными причинами и факторами, способствующими возникновению аварийных разрывов газопроводов, являются: рост в процессе эксплуатации исходных (до эксплуатации) дефектов (заводской брак труб), не выявленных в ходе испытаний при вводе в эксплуатацию; развитие коррозионных дефектов (атмосферная и почвенная коррозия; стресс-коррозия); механические повреждения тела труб строительной (землеройной) техникой; некачественные выполнения (или отсутствие) диагностических и ремонтных работ.

Как правило, горение возникает от какого-либо источника зажигания. По существу, это только начальная стадия процесса горения, т. е. ее инициирование. Безусловно, указанная стадия важна с точки зрения профилактики пожаров и взрывов, но предотвратить их не всегда удастся. Поэтому для практических работников пожарной охраны большое значение имеет возможность прогнозирования динамики развития горения, а именно: в каком режиме и с какими параметрами будет развиваться пожар или взрыв на реальных объектах. Кроме того, в практической деятельности приходится сталкиваться с необходимостью реставрации картины развития уже происшедших пожаров и взрывов. Для этого необходимо знать основные закономерности процессов распространения, развития горения. Эти сведения необходимы также для правильного выбора наиболее эффективного вида и способа применения огнегасящего средства в конкретных условиях.

Нормальная скорость распространения пламени (u_H) зависит от теплофизических свойств газопаровоздушной смеси. Но в еще большей степени скорость распространения зависит от ее физико-химических свойств – скорости и температуры реакции горения:

$$u_H \sim \sqrt{w(T_r)} \sim \exp\left(-\frac{E}{2RT_r}\right), \quad (1)$$

т. е. (u_n) пропорциональна скорости реакции окисления (w) и обратно пропорциональна температуре горения (T_r). Определяющим параметром, безусловно, будет скорость реакции. Запишем уравнение скорости химической реакции горения:

$$w(T_r) = k_0 c_r^n c_{ок}^\beta \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (2)$$

Рассмотрим, как будет меняться скорость реакций окисления для смесей с разным отношением горючего вещества и воздуха (рис. 1).

Из графика видно, что для смеси стехиометрического состава (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$) скорость реакции окисления максимальна:

$$w(T_r) = w_{стех}. \quad (3)$$

При увеличении концентрации горючего в смеси, когда α становится < 1 , воздух находится в недостатке, и горючее сгорает не полностью, а частично. Поэтому меньше выделится теплоты $Q_{гор}$, а значит T_r снизится.

Скорость реакций окисления по сравнению со стехиометрической уменьшится, причем сразу, из-за снижения и концентрации окислителя O_2 и температуры горения. То есть при последовательном снижении α (что эквивалентно увеличению концентрации $C_{гор}$ в смеси) скорость реакций окисления w и температуры горения T_r будет последовательно снижаться. На графике при $C_{гор} > C_{гор}^{стех}$ кривая становится нисходящей. Значит, при $\alpha > 1$ скорость реакций окисления также снижается, и в целом на графике получается парабола.

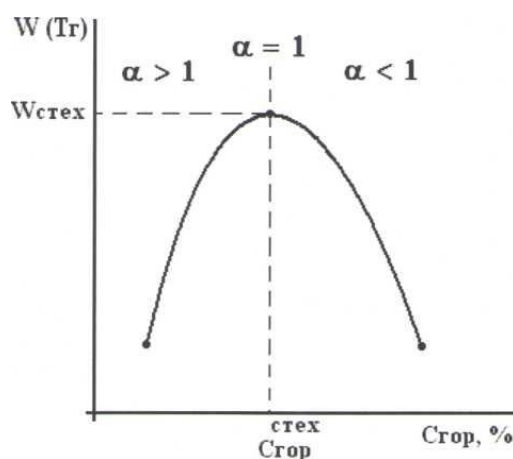


Рис. 1. Зависимость скорости горения от концентрации горючего в смеси

Именно такая зависимость скорости реакции горения от концентрации горючего компонента в исходной смеси предопределяет параболический вид зависимости многих параметров процесса горения от состава смеси: температуры самовоспламенения и минимальной энергии зажигания, концентрационных пределов распространения пламени.

Стоит отметить, что горение природных газов при авариях на магистральных трубопроводах относится к открытым пожарам. Особенностью таких пожаров являются условия тепло- и газообмена. На этих пожарах не происходит «накопления» тепла в газовом пространстве зоны горения. Горение происходит в более естественных условиях, не ограниченных строительными конструкциями. Теплообмен осуществляется практически с неограниченным окружающим пространством. Поэтому за температуру таких пожаров, как правило, принимают температуру пламени, так как она несколько выше температуры внутренних пожаров, где за температуру пожара принимают среднюю температуру газовой среды в помещении.

Газообмен на открытых пожарах также отличается от газообмена на внутренних пожарах. На открытых пожарах он не ограничен конструктивными элементами зданий и сооружений, следовательно, более интенсивен. Поэтому он в большей степени зависит от внешних естественных газовых потоков: интенсивности и направления ветра.

«Огненный шар» представляет собой крупномасштабное диффузионное пламя сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающееся над поверхностью земли. Возникает при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого. Основную опасность при образовании «огненного шара» несёт тепловое излучение. Расчёт теплового излучения производят по формуле:

$$D = 0.0025 \times H_{\phi}^2, \quad (4)$$

где H_{ϕ} – высота пламени попутного нефтяного газа.

Одним из факторов, препятствующих ликвидации пожаров газовых фонтанов, является высокая интенсивность теплового излучения факела пламени. Аварии на магистральных газопроводах с последующим возгоранием протекают в виде вертикального факела газового фонтана.

Рассмотрим пример аварийной разгерметизации магистрального газопровода с последующим загоранием попутного нефтяного газа на территории Вачимского месторождения Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Примем высоту пламени 50 м. Химический состав компонентов попутного нефтяного газа на данном месторождении приведен в табл. 1 [3].

Дебит газового фонтана рассчитываем по высоте факела пламени по формуле (4):

$$D = 0.0025 \times H_{\phi}^2 = 0,0025 \times 50^2 = 6,25 \text{ млн м}^3/\text{сутки} \quad (4)$$

т. е. секундный расход составит $D_c=72,25 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 1

**Химический состав компонентов попутного нефтяного газа
на Вачимском месторождении ХМАО – Югры**

Параметр	Химическая формула	Объемное содержание компонента, %
Метан	CH_4	95
Этан	C_2H_6	2
Пропан	C_3H_8	3
Бутан	C_4H_{10}	–
Пентан	C_5H_{12}	–
Гексаны и высшие	C_6H_{14}	–

Для расчета интенсивности излучения компактного вертикального факела газового фонтана в безветренную погоду нам необходимо вычислить низшую теплоту сгорания (Q_H), опираясь на следствие из закона Гесса.

$$\begin{aligned} Q_H(\text{CH}_4) &= -\{\Delta fH^0_{\text{CO}_2} + 2 \cdot \Delta fH^0_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta fH^0_{\text{CH}_4}\} = \\ &= \{-393,5 + 2 \cdot (-241,8) - (-74,58)\} = 802,29 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} = 32813,5 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Q_H(\text{C}_3\text{H}_8) &= -\{3 \cdot \Delta fH^0_{\text{CO}_2} + 2 \cdot \Delta fH^0_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta fH^0_{\text{C}_3\text{H}_8}\} = \\ &= \{-3 \cdot 393,5 - 2 \cdot 241,8 + 103,85\} = 2043,92 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} = 83595,9 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$Q_H(C_2H_6) = \{2 \cdot \Delta fH^0_{CO_2} + 3 \cdot \Delta fH^0_{H_2O} - \Delta fH^0_{C_2H_6}\} = \\ = \{2(-393.5) + 3(-241.8) - (-8467)\} = 1427,81 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} = 58397,1 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (7)$$

Поскольку в 1 м³ исходной смеси попутного нефтяного газа содержится 95 об. % (0,95) метана, 2 об. % (0,2) этана и 3 об. % (0,3) пропана, то общая теплота сгорания 1 м³ составит:

$$Q_H^{об} = 32813,5 \times 0,95 + 58397,1 \times 0,03 + 83595,9 \times 0,02 = 35252,886 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (8)$$

Стоит учесть, что действительная температура горения всегда ниже адиабатической, так как часть тепла теряется на излучение. Теплотери излучением пламени попутного нефтяного газа могут быть определены по формуле (9):

$$\eta_L = 0,048 \sqrt{M_r} \quad (9)$$

где M_r – молекулярная масса фонтанирующего газа.

Молекулярную массу фонтанирующего газа (M_r), состоящего из нескольких компонентов, можно определить по формуле:

$$M_r = \sum_{i=1}^n M_i \times \varphi_i \quad (10)$$

где M_i – молекулярная масса i -го составляющего компонента газового фонтана;
 φ_i – объемная доля i -го компонента.

$$M_r = M_{CH_4} \times \varphi_{CH_4} + M_{C_3H_8} \times \varphi_{C_3H_8} + M_{C_2H_6} \times \varphi_{C_2H_6} = \\ = 16 \times 0,95 + 44 \times 0,03 + 30 \times 0,02 = 17,12 \text{ г/моль} \quad (11)$$

Тогда, используя формулу (9), находим потери тепла:

$$\eta_L = 0,048 \sqrt{17,12} = 0,198.$$

Для нахождения интенсивности излучения факела пламени фонтана используем формулу (12):

$$q_L = \frac{\eta_L Q_H^{об} D_c}{4\pi R^2} \quad (12)$$

Очевидно что,

$$R^2 = \left(\frac{H_\phi}{2}\right)^2 + L^2 \quad (13)$$

где L – расстояние до устья скважины.

Тогда из (12) следует, что:

$$q_L = \frac{\eta_L Q_H^{об} D_c}{4\pi \left[\left(\frac{H_\phi}{2}\right)^2 + L^2\right]} \quad (14)$$

Для установления зависимости изменения мощности излучения факела пламени фонтана попутного нефтяного газа от расстояния до устья скважины будем задавать $L = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$ м, подставляя в формулу (14) все известные данные. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

$L, \text{ м}$	$q_{\text{пл}}, \text{ кВт/м}^2$
10	55,38
20	39,17
30	26,32
40	18,04
50	12,84
60	9,50
70	7,26
80	5,71
90	4,60
100	3,77

Построив график зависимости (рис. 2) и используя данные табл. 3, устанавливаем, что расстояние, на котором личный состав может работать длительное время с использованием защитных средств составляет более 94 м. Учитывая известные способы ликвидации открытых пожаров попутного нефтяного газа, такое расстояние не приемлемо для эффективных действий по тушению пожаров. И в результате, для организации действий по тушению пожаров попутного нефтяного газа необходимы дополнительные мероприятия по защите личного состава и технических средств тушения, что влечет за собой увеличение сроков ликвидации горения, а также расходов, связанных с этими мероприятиями. Необходима разработка новых, современных технических средств для организации тушения таких пожаров с максимальным уровнем безопасности для людей.

Таблица 3

Степень поражения	Интенсивность теплового излучения, кВт/м ²
Без негативных последствий в течение длительного времени	1,4
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2
Непереносимая боль через 20...30 сек., ожог 1-й степени через 15...20 сек., ожог 2-й степени через 30...40 сек., воспламенение хлопка-волокна через 15 мин	7,0
Непереносимая боль через 3...5 сек., ожог 1-й степени через 6...8 сек., ожог 2-й степени через 12...16 сек.	10,5
Воспламенение древесины с шероховатой поверхностью (влажность 12 %) при длительности облучения 15 мин	12,9
Воспламенение древесины, окрашенной масляной краской по строганной поверхности; воспламенение фанеры	17,0

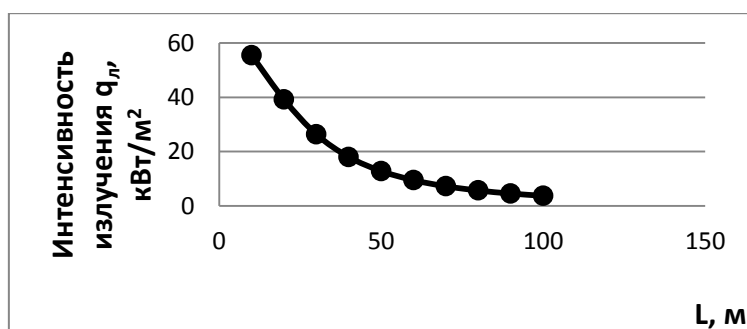


Рис. 2. Зависимость изменения мощности излучения факела пламени фонтана от расстояния до устья скважины

Литература

1. Абдурегимов И. М., Андросов А. С., Исаева Л. К., Крылов Е. В. Процессы горения. М. : РИО ВИПТШ МВД СССР, 1976. 113 с.
2. Абдурегимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М. : РИО ВИПТШ МВД СССР, 1980. 255 с.
3. Исаков Г. Н., Антонюк А. В. Анализ снижения выбросов при сжигании попутного нефтяного газа в газотурбинных установках // Естественные и технические науки. 2013. № 3 (65).
4. Красных Б.А., Мартынюк В. Ф., Сергиенко Т. С., Сорокин А. А., Феоктистов А. А. Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора. М. : Анализ опасностей. 2014. 320 с.
5. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равделя, А. М. Пономаревой. Л. : Химия, 1983. 332 с

УДК 614.841.42:553.97:519.87

Грицков С. Н., Исаков Г. Н.
Grickov S. N., Isakov G. N.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТОРФЯНОГО ПОЖАРА В ПОЛУНАТУРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

HEAT AND MASS TRANSFER SYSTEM ANALYSIS AND SIMULATION MODEL OF PEAT FIRE IN SEMINATURAL EXPERIMENT

В данной работе были получены три математические модели, описывающие процесс развития и распространения торфяного пожара в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры, а также принятые с учетом коэффициента подобия, что позволяет с некой вероятностью утверждать, что данные зависимости описывают рассматриваемый процесс в реальных условиях.

Ключевые слова: системный анализ, имитационная модель, торфяные лесные пожары.

Торф является ценнейшим природным сырьем, которое в настоящий период используется крайне неэффективно. Ежегодно горят торфяники, нанося существенный вред здоровью населения, уничтожая природу и животный мир. Применяемые технологии для тушения торфяных пожаров в настоящий период не обеспечивают ожидаемую эффективность при их тушении. Поэтому борьба с торфяными пожарами имеет чрезвычайно важное социальное, экологическое и экономическое значение.

Торф, сухая подстилка и входящий в неё полуразложившийся валеж, способны загореться даже от искры. Для них характерен беспламенный тип горения, вот почему пожары могут возникать от молний, несмотря на то, что в это время идет дождь. Распространение же горения в слое торфа возможно даже при довольно высокой его влажности, зачастую очаги горения сохраняются длительное время в скрытом состоянии в виде тления.

Бороться с торфяными пожарами невозможно без качественного прогноза пожарной опасности, динамики его развития и распространения. Для достоверности прогнозов динамики развития торфяных пожаров необходимы исходные данные для проведения расчетов. Кроме того, очень важно правильно выбрать методы и системы прогнозирования. Для построения прогностической модели торфяного пожара целесообразно выбрать оперативное моделирование – моделирование распространения и развития торфяных пожаров по неоднородной территории лесной площади.

Для качественного проведения полунатурного эксперимента необходимо проанализировать выбранный участок лесоторфяной местности, выделить основные составляющие величины, которые необходимо перенести на природу с учетом их критерия подобия. Рассмотрим участок лесоторфяной местности площадью 60×40 м. На развитие торфяного пожара непосредственно влияет горячая нагрузка данного участка лесоторфяной местности. Горячая нагрузка её складывается из количества торфа и древесины на единицу площади данного участка.

Для проведения расчетов принимаем, что рассматриваемый участок (природа) покрыт равномерно торфом, причем его средняя глубина залежи (толщина пласта) составляет 2,5 м [6], а его плотность 940 кг/м^3 [7]. Таким образом, объем торфяной залежи на рассматриваемом участке лесоторфяной местности составит в среднем $6\,000 \text{ м}^3$, а его масса $5\,640\,000 \text{ кг}$, т. е. горячая нагрузка торфа составит $2\,350 \text{ кг/м}^2$.

Место проведения эксперимента – полигон ФГКУ «1-й отряд ФПС МЧС России по ХМАО – Югре». Для создания макета участка лесного массива потребуется контейнер размерами $0,6 \times 0,4$ м, земля, торф, листва. Массу веществ, принимающих участие в процессе горения, принимаем в соответствии с их коэффициентом подобия k , который равен отношению геометрических параметров рассматриваемого участка к параметрам макета, и определяем на основании анализа размерностей и следствий из общей теории подобия.

Обозначим участок торфяного пожара переменной F , а его физическую модель переменной F' . На основании теоремы подобия физическая модель F' получается из участка торфяного массива F путем преобразования с коэффициентом подобия k :

$$F = k \cdot F'. \quad (3)$$

Отметим тот факт, что величины площадь и объем имеют коэффициенты подобия соответственно k^2 и k^3 :

$$S(F) = k^2 \cdot S(F'), \quad (4)$$

$$V(F) = k^3 \cdot V(F'). \quad (5)$$

Следовательно, основной величиной физической модели и природы будет являться такая размерность, как длина, измеряемая в метрах, характеризуемая коэффициентом подобия k и определяемая отношением длин природы к длинам макета:

$$k = \frac{60}{0,6} = \frac{40}{0,4} = 10^2. \quad (6)$$

Для создания макета потребуется количество торфа массой m' . Для определения данной величины необходимо вычислить коэффициент подобия, с которым количество торфа массой m будет переходить в подобную ей величину физической модели m' .

Объем торфа определяется по формуле:

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (7)$$

где V – объем торфа (м^3); ρ – плотность торфа (кг/м^3); m – масса торфа (кг).

На основании теории подобия объем торфа можно выразить через объем соответствующего вещества макета с учетом коэффициента подобия:

$$V = k^3 \cdot V', \quad (8)$$

где V – объем торфа (м^3); k^3 – коэффициент подобия; V' – объем торфа (м^3).

В формуле (7) вместо объема торфа подставляем значение объема, выраженного в формуле (8), и получаем:

$$k^3 \cdot V' = \frac{m}{\rho} \quad (9)$$

В результате математических преобразований получаем:

$$V' = \frac{m \cdot k^{-3}}{\rho} \quad (10)$$

Используя допущение, что плотность торфяной природы и плотность торфа, используемых в физической модели одинаковые, определим:

$$V' = \frac{m'}{\rho} \quad (11)$$

Таким образом, на основании выражения (10) и формулы (11) получаем равенство:

$$m' = m \cdot k^{-3}, \quad (12)$$

где m' – масса торфа физической модели (кг); k^{-3} – коэффициент подобия, для переноса массы торфяной природы на макет ($k = 10^2$).

В результате анализа горючей нагрузки участка торфяного участка, проведенного в данной работе, масса пласта торфяной залежи составила 5 640 000 кг. Таким образом, масса количества торфа, необходимого для создания физической модели, будет определяться по формуле (12) и будет равняться:

$$m' = 5640000 \cdot 10^{-6} = 5,64 \text{ кг.}$$

Так как эксперимент по получению данных развития и распространения торфяного пожара проводится в естественных условиях, создание макета с использованием расчетной величины массы торфа, участвующего в горении, не рационально. Горючая нагрузка торфа является основной величиной, характеризующей скорость развития и распространения торфяного пожара физической модели. При изменении количественной характеристики данного параметра следует уделить особое внимание критериям подобия, которые будут оказывать непосредственное влияние на выходящую величину имитационной модели в натуре.

Скорость развития и распространения торфяного пожара, как и любая другая скорость, характеризуется изменением какого-либо параметра в единицу времени, в нашем случае это (м/с). Так как время является величиной, которая имеет постоянное значение в обеих системах, то

$$v' = \left[\frac{m \cdot k}{c} \right] = v \left[\frac{m}{c} \right] \rightarrow v' \cdot k = v, \quad (13)$$

где v' – скорость распространения фронта пожара физической модели (м/с); v – скорость распространения фронта пожара в реальных условиях (м/с); k – коэффициент подобия ($k = 10^2$).

Аналогичный анализ размерностей проведем и со значением горючей нагрузки древесины, которая измеряется в (кг/м²):

$$\Gamma' \left[\frac{\text{кг} \cdot k^3}{\text{м}^2 \cdot k^2} \right] = \Gamma \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right] \rightarrow \Gamma' \cdot k = \Gamma, \quad (14)$$

где Γ' – горючая нагрузка торфа физической модели (кг/м²); Γ – горючая нагрузка торфа в реальных условиях (кг/м²); k – коэффициент подобия ($k = 10^2$).

В результате проведенного анализа размерностей скорости распространения фронта торфяного пожара и горючей нагрузки соответственно природы и физической модели (13) и (14), получаем:

$$\frac{v}{v'} = \frac{\Gamma}{\Gamma'} = k \rightarrow v = v' \cdot \frac{\Gamma}{\Gamma'} \quad (15)$$

Для проведения эксперимента использование расчетного количества торфа вызывает неудобства, в связи с чем для создания физической модели развития и распространения торфяного пожара массу используемого торфа примем равную 2 кг. Таким образом, горючая нагрузка торфа физической модели составит $8,3 \text{ кг/м}^2$, а коэффициент подобия для скорости развития и распространения торфяного пожара на основании формулы (15), составит:

$$k_v = \frac{\Gamma}{\Gamma'} = \frac{2350}{8,3} = 2,83 \cdot 10^2. \quad (16)$$

Для проведения эксперимента потребуется макет торфяного участка психрометр, термометр, компас и измерительные приборы для измерения расстояния, пройденного фронтом пламени (линейка, циркуль измеритель).

Берем количество торфа массой 2 кг (масса торфа, принятая для проведения эксперимента), добытого в реальных условиях и высушенного на открытом воздухе, и укладываем его в контейнер поверх слоя грунта (рис. 1).

Далее покрываем слой торфа слоем листвы и перегноя, имитирующим слой лесной подстилки (рис. 2). На следующем этапе измеряем значения факторов входящих величин, скорость ветра принимаем исходя из метеопокказаний, температуру воздуха по термометру, а его влажность по психрометру и производим поджог в центре макета. Далее следим за динамикой развития и распространения физической модели торфяного пожара (рис. 3), а также фиксируем результаты измерения пути пройденного фронтом пламени S за период времени t .



Рис. 1. Слой торфа в макете
натурного эксперимента



Рис. 2. Слой, имитирующий слой
лесной подстилки

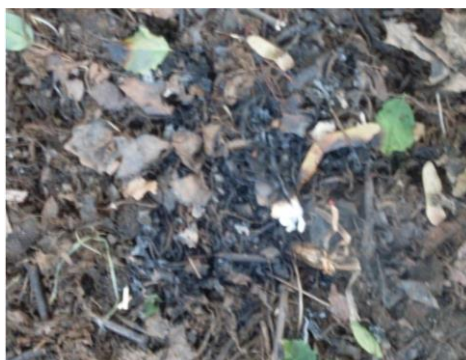


Рис. 3. Динамика развития торфяного пожара

В ходе измерений результатов натурного эксперимента, проведенного в количестве тридцати опытов, была составлена табл. 1, в которой показана средняя скорость развития и распространения торфяного пожара в каждом из опытов и соответствующие ей погодные условия (скорость ветра, температура воздуха, влажность воздуха).

Таблица 1

Результаты эксперимента по развитию и распространению торфяного пожара

№ п/п	Дата и время проведения эксперимента	Условия эксперимента			Результаты		
		Скорость ветра V^B , м/с	Влажность воздуха f , %	Направление Ветра (метеорологическое)	Температура воздуха t , °С	Путь, пройденный огнем (мм) за время (ч) S/t	Средняя скорость развития фронта пламени V^n , мм/ч
1	09:00 10.07.15	4	37	ЮВ	+27	110/3	36,6
2	14:00 10.07.15	4	35	Ю	+29	145/3	48,3
3	09:30 11.07.15	6	35	ЮЗ	+30	160/2	80
4	13:30 11.07.15	6	31	ЮЗ	+31	175/2	87,5
5	09:00 12.07.15	3	50	С	+25	65/3	21,6
6	14:30 12.07.15	3	39	СЗ	+27	110/3	36,6
7	09:30 13.07.15	3	48	СВ	+27	85/3	28,3
8	15:00 13.07.15	2	37	В	+28	70/3	23,3
9	19:00 13.07.15	1	69	–	+22	48/3	16
10	09:30 14.07.15	3	48	В	+27	90/3	30
11	13:00 14.07.15	5	42	СВ	+28	125/3	41,6
12	09:30 15.07.15	4	45	В	+27	115/3	38,3
13	14:00 15.07.15	5	35	В	+29	140/3	46,6
14	10:00 16.07.15	5	61	В	+25	125/3	41,6
15	15:00 16.07.15	6	48	ЮВ	+28	130/3	43,3
16	09:30 17.07.15	5	39	ЮВ	+27	125/3	41,6
17	13:30 17.07.15	6	27	ЮВ	+31	170/3	56,6
18	17:00 17.07.15	3	45	В	+27	100/3	33,3
19	09:00 18.07.15	4	24	ЮЗ	+32	120/3	40
20	14:00 18.07.15	4	27	Ю	+31	125/3	41,6
21	18:00 18.07.15	4	41	ЮВ	+25	115/3	38,3
22	09:00 19.07.15	2	26	–	+32	80/3	26,6
23	14:30 19.07.15	1	26	–	+33	85/3	28,3
24	10:00 20.07.15	4	29	СВ	+32	135/3	45
25	16:00 20.07.15	8	42	ЮЗ	+27	180/1,5	120
26	09:30 21.07.15	4	51	СЗ	+27	105/3	35
27	14:30 21.07.15	4	58	З	+26	95/3	31,6
28	18:00 22.07.15	3	61	З	+23	85/3	28,3
29	09:00 22.07.15	5	42	СЗ	+27	120/3	40
30	13:30 22.07.15	6	40	З	+28	120/3	40

Метод наименьших квадратов обычно упоминается в двух контекстах. Во-первых, широко известно его применение в регрессионном анализе как метода построения моделей на основе экспериментальных данных. При этом помимо собственно построения модели обычно осуществляется оценка погрешности, с которой были вычислены её параметры, иногда решаются и некоторые другие задачи. Во-вторых, метод наименьших квадратов часто применяется просто как метод аппроксимации, без какой-либо привязки к статистике. В Excel он реализуется при помощи диаграммы и линии тренда.

Таким образом, на основании результатов экспериментов, представленных в табл. 1, с помощью программы Microsoft Excel построим графики зависимостей величины скорости развития и распространения торфяного пожара от величин, характеризующих условия эксперимента, и определим функции, приближенно описывающие рассматриваемый процесс с наиболее высоким из возможных коэффициентов достоверности аппроксимации.

На рисунке 4 представлен график скорости движения фронта пламени торфяного пожара в зависимости от скорости ветра (жирная линия). Данный график с высоким коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9968$ приближен к линии тренда (тонкая линия), которая определена полиномом 4-го порядка, а именно функцией:

$$y = 0,0471x^4 - 0,4387x^3 + 2,104x^2 - 0,4461x + 20,675. \quad (17)$$

Таким образом, на основании коэффициента достоверности аппроксимации и шкалы Чеддока [3] можно утверждать, что функция линии тренда подобрана с *весьма высокой* точностью относительно исходных данных, в которой значением функции является значение скорости развития и распространения торфяного пожара (мм/ч), а аргументом является величина скорости ветра (м/с).

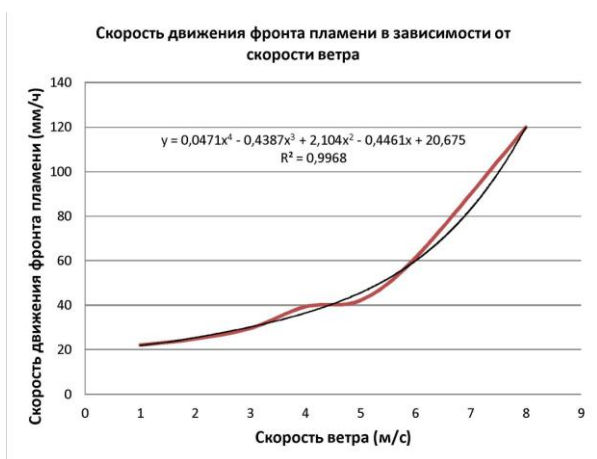


Рис. 4. График скорости движения фронта пламени в зависимости от скорости ветра

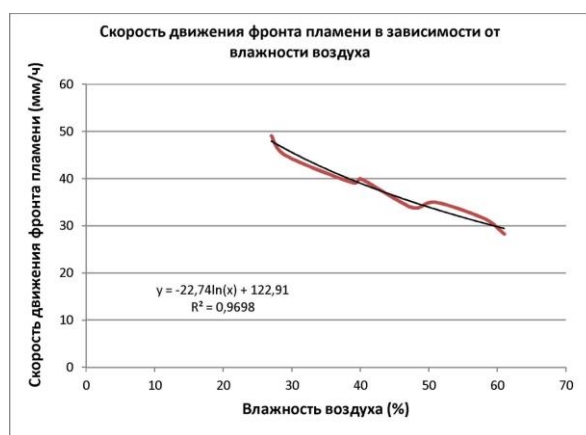


Рис. 5. График скорости движения фронта пламени в зависимости от влажности воздуха

На рис. 5 построен график скорости движения фронта пламени в зависимости от влажности воздуха (жирная линия). Предварительно проведенный анализ статистических данных развития и распространения торфяного пожара показал значительный разброс значений данной величины. Очевидно, что это является следствием того, что преимущественное влияние на данный процесс оказывает скорость ветра, что также следует из рис. 6, по которому видно, что значениям влажности воздуха, в которых наблюдается всплеск значений скорости развития и распространения торфяного пожара, соответствует высокая скорость ветра или его отсутствие.



Рис. 6. График скорости движения фронта пламени в зависимости от температуры окружающего воздуха

Кроме этого, данное явление может происходить по ряду других причин, не учтенных в эксперименте и требующих дополнительных исследований. В результате чего, значения, не поддающиеся логическому смыслу, были исключены, как ошибки эксперимента. К данному графику была проведена линия тренда (тонкая линия) с *весьма высокой точностью* [3] и коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9698$, которую описывает логарифмическая функция вида:

$$y = -22 \ln n(x) + 122,91. \quad (18)$$

Кроме этого, данное явление может происходить по ряду других причин, не учтенных в эксперименте и требующих дополнительных исследований. В результате чего, значения, не поддающиеся логическому смыслу, были исключены, как ошибки эксперимента. К данному графику была проведена линия тренда (тонкая линия) с *весьма высокой точностью* [3] и коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9698$, которую описывает логарифмическая функция вида:

$$y = -22 \ln n(x) + 122,91. \quad (18)$$

График скорости движения фронта пламени в зависимости от температуры воздуха (жирная линия), представленный на рисунке 6, приближен к линии тренда (тонкая линия) с *высокой точностью* [3], о чем свидетельствует коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,8548$, и определена данная линия тренда экспоненциальной функцией вида:

$$y = 1,3469 \cdot e^{0,1236x}. \quad (19)$$

Таким образом, на основании экспериментальных данных, полученных в результате натурального эксперимента и метода наименьшего квадрата, реализованного с помощью программы Microsoft Excel, были выведены математические зависимости (20), (21) и (22), описывающие скорость развития и распространения торфяного пожара физической модели, соответственно, в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры. Во всех трех моделях выходящая величина функции, а именно: скорость развития и распространения торфяного пожара – измеряется в мм/ч.

Выше в данной работе был определен коэффициент подобия $k_v = 2.83 \cdot 10^2$ для перехода от скорости развития и распространения торфяного пожара физической модели к скорости торфяного пожара в реальных условиях. Следовательно, с учетом данного коэффициента функции, описывающие рассматриваемый процесс, примут следующий вид:

$$V_{\Pi} = 0,0133293(v_{\text{в}})^4 - 0,1241521(v_{\text{в}})^3 + 0,595432(v_{\text{в}})^2 - 0,1262463(v_{\text{в}}) + 5,851025, \quad (20)$$

где V_{Π} – скорость развития и распространения торфяного пожара (м/ч); $v_{\text{в}}$ – скорость ветра (м/с).

$$V_{\Pi} = -6,43542 \ln(f) + 34,78352, \quad (21)$$

где f – влажность воздуха (%).

$$V_{\Pi} = 1,3469e^{0,1236t}, \quad (22)$$

где t – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$).

На основании результатов эксперимента были построены графики скорости развития и распространения торфяного пожара, и на основании метода наименьших квадратов, реализованного с помощью Microsoft Excel, были определены функции наиболее точно из возможных описывающие данные процессы.

В результате, в данной работе были получены три отдельные математические модели (20), (21) и (22), описывающие процесс развития и распространения торфяного пожара в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и его температуры, а также принятые с уче-

том коэффициента подобия, что позволяет с некой вероятностью утверждать, что данные зависимости описывают рассматриваемый процесс в реальных условиях.

Литература

1. Грицков С. Н., Исаков Г. Н. Влияние торфяных пожаров на экологическую обстановку в Уральском федеральном округе // Биотические компоненты экосистем : науч. симпозиум V междунар. эколог. конгресса «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕЛРПТ 2015». Т. 2. С. 2015.
2. Гришин А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика. 2008. № 2 (3).
3. Ефименко В. М. Лесная таксация : практич. пособие по выполнению лабораторных работ для студ. спец. 1-75.01.01 Лесное хозяйство. М., 2013.
4. Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск : ИЛиД СО АН СССР, 1970. С. 3–5.
5. Коммерсант. URL: <http://www.kommersant.ru/doc/1652518> (дата обращения: 20.04.2016).
6. Торф. Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/t/torf>. (дата обращения: 20.04.2016).

УДК 614.841.411:691.11:519.87

Гришин А. М., Зима В. П., Касымов Д. П.
Grishin A. M., Zima V. P., Kasymov D. P.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ СТРОЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

FIRE HAZARD SYSYEM ANALYSIS OF WOOD CONSTRUCTION ELEMENTS ON EXPOSURE TO WILDFIRE

В лабораторных условиях исследована пожарная опасность деревянных образцов различного профиля (плоский и оцилиндрованный образец) с применением термометрического метода. Экспериментально определено различие влияния очага горения на плоские и оцилиндрованные образцы из березы.

Ключевые слова: горение, древесина, пожарная опасность, воспламенение, пожары в условиях жилой застройки.

Во многих случаях результатом действия природных пожаров является воспламенение с последующим горением деревянных строений в населенных пунктах. Несмотря на все принимаемые меры, природные пожары наносят огромный ущерб инфраструктуре района, подверженно-го воздействию огненной стихии, то есть безопасность имеет системный характер [2–5].

Многочисленные теоретические [1; 5; 9; 14] и экспериментальные исследования [8; 10–11; 13; 15–16] по изучению влияния пожаров не дают ответа по механизму перехода пожара на деревянные конструкции, их загорание и последующее горение. Согласно [6] древесина представляет собой пористую реакционноспособную среду, физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении.

В связи с этим представляет интерес исследование пожарной опасности деревянных конструкций [12]. Результаты исследования воспламеняемости образцов древесины могут

быть использованы для уточнения характеристик системной безопасности при застройке, а также при разработке способов и устройств по локализации и тушению природных пожаров [2]. Теоретические исследования базируются на моделях реагирующих сред [3] с использованием экспериментальных данных. Эксперимент направлен на изучение в лабораторных условиях зажигания образцов древесины различной формы в результате воздействия фронта лесного пожара для установления характеристик пожарной опасности.

В данной работе для реализации эксперимента использовался испытательный комплекс по исследованию лесных, степных и торфяных пожаров [4], представляющий собой короб-полигон, наполненный землей и имеющий следующие размеры: длина – 2 м, ширина – 1,5 м, высота – 0,13 м. Для регистрации входных значений, поступающих с термопар, использовалась автоматизированная система сбора и регистрации данных, состоящая из компьютера, пятиканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с подключаемыми термопарами типа (К) ХА (хромель-алюмель, диаметр спая 250 мкм). Погрешность измерения термопар составила 1,5 %. Влажность образцов контролировалась с помощью анализатора влажности A&D MX-50 с точностью 0,01 %, масса образцов – электронными весами A&D HL-400.

Все образцы древесины (в качестве образцов бралась береза и лиственница) предварительно высушивались в сушильном шкафу ШСП 0,5-200 при температуре 100°C . В качестве очага горения, моделирующего низовой лесной пожар, использовалась хвоя сосны. Во время экспериментов влагосодержание древесины составило 4,5, слоя лесных горючих материалов (ЛГМ) – 6,5 %.

Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали $\delta W/W \cdot 100\% \leq 3,3\%$, $\delta m/m \cdot 100\% \leq 1,5\%$, $\delta T/T \cdot 100\% \leq 4,3\%$.

На рис. 1 представлена схема эксперимента по воздействию фронта низового лесного пожара на модель деревянной стены в лабораторных условиях.

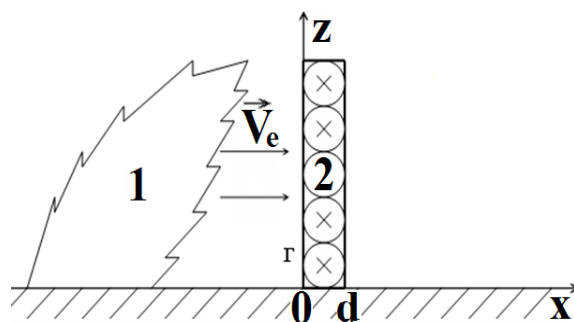


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:
1 – фронт низового лесного пожара; 2 – образец древесины

Подготовка к экспериментам проходила в следующей последовательности. На предварительно уложенный в короб грунт располагали слой лесных горючих материалов (ЛГМ) массой 50 г (степных горючих материалов), а сразу за ним образец древесины, имитирующий плоскую стенку. С тыльной части образца устанавливались четыре термопары (хромель-алюмель, диаметр спая 250 мкм). Одна в центре модели и три термопары на одной горизонтальной оси на расстоянии 1 см от нижнего края модели. Слой ЛГМ поджигался с помощью спирали накаливания. В качестве испытуемых образцов использовались береза и лиственница.

Результаты эксперимента. Результаты экспериментальных исследований воздействия модельного низового лесного пожара на плоские образцы древесины из березы представлены на рис. 2.

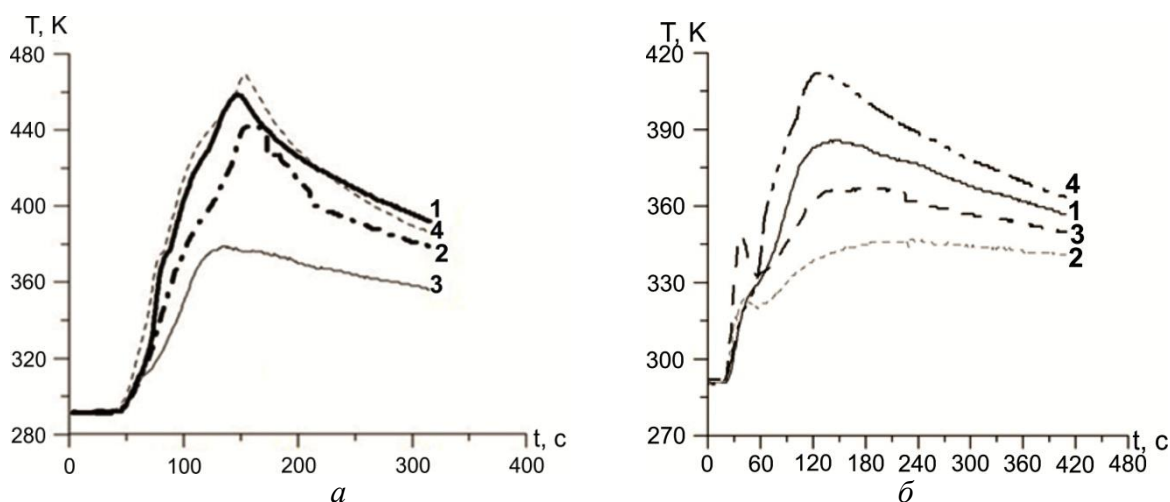


Рис. 2. Зависимости изменения температуры от времени у поверхности плоских деревянных образцов из березы: *a* – в отсутствии ветра, *б* – скорость ветра 3 м/с

Видно, что термопары 1–4 практически одновременно начинают регистрировать увеличение после 50 секунд с начала воздействия очага горения на образец (рис. 2*a*). При выбранном запасе ЛГМ имело место частичное обугливание образца древесины.

Установлено, что при действии воздушного потока (рис. 2*б*) температура достигает максимума через 110 секунд. Следует отметить наличие пульсаций пламени на показания термопар в интервале 50–80 с. Наличие воздушного потока $1 \leq v_{\text{в}} \leq 3$ м/с не позволяло воспламенить образец. Воздействие же воздушного потока приводило к тому, что пламя охватывало образец древесины по боковым поверхностям, в результате чего они обугливались.

На рис. 3 представлено изменение температуры на поверхности плоского образца из сосны. Первыми начинают регистрировать термопары 2 и 4. Термопары 1, 3, располагающиеся слева и справа в нижней части образца, начинают фиксировать изменение температуры через 5–7 секунд после термопар 2 и 4, что также, возможно, связано с пульсациями факела пламени.

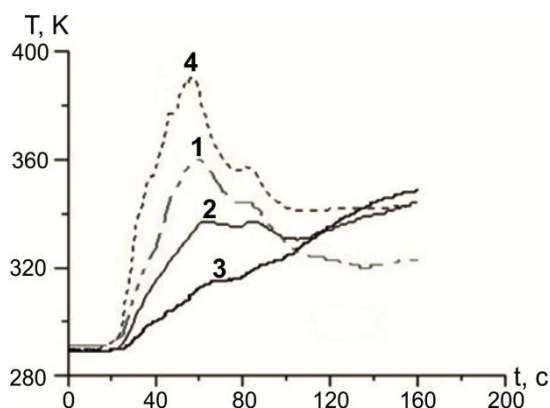


Рис. 3. Зависимость изменения температуры от времени у поверхности плоского деревянного образца из сосны в отсутствии ветра

В результате было экспериментально исследовано воздействие очага горения на плоские и оцилиндрованные образцы из березы и сосны термопарным методом. Он экономичен и прост в аппаратном отношении, быстроспроизводим и позволяет измерять температуру в локальных точках исследуемого пространства (образца) в динамических условиях (при изменяющейся частоте воздействия) [7]. Установлено, что наибольшему воздействию как низового лесного, так и степного пожара в большей степени подвержена центральная часть об-

разцов. С помощью термопарного метода определена температура на поверхности образцов древесины березы и сосны, подверженной воздействию очага горения, которая составила: 460–470 К – для плоских образцов; 400–410 К – для оцилиндрованных образцов. Как следует из работы [6], эти температуры не приводят к зажиганию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 14-01-00211_a).

Литература

1. Голованов А. Н., Якимов А. С., Абрамовских А. А., Суков Я. Р. О математическом моделировании теплофизических процессов зажигания и тления торфа // Теплофизика и аэромеханика. 2008. № 4. Т. 15. С. 699–710.
2. Гришин А. М., Зима В. П., Касымов Д. П. Методы и устройства для тушения природных пожаров в рамках новой концепции борьбы с природными и техногенными катастрофами // Инженерно-физический журнал. 2014. № 4. Т. 87. С. 759–766.
3. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Томск : Изд-во Томск. ун-та. 1981. 277 с.
4. Гришин А. М., Зима В. П., Кузнецов В. Т., Лобода Е. Л., Фильков А. И. Комплекс экспериментальных установок для исследования природных пожаров // Известия высш. учеб. заведений. Физика. 2009. № 2 (2). Т. 52. С. 84–89.
5. Гришин А. М., Якимов А. С. Математическое моделирование процесса зажигания древесины // Теплофизика и аэромеханика. 2013. № 4. Т. 20. С. 473–486.
6. Исаков Г. Н. Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 142 с.
7. Исаков Г. Н., Манаева А. Р. Системный анализ вопросов безопасности применения напольных покрытий и математическая модель процессов их терморазрушения // Управление и высокие технологии : Прикаспийск. журн. 2015. № 1. С. 30–43.
8. Перминов В. А. Математическое моделирование лесных пожаров: возникновение верховых и массовых лесных пожаров. Saarbrücken (Germany) : Lambert Academic Publishing, 2011. 292 с.
9. Cohen J. D. Preventing disaster: Home ignitability in the wildland-urban interface // Journal of Forestry. 2000. № 3 (98). P. 15–21.
10. Grishin A. M., Filkov A. I. A Model of Prediction of Forest Fire Hazard // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2003. № 5 (76). P. 1139–1144.
11. Grishin A. M., Fil'kov A. I. A Deterministic-probabilistic System for Predicting Forest Fire Hazard // Fire Safety Journal. 2011. V. 46. P. 56–62.
12. Grishin A. M., Filkov A. I., Loboda E. L. et al. A Field Experiment on Grass Fire Effects on Wooden Constructions and Peat Layer Ignition // International Journal of Wildland Fire. 2014. V. 23 (3). P. 445–449.
13. Kuznetsov V. T., Fil'kov A. I. Ignition of Various Wood Species by Radiant Energy // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2011. Vol. 47. №. 1. P. 65–69.
14. Mell W. E., Manzello S. L., Maranghides A., Butry D., Rehm R. G. The wildland–urban interface fire problem – current approaches and research needs // International Journal of Wildland Fire. 2010. № 19. P. 238–251.
15. Perminov V. A. Mathematical simulation of the origination and propagation of crown fires in averaged formulation // Technical Physics. 2015. V. 60. № 2. P. 180–187.
16. Rossi J.-L., Chetehouna K., Collin A., Moretti B., Balbi J.-H. Simplified flame models and prediction of the thermal radiation emitted by a flame front in an outdoor fire // Combustion Science and Technology. 2010. Vol. 182. P. 1457–1477.

УДК 614.842/.847:519.87

Исаков Г. Н.

Isakov G. N.

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРИ НЕУПРАВЛЯЕМОЙ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

ANALYSIS AND MODELLING OF CONSEQUENCES OF UNCONTROLLED EVACUATION IN CASE OF FIRE

Случаи движения больших масс в узких проходах, которые следует преодолевать с максимально возможными скоростями, в людской практике встречаются часто на выходах из стадионов, площадей или как в случае, рассмотренном в статье, в чрезвычайных обстоятельствах. Когда плотность толпы превышает определенное значение, проявляется возможность рассматривать ее, как сплошной поток, в котором могут работать законы гидравлики. Это позволяет моделировать последствия при эвакуации людей при пожаре. В дальнейшем можно выработать формализованный аппарат для математического моделирования последствий в подобных ситуациях.

Ключевые слова: пожар, эвакуация людей, анализ последствий.

В последнее время как в России [4], так и во всем мире [7] участились пожары в местах массового скопления народа (вечера, дискотеки, торжества и т. п.), повлекшие гибель большого количества людей.

Связано это с грубыми нарушениями правил пожарной безопасности [5]. Так, например, в п. 42 и 43 Правил [5] четко сказано, что в помещениях с одним эвакуационным выходом одновременное пребывание 50 и более человек не допускается. Если же число людей, одновременно находящихся в залах зданий и сооружений с массовым пребыванием людей, превышает 50 человек, то их количество определяется нормами проектирования исходя из условия обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре. Кроме того, при организации и проведении праздников и других мероприятий (см. п. 50 Правил [5]) с массовым пребыванием людей запрещается применять дуговые прожекторы, свечи и хлопушки, устраивать фейерверки и другие световые пожароопасные эффекты, которые могут привести к возгоранию.

Так, в Перми в ночном клубе «Хромая лошадь» 5 декабря 2009 г. в 01 : 08 местного времени произошло возгорание декора из ивовых прутьев и холста, расположенных на потолке. Источником зажигания послужил фейерверк из так называемого холодного огня [4], искры от которого ударили в потолок, а распространению пламени способствовали пенопласт, пыль и пластиковая отделка стен. В это время в ночном клубе находилось 300 человек вместо 50 положенных, на которое рассчитано данное увеселительное заведение. Поэтому запасной эвакуационный выход на случай пожара отсутствовал, и в соответствии с планом ночного клуба «Хромая лошадь» имелся лишь черный выход через кухню, о котором знали лишь кухонные работники, администрация клуба и, вероятно, артисты, выступавшие на эстраде. После сообщения ведущего шоу-программы о пожаре посетители ринулись через дверь в фойе, а затем через узкий коридор к основному выходу; в результате началась паника и давка, при этом аварийное освещение отсутствовало. Общее количество погибших непосредственно в ходе пожара достигло 111 человек, причем около половины – в узком коридоре и в дверях основного выхода. Общее количество пострадавших составило 234 человека, в том числе 156 погибших [4].

Аналогичные катастрофы, связанные с использованием пиротехники и с нарушением правил пожарной безопасности, произошли также и в других государствах, например [1; 2]:

- 30 декабря 2004 г., клуб «Republika Cromapon», Буэнос-Айрес, Аргентина, погибло 194 человека;

- 20 февраля 2003 г., клуб «Station», Вэст-Уорик, штат Род-Айленд, США, погибло 100 человек. Здесь так же, как и в «Хромой лошади» использовалась пиротехника во время выступления рок-группы. От искр воспламенились стены и потолок, отделанные пенопластом. В панике большинство посетителей пытались спастись через узкий главный выход, что привело к повышению плотности людского потока, т. е. к давке и гибели.

По аналогии с теорией гидравлического удара (ГУ) в жидкости [2; 3] рассмотрим периоды развития ГУ в людском потоке, движущемся в узком проходе по направлению от фойе к выходу (рис. 1).

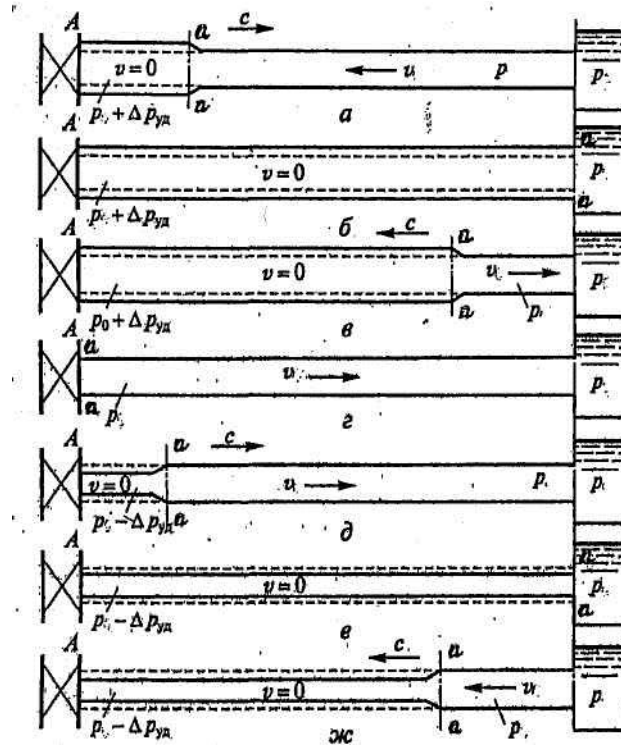


Рис. 1. Стадии (а...ж) гидравлического удара

Первый период. Пусть в некоторый момент $t = 0$ в дверях на выходе образуется затор. Людской поток возле двери останавливается, а остальная масса людей в проходе продолжает двигаться с прежней скоростью v . С течением времени возле двери начинает скапливаться неподвижная масса людей, т. е. фронт остановившихся людей будет перемещаться от двери к выходу в фойе и далее в основное помещение ночного клуба. Обозначим этот фронт остановившихся людей $a - a'$, тогда в образовавшемся объеме между этим фронтом и затором в дверях возникает дополнительное давление Δp . Этот фронт сжатия будет перемещаться в сторону, противоположную от двери, со скоростью распространения ударной волны $C_{лп}$ [2; 6]. Рассматриваемый процесс послонного сжатия людского потока будет продолжаться до тех пор, пока ударная волна не дойдет до конца узкого прохода длиной l . В конце этого периода весь людской поток в проходе неподвижен, сжат до давления $p + \Delta p_{уд}$, а в проход фойе успевает забежать еще некоторое количество людей.

Второй период. Он начинается с расширения людского потока и их оттоком со скоростью v из узкого прохода. Сначала приходят в движение люди, находящиеся вблизи фойе, а затем двинутся в обратном направлении следующие за ними и т. д. Образованный таким об-

разом фронт спада давления $a - a$ начнет перемещаться от фойе к выходной двери со скоростью $C_{ЛП}$. К концу фазы $t = 2l/C_{ЛП}$ давление в людском потоке восстанавливается до первоначального.

Третий период. Он характеризуется тем, что вблизи выходной двери образуется фронт $a - a$ пониженного давления ($p - \Delta p_{y\delta}$) в движущемся в обратном направлении со скоростью v людском потоке. Фронт перемещается со скоростью $C_{ЛП}$ движется в сторону фойе и продолжается до тех пор, пока фронт разрежения $a - a$ не дойдет до фойе.

Четвертый период. Он определяется тем, что образовавшийся в узком проходе фронт разрежения ($p - \Delta p_{y\delta}$) движется по людскому потоку со скоростью $C_{ЛП}$ до восстановления первоначального давления p .

Расчет ударного давления. Обозначим сжатый слой в людском потоке между выходом и фронтом $a - a$ длиной Δl . Внезапно остановившаяся масса людей в этом объеме теряет за Δt количество движения

$$mv = \rho \cdot S_{np} \cdot \Delta l \cdot v, S_{np} = b \cdot h, \quad (1)$$

где S_{np} – площадь поперечного сечения прохода шириной b на высоте среднестатистического роста человека $h \approx 1,7$ м; ρ, v – плотность и скорость людского потока в узком проходе шириной b ; m – масса людей в потоке при эвакуации через узкий проход.

Импульс силы за тот же промежуток времени Δt равен

$$\Delta F = \Delta p_{y\delta} \cdot S_{np} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где произведение $\Delta p_{y\delta} \cdot S_{np} = F$ – сила, остановившая людской поток при внезапном заторе в дверях на выходе за время Δt . Приравняем количество движения (1) к импульсу (2), возникшему при внезапной остановке людского потока в дверях,

$$\rho \cdot S_{np} \cdot \Delta l \cdot v = \Delta p_{y\delta} \cdot S_{np} \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Разрешив (3) относительно $\Delta p_{y\delta}$, получим

$$\Delta p_{y\delta} = \rho \cdot v \cdot \Delta l / \Delta t. \quad (4)$$

Так как скорость распространения ударной волны в сжатом слое людского потока

$$C_{ЛП} = \Delta l / \Delta t, \quad (5)$$

тогда окончательно запишем

$$\Delta p_{y\delta} = \rho \cdot v \cdot C_{ЛП}. \quad (6)$$

Эта формула впервые получена Н. Е. Жуковским для определения наибольшего давления при гидравлическом ударе в водопроводе при быстром закрытии задвижек. Он показал [3], что скорость распространения ударной волны в воде

$$C_o = \sqrt{E_o / \rho_{ж}}, \quad (7)$$

где E_o – модуль упругости воды, $\rho_{ж}$ – плотность воды.

По аналогии с исследованиями Н. Е. Жуковского оценим $\Delta p_{y\delta}$ в людском потоке, взяв значение модуля упругости E для резины [6]

$$C_{ЛП} = \sqrt{E / \rho_{ЛП}}, \text{ где } E = 6 \text{ МПа.} \quad (8)$$

Результаты расчетов ударных давлений $\Delta p_{y\delta}$ в зависимости от скорости движения, скорости звука и плотности людского потока в предположении его несжимаемости приведе-

ны в таблице. В качестве аналога человеческому телу по модулю упругости E и скорости звука взята резина в диапазоне возможных изменений $\rho = 300 \div 1\,000$ кг/м³ (пористая резина, каучук, твердая резина и т. д.) [2; 6]. Предполагается также, что скорость движения (бега) людей при неуправляемой эвакуации во время пожара может достигать 50 % от скорости бегуна-спортсмена на короткие дистанции, которая составляет ~ 10 м/с.

Таблица 1

Зависимость ударного давления $\Delta p_{y\delta}$ (кПа) от плотности $\rho_{лп}$ (кг/м³), скорости движения v (м/с) и скорости звука $C_{лп}$ (м/с) в людском потоке

$\rho_{лп}$	300			500			1000		
$C_{лп}$	141,4			109,5			77,46		
v	1,5	3	5	1,5	3	5	1,5	3	5
$\Delta p_{y\delta}$	63,6	127,3	254,6	82,2	164,3	328,6	116,2	232,4	464,8

Из табличных данных следует, что при плотности людского потока $\rho_{лп} \geq 300$ кг/м³ избыточное давление потока $\Delta p_{y\delta}$ превышает 200 кПа, что приводит к смертельным последствиям до 10 % и более [1; 2]. Если же плотность $\rho_{лп} \geq 1000$ кг/м³, то смертность превышает 50 % [7]. Все это имело место во время давки при пожаре в ночном клубе «Хромая лошадь» [4]. По-видимому «гидравлический удар» в людском потоке при эвакуации послужил причиной гибели более 50 % погибших непосредственно в ходе пожара [4].

Выводы:

1. По аналогии с гидравлическим ударом в несжимаемой жидкости, движущейся в трубопроводе с жесткими стенками, предложено рассматривать явление «гидравлического удара» в движущемся людском потоке при эвакуации по узким проходам.
2. Проведен расчет ударных давлений $\Delta p_{y\delta}$ в людском потоке при различных плотностях и скоростях движения, причем 50 % смертности наблюдается при плотности более 1 000 кг/м³ и скорости движения 5 м/с.
3. Анализ полученных данных дает основание предполагать, что основной причиной 50 % и более погибших во время неуправляемой эвакуации в ходе пожара явился «гидравлический удар» в людском потоке. Это имело место как в России (ночной клуб «Хромая лошадь», г. Пермь), так и в других странах (Аргентина, г. Буэнос-Айрес; США, г. Вэст-Уорик).

Литература

1. Емельянов В., Зиемелиис М., Сулоева Е. Проблемы определения категории помещений на взрывопожароопасность и зон взрывопожароопасности // Белые ночи – 2008 : сб. материалов юбилейных науч. чтений. СПб. : Изд-во МАНЭБ, 2008. Т. 2. С. 456–460.
2. Исаков Г. Н. О явлении «гидравлического удара» в людском потоке при эвакуации во время пожара // Фундамент. и прикладн. проблемы соврем. Механики : сб. материалов науч. конф. Томск : Изд-во ТГУ, 2011. С. 449–451.
3. Лепешкин А. В., Михайлин А. А. Гидравлические и пневматические системы: учебник. 3-е изд. М. : Академия, 2006. 336 с.
4. Пожар в клубе «Хромая лошадь». URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Хромая_лошадь/ (дата обращения: 20.04.2016).
5. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. Введ. 30 июня 2003 г.
6. Теплотехнический справочник / под ред. В. Л. Юренева, П. Д. Лебедева. 2-е изд., перераб. М. : Энергия, 1976. Т. 2. С. 79.
7. Топ – 10 пожаров в ночных клубах мира // Коммерсантъ. 2009. 12 июл.

УДК 692.236:697.1:536.2:004

Карауш С. А., Вагин Д. О.
Karaush S. A., Vagin D. O.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА МИКРОКЛИМАТ ПОМЕЩЕНИЙ ЗДАНИЙ ПРИ ОТКАЗАХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

THERMAL RESISTANCE EXTERIOR WALL ENVELOPES INFLUENCE ON MICRO-CLIMATE IN CASE OF HEAT SUPPLY SYSTEM FAILURES

Определён уровень влияния теплоустойчивости ограждающих конструкций на микроклимат помещений зданий при отказах систем теплоснабжения. Разработана программа на языке программирования javascript для расчёта времени остывания наружных ограждающих конструкций при внезапных отказах систем теплоснабжения.

Ключевые слова: наружная ограждающая конструкция, теплоустойчивость, микроклимат, тепловая инерция, безопасность.

Ежегодно на объектах ЖКХ происходит до 200 тыс. аварий, десятки из которых являются крупными и приходится на системы теплоснабжения. В некоторых случаях срок ликвидации последствий может превышать 36 ч [1]. Как правило, причинами аварий теплосетей является износ трубопроводов из-за эксплуатации их сверх нормативного срока. Риск возникновения подобных чрезвычайных ситуаций особенно подвержены районы нашей страны с низкими среднемесячными температурами в зимний период вследствие эксплуатации систем теплоснабжения при повышенных нагрузках. Последствия таких крупных аварий затрагивают, как правило, десятки объектов соцкультбыта и многоквартирных жилых домов. Требования современных нормативных документов по тепловой защите зданий [8; 6] не регламентируют способность материалов ограждающих конструкций сохранять относительное постоянство температуры на внутренней поверхности стены при внезапных отказах систем теплоснабжения. Однако показатель уровня теплоустойчивости представляет важное практическое значение при планировании и проведении мероприятий по предотвращению подобных аварий.

Одним из требуемых параметров ограждающих конструкций является термическое сопротивление R [8], величина которого для стен имеет обратную зависимость от коэффициента теплопроводности λ . Показатель λ у материалов теплоизоляции, как правило, находится в пределах от 0,02 до 0,175 Вт/(м·°С) [4]. Требуемое термическое сопротивление позволяет обеспечивать оптимальные условия микроклимата помещений зданий для безопасного и комфортного пребывания людей при соблюдении нормируемых показателей температуры внутреннего воздуха $t_{вн}$, °С и её разности Δt_n с температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции t_b . Микроклимат – состояние, характеризуемое показателями температуры воздуха и ограждающих конструкций, а также влажностью и подвижностью воздуха [2]. Параметры температурного режима в помещении значительно зависят от поступления необходимого количества теплоты. Ограждающие конструкции, отличные друг от друга по составу материалов при одинаковом показателе термического сопротивления могут обладать разным уровнем теплоустойчивости. В качестве примера (рис. 1) представлены схемы устройства наружных ограждающих конструкций (принят режим эксплуатации Б).

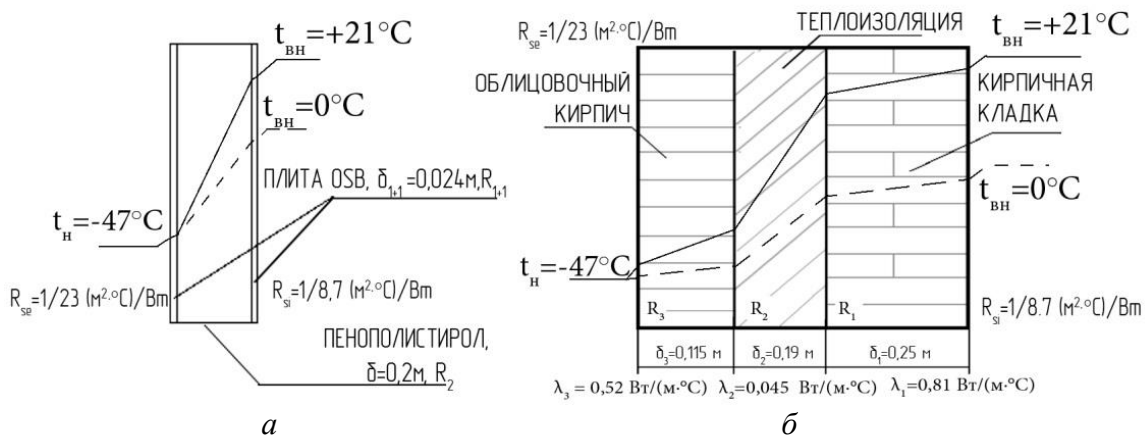


Рис. 1. Схема устройства ограждающих конструкций с термическим сопротивлением $R = 4,18 \text{ (м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт}$, по СП 50.13330.2012 и распределения температурной линии внутри слоёв для условий г. Сургу́та при постоянной температуре наружного воздуха -47°C

Согласно [8], фактическое термическое сопротивление каждой конструкции определяется по формуле:

$$R = \sum(\delta_i/\lambda_i) + 1/\alpha_{\text{вн}} + 1/\alpha_{\text{нар}}, \quad (1)$$

где R – общее термическое сопротивление конструкции, $(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт}$; δ – толщина слоя конструкции, м; λ – коэффициент теплопроводности материала слоя, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, для стен $\alpha_{\text{вн}} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$; $\alpha_{\text{нар}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения в зимних условиях, для стен $\alpha_{\text{нар}} = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$. Требуемое значение термического сопротивления для условий города Сургу́та [8] составляет $4,18 \text{ (м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт}$.

Степень теплоустойчивости ограждающих конструкций выражена показателем тепловой инерции D , которая определяется по формуле:

$$D = \sum R_i S_i, \quad (2)$$

где D – тепловая инерция; R – термическое сопротивление слоя конструкции, $(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт}$; S – коэффициент теплоусвоения материала слоя конструкции, $\text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$.

Коэффициент теплоусвоения S выражает способность материала воспринимать количество теплоты:

$$S = [(2\pi\lambda\rho c)/z]^{1/2}, \quad (3)$$

здесь обозначены: λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, ρ – плотность, кг/м^3 , c – удельная теплоёмкость, $\text{Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ для материала слоя конструкции; z – период тепловых колебаний, с.

Тепловые потери зданий при отказах системы отопления – это многофакторный процесс, зависящий от теплофизических свойств ограждающих конструкций и объектов, находящихся в помещениях, геометрических параметров здания и помещений, режима вентиляции и кондиционирования и т. д. Вследствие данной особенности расчёт времени понижения температуры воздуха внутри помещения за время T представляется в виде комплексной задачи. В работе [5] подробно описана методика расчёта скорости остывания помещения при отключении теплоснабжения, с использованием ЭВМ.

Упрощённая схема процесса остывания ограждающей конструкции (рис. 2) представляет собой изменение значения температуры внутренней поверхности наружной стены $\tau_{\text{вн}}$, стремящегося к значению наружного воздуха $t_{\text{н}}$, при тепловых потерях здания dQ .

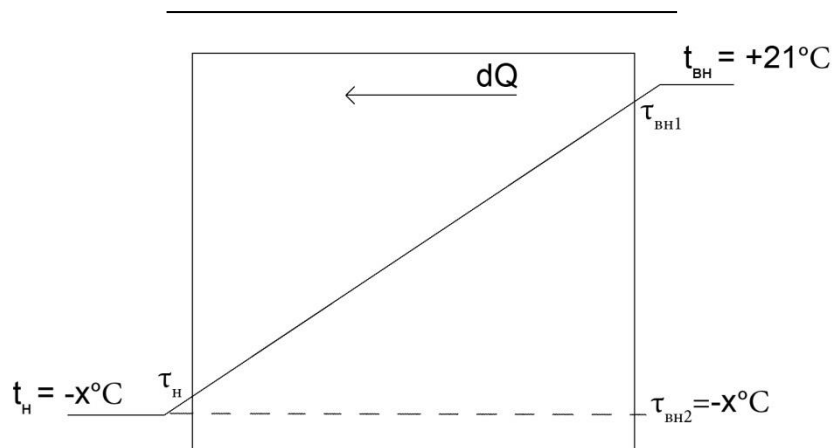


Рис. 2. Принятая схема остывания ограждающей конструкции при отказе системы теплоснабжения

На основе аналитических и численных методов расчёта, учитывающих только перво-степенные процессы, происходящие в ограждающих конструкциях при отказах системы теплоснабжения, авторами была разработана программа для определения времени понижения температуры до заданных значений внутренней поверхности ограждающей конструкции. Программа предназначена для использования на ПЭВМ (ПК) в режиме онлайн в браузерах с поддержкой языка javascript. Исходные значения для решения задачи: коэффициент теплопроводности материалов λ , Вт/(м·°C); начальная температура внутренней поверхности стены $\tau_{вн}$, °C; температура наружной поверхности стены °C; температура внутреннего воздуха $t_{вн}$, °C; температура наружного воздуха $t_{н}$, °C; плотность материалов конструкции ρ , кг/м³; удельная теплоёмкость материалов c , Дж/(кг·°C); площадь поверхности ограждающей конструкции F , м²; конечная температура внутренней поверхности стены $\tau_{вн2}$.

На примере схем ограждающих конструкций (рис. 1), у которых равны показатели термического сопротивления, представлена зависимость тепловой инерции от теплофизических свойств материалов:

1) конструкция № 1 (рис. 1а): плита древесно-стружечная (толщина, $\delta \cdot 2 = 0,024$ м, $\lambda = 0,29$ Вт/(м·°C)), пенополистирол ($\lambda = 0,044$ Вт/(м·°C), толщина $\delta = 0,2$ м), $R = 4,18$ (м²·°C)/Вт, $D = 1,9$. Данный тип ограждающей конструкции распространён в современном строительстве малоэтажных жилых зданий, особенно актуален для возведения строительных объектов в условиях низких температур, т. к. исключаются мокрые процессы монтажа.

2) конструкция № 2 (рис. 1б): кирпич глиняный обыкновенный ($\delta = 0,25$ м, $\lambda = 0,81$ Вт/(м·°C)), минераловатная плита ($\lambda = 0,045$ Вт/(м·°C), $\delta = 0,19$ м), облицовочный кирпич ($\delta = 0,115$ м, $\lambda = 0,52$ Вт/(м·°C)), $R = 4,18$ (м²·°C)/Вт, $D = 6,35$. Данный тип ограждающей конструкции распространён в современном строительстве многоэтажных жилых зданий.

При постоянной температуре наружного воздуха $t_{н} = -47$ °C (наиболее холодная пятидневка обеспеченностью 0,92 по [7]) внутренняя поверхность наружной ограждающей конструкции достигнет значения 0 °C за 12,5 ч (рис. 1а) и за 159,6 ч (рис. 1б). Расчет произведен в программе, разработанной авторами без учёта теплоемкости внутреннего воздуха, объектов, находящихся внутри помещения, и тепловых потерь через элементы здания (полы, перекрытия, окна, двери, системы вентиляции и др.), кроме наружных стен.

Как видно из приведённых данных, термическое сопротивление конструкции не является достаточным критерием тепловой защиты. В нормативных документах [8; 3] теплоустойчивость определяется только для районов со среднемесячной температурой июля +21 °C и выше по результатам испытаний в летний период, при этом не учитываются теплоаккумулирующие свойства материалов конструкций и процессы, происходящие в результате прекращения подачи тепловой энергии. Однако для периода отрицательных температур наружного воздуха показатель тепловой инерции является важным критерием при оценке тепловой защиты

зданий. При низкой тепловой устойчивости ограждающих конструкций отказы систем теплоснабжения приводят к понижению температуры внутри помещений за относительно короткий промежуток времени, что отрицательно влияет на условия микроклимата, необходимого для безопасного и комфортного пребывания людей в помещениях. Здания, у которых наружные ограждающие конструкции имеют высокую тепловую инерцию, позволяют поддерживать положительную температуру внутреннего воздуха в течение длительного времени при аварийных ситуациях систем теплоснабжения. В практическом значении величина времени поддержания положительной температуры в помещении является важным показателем при проведении ремонтно-восстановительных работ системы отопления в здании до момента замерзания жидкости в системах, где в качестве теплоносителя используется вода.

Литература

1. Агитаев Е. В. Реформе ЖКХ – 20 лет: каковы итоги? // Право и инвестиции. 2013. № 1–2. С. 96–103.
2. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях ; введ. 2013-01-01. М. : Стандартинформ, 2013. 12 с.
3. ГОСТ 26253-84. Здания и сооружения. Метод определения теплоустойчивости ограждающих конструкций ; введ. 1985-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1987. 10 с.
4. ГОСТ 16381-77 (СТ СЭВ 5069-85). Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования ; введ. 1976-12-30, ред. 01-12-1985, с изм. от 24.04.2006. М. : Изд-во стандартов, 1976. 4 с.
5. Самарин О. Д. О скорости остывания помещения при отключении теплоснабжения // ССК: кровля и изоляция. 2011. № 1. С. 61–62.
6. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : актуализир. редакция СНиП 41-01-2003. М. : Минрегион России, 2012. 76 с.
7. СП 131.13330.2012. Строительная климатология : актуализир. редакция СНиП 23-01-99. М. : Минрегион России, 2012. 109 с.
8. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. : актуализир. редакция СНиП 23-02-2003. М. : Минрегион России, 2012. 96 с.

УДК 614.841.411:620:691.11:621.384.2-028.77

*Касымов Д. П., Зима В. П.
Kasymov D. P., Zima V. P.*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИК-ДИАГНОСТИКИ В ИССЛЕДОВАНИИ ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ И ТОРФА ОТ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

IR DIAGNOSTICS METHODS APPLICATION IN IGNITION INVESTIGATION OF WOOD AND PEAT BY SURFACE FIRE

В лабораторных условиях исследовано воздействие очага горения на деревянные образцы различного профиля (плоский и оцилиндрованный образец). Опыты проводились с использованием тепловизора JADE J530SB в спектральном интервале 2.64–3.25 мкм. Получены профили температуры на поверхности образцов древесины различной конструкции (плоский и оцилиндрованный образцы), определены теплонапряженные участки при воздействии модельного очага горения, имитирующего низовой лесной пожар слабой интенсивности.

Ключевые слова: древесина, эксперимент, воспламенение, ИК-диагностика.

Как показывает практика, количество разрозненных очагов возгорания либо крупномасштабных пожаров не уменьшается год от года, несмотря на усовершенствование систем прогноза лесной пожарной опасности. В последнее время очаги возгорания возникают в более отдаленных и заболоченных местностях, что осложняет доставку техники для их локализации. Отчасти это связано с расширением хозяйственной деятельности человека, что повышает риск появления пожара, а также вырубку доступных лесных ресурсов. До сих пор недостаточным является понимание физики природных пожаров и механизмов перехода одного типа пожара в другой, что свидетельствует о необходимости исследования природных пожаров, их влияния на жилые постройки и торфяники, а также способов локализации и борьбы с ними.

В настоящее время при исследовании процессов горения и природных пожаров активно применяются современные методы инфракрасной (ИК) диагностики [1]. При моделировании процессов горения в лабораторных условиях достаточно использовать контактные методы для регистрации температуры, при этом для получения идентичных результатов в каждом случае необходимо сохранять сходные условия эксперимента (масса образца, материал тигля и эталона, атмосферы в печи, материал термопар) [4], однако в натуральных условиях необходимо большое количество термопар для регистрации полей температур, что вызывает трудности при обработке результатов.

Основное преимущество ИК-диагностики с применением тепловизионного оборудования заключается в высоком пространственном и временном разрешении [9]. Однако при использовании метода ИК-диагностики необходим учет спектра излучения исследуемого объекта [6, 11], выбор подходящего спектрального интервала [10], калибровка камеры тепловизора, а также использование специальных пакетов для обработки данных.

Следует отметить, что в настоящее время применение тепловизионного оборудования при исследовании природных пожаров не очень распространено, поскольку данное явление зависит от большого числа параметров и требует детального изучения таких свойств, как коэффициент излучения. Кроме того, сложность исследуемого объекта предполагает использование специальных научных тепловизоров, что связано с большими денежными затратами. Несмотря на это, ввиду перспективности данного способа в исследовании характеристик фронта горения и установлении теплонапряженных участков объектов, на которые воздействует фронт пожара, можно отметить работы [2; 5–6; 9; 11], где исследуются характеристики лесного пожара в среднем ИК-диапазоне длин волн, а в работах [7; 9; 12] приводятся результаты для спектральных интервалов 7,5–13 мкм.

Таким образом, представляет интерес изучение в лабораторных и натуральных условиях зажигания деревянных конструкций и торфа при воздействии на них очага горения для определения вероятности воспламенения, а также нахождения теплонапряженных участков на поверхности образцов древесины с применением методов ИК-диагностики.

Исследования по зажиганию торфа проводились с помощью тепловизора JADE J530SB с матрицей 320×240 пикселей, диапазоном измеряемых температур $-15 \dots +1500$ °С в спектральном интервале 2,5–2,7 мкм. Параметры образцов торфа и лесного горючего материала (ЛГМ), их размеры, влагосодержание, плотность и масса указаны в [8]. Схема экспериментов представлена на рис. 1.

Съемка тепловизором начиналась в момент зажигания слоя лесного горючего материала (ЛГМ), представляющего собой опад хвои, и регистрировала воздействие очага горения на образец торфа. В отличие от термопарного метода, в данном случае мы можем говорить именно о температуре на поверхности торфа, в то время как термопарный метод ограничен условиями внедрения термопар в образцы (дает некоторую погрешность, связанную с необходимостью внедрять термопары в образец у поверхности).

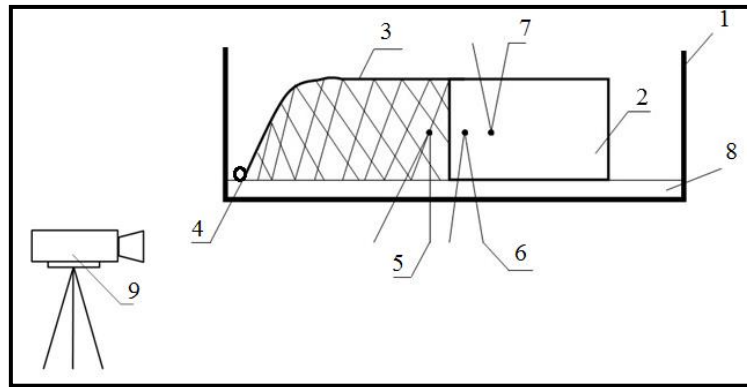


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:

- 1 – металлический короб – полигон; 2 – образец торфа; 3 – лесной горючий материал (ЛГМ);
- 4 – источник зажигания; 5 – термопара в слое ЛГМ; 6 – термопара у поверхности торфа;
- 7 – термопара внутри слоя торфа; 8 – подложка из грунта; 9 – тепловизор JADE J530SB

На рис. 2 показана термограмма эксперимента по зажиганию торфа от низового лесного пожара.

Для того чтобы оценить распределение поля температур у поверхности торфа во время горения слоя ЛГМ, с помощью программного обеспечения Altair по работе с тепловизором в выбранной области 1 строился график распределения температуры по времени эксперимента (рис. 3).

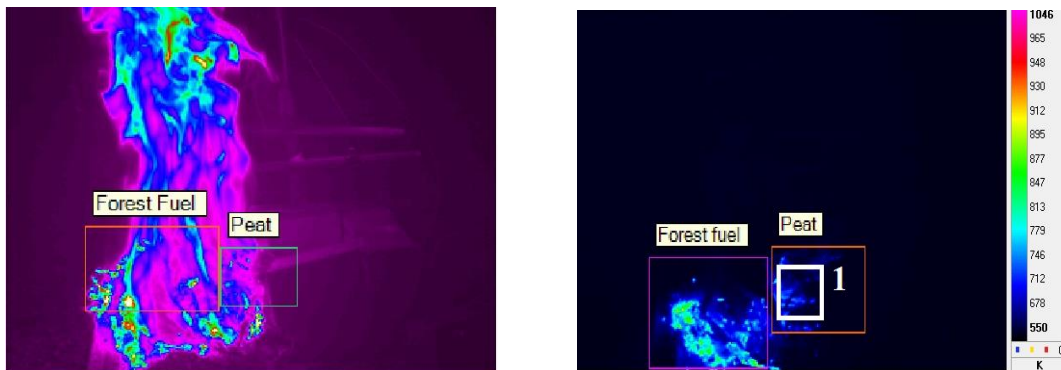


Рис 2. Термограмма эксперимента по воздействию очага горения на слой торфа

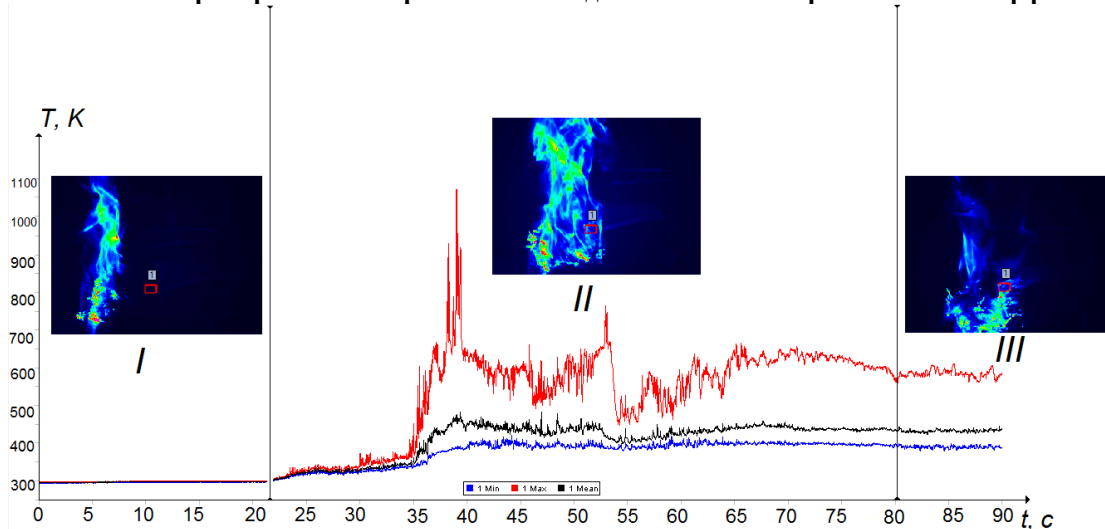


Рис. 3. Изменение температуры по времени эксперимента в области 1:

- I – развитие очага горения ЛГМ; II – воздействие очага горения на слой торфа; III – догорание слоя ЛГМ

Как видно из графика, скачки максимальной температуры на поверхности образца вызваны влиянием пламени при сгорании ЛГМ. Отбросив временной отрезок I–II на рис. 3, когда в пламенном режиме сгорал слой ЛГМ, тем самым экранируя интересующую нас область 1, были получены графики изменения температуры на поверхности образца в области 1 после воздействия на них очага горения (рис. 4).

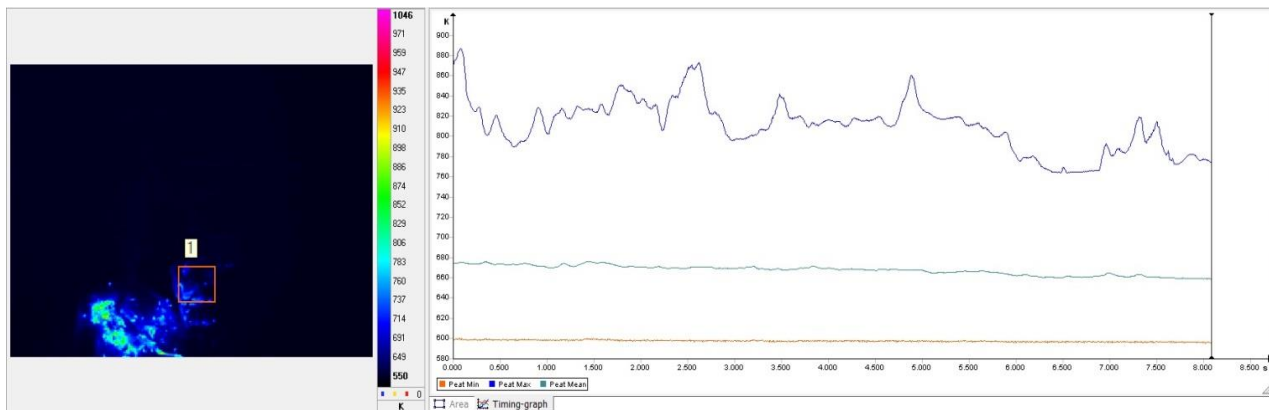


Рис. 4. Изменение температуры в области 1 в момент, когда слой ЛГМ догорал

Получены следующие температуры $T_{\text{мин}} = 630 \text{ К}$, $T_{\text{ср}} = 655 \text{ К}$, $T_{\text{макс}} = 680 \text{ К}$. Следует отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с работами Борисова А. А., в которых на основе экспериментального и математического моделирования торфяных пожаров максимальная температура горения торфа изменяется в пределах $623 \text{ К} \leq T_{\text{г}} \leq 673 \text{ К}$.

Кроме того, проводились исследования по воздействию модельного природного пожара на деревянные постройки с использованием тепловизора JADE J530SB. Схема проведения экспериментов изображена на рис. 5.

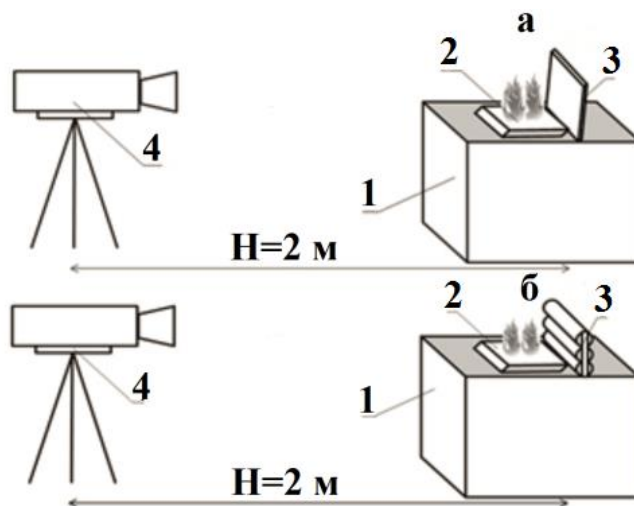


Рис. 5. Схема проведения эксперимента:

1 – экспериментальная площадка; 2 – слой СГМ; 3 – образец древесины (а – плоский образец, б – оцилиндрованный образец); 4 – тепловизор JADE J530SB (спектральный интервал 2,5–2,7 мкм)

В качестве источника огня использовался степной горючий материал (СГМ). Плотность слоя составляла $\rho = 55,5 \text{ кг/м}^3$. Параметры образцов древесины и горючего материала, их размеры, влагосодержание, плотность и масса указаны в [13]. Использовались плоские и оцилиндрованные образцы древесины (рис. 6).

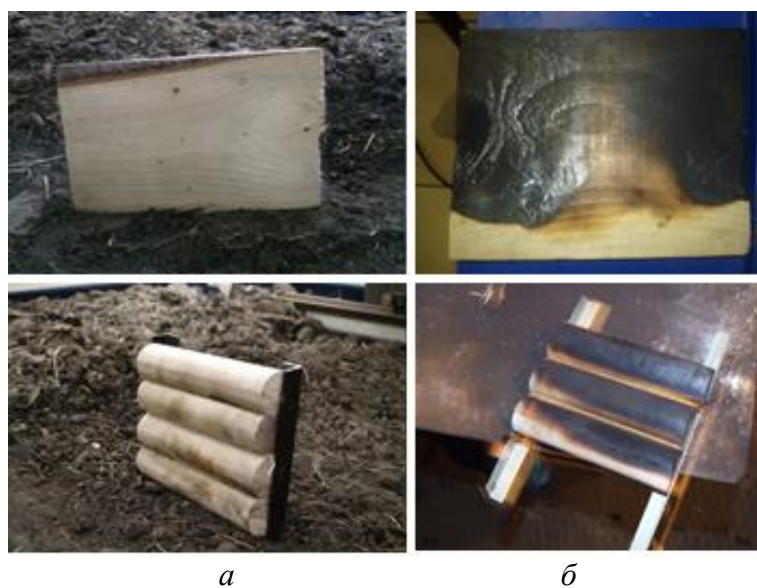
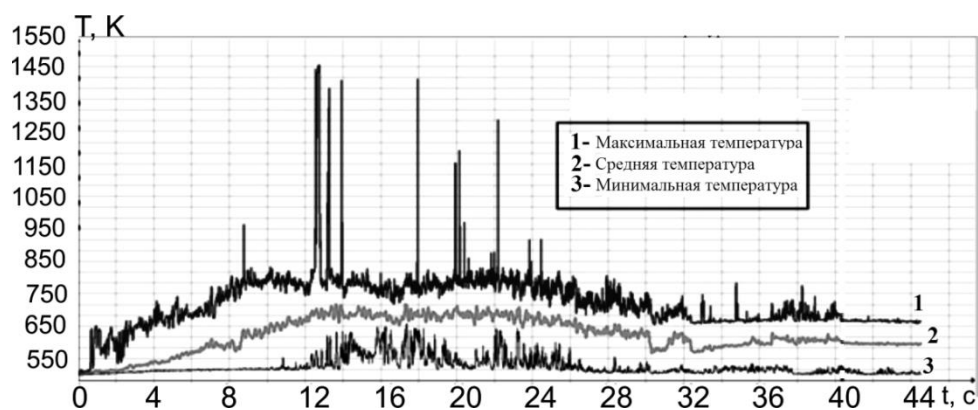


Рис. 6. Фото испытуемых модельных образцов древесины:
а – образцы до испытаний; *б* – образцы после воздействия
на них фронта модельного низового лесного пожара

Для того чтобы оценить воздействие очага горения на образцы древесины методом ИК-диагностики, с помощью программного обеспечения Altair по работе с тепловизором выбиралась область 1 на поверхности деревянных образцов и строился график зависимости изменения температуры по времени эксперимента.

На рис. 7 представлена типичная зависимость изменения температуры в области 1 по времени эксперимента для оцилиндрованного образца древесины.



**Рис. 7. График зависимости максимальной, минимальной и средней температуры
от времени на поверхности образца древесины**

В результате экспериментально определено различие влияния очага степного пожара на плоские и оцилиндрованные образцы из березы. С помощью метода ИК-диагностики в спектральном интервале 2,64–3,25 мкм определена максимальная температура на поверхности деревянных образцов различного профиля в результате воздействия на них очага горения, которая составила (при выбранных параметрах эксперимента): 600–610 К для плоских образцов, 607–622 К для оцилиндрованных. В соответствии с экспериментальными данными из [3] эти температуры не приводят к зажиганию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 16-38-00190_мол_а, № 14-01-00211_а).

Литература

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М. : Спектр, 2009. 544 с.
2. Гришин А. М., Фильков А. И., Лобода Е. Л. и др. Натурные экспериментальные исследования воздействия полевого пожара на деревянные ограждения и слой торфа // *Пожарная безопасность*. 2013. № 3. С. 52–58.
3. Исаков Г. Н. Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 142 с.
4. Исаков Г. Н., Манаева А. Р. Системный анализ и прогнозирование характеристик термодеструкции и дымообразования напольных покрытий с учетом массового содержания компонентов // *Ползуновский вестник*. 2015. № 4. Т. 1. С. 146–149.
5. Лобода Е. Л. Экспериментальное исследование глубины фронта горения торфа ИК-методами // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. № 5 (25). С. 451–455.
6. Boulet P., Pareut G., Acem Z., Collin A., Sero-Guillaume O. On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires // *Fire Safety Journal*. 2011. № 46. P. 21–26.
7. Dupuy J., Vachet P., Maréchal J., Meléndez J., de Castro A. J. Thermal infrared emission-transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner // *International Journal of Wildland Fire*. 2007. № 16. P. 324–340.
8. Grishin A. M., Zima V. P., Kasymov D. P. On the deepening mechanism of the site of peat combustion // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. V. 86. Issue 5. P. 996–1001.
9. Loboda E. L., Reyno V. V. Choice for research spectral response of combustion processes using the method of IR diagnostics // *Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics*. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2074710>. (дата обращения: 20.04.2016).
10. Rinieri F., Balbi J. H., Santoni P. A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels // *QIRT*. 2006. URL: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (accessed: 04.10.2014).
11. Qian C., Saito K. Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique // *Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings*. San Antonio, 1995. P. 81–86.
12. Tadashi K., Akihiko I., Kozo S. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread Over Liquids // *Appl Opt*. 2000. Vol. 39. P. 4278–4283.
13. Zima V. P., Kasymov D. P. Investigation of the Effect of the Combustion Site on Wood Specimens with the Use of IR Diagnostics // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. V. 89. Issue 2. P. 466–470.

УДК 331.45:331.363.2:614.821.3

Кривошеина Е. В., Букалов Г. К., Мартынова Д. Ю.
Krivosheina E. V., Bukalov G. K., Martynova D. Y.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБУЧЕНИЯ БЕЗОПАСНЫМ МЕТОДАМ И ПРИЕМАМ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ НА ВЫСОТЕ

TRAINING METHODS AND TECHNIQUES USED TO PERFORM SAFE WORK AT HEIGHT

В статье рассматриваются вопросы организации обучения работников безопасному выполнению работ на высоте, а также использованию текстильных строп при погрузочно-разгрузочных работах в условиях крайнего севера.

Ключевые слова: обучение, работы на высоте, текстильные стропы.

Статистика несчастных случаев на производстве говорит о неуклонном снижении их числа. Наблюдается тенденция к снижению травматизма при выполнении работ на высоте. Данные статистики приведены на рис. 1 [2].

Однако из диаграмм следует, что при общем уменьшении количества несчастных случаев доля несчастных случаев с тяжелыми последствиями при падении пострадавшего с высоты, к сожалению, не уменьшается.

Социологическое исследование, проведенное на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, показало, что причинами получения производственных травм в результате несчастных случаев чаще всего называются несоблюдение техники безопасности, а также личная неосторожность пострадавших [5].



Для уменьшения травматизма при выполнении любой работы, и в частности работы на высоте, служит обучение безопасным приемам и методам выполнения работ, а также вопросам охраны труда.

Для организации безопасных работ на любом предприятии работодатель обязан организовать обучение работников безопасным приемам выполнения работ, вопросам охраны труда, пожарной безопасности, оказанию доврачебной помощи и т. д. Кроме того, работодатель обязан организовать проверку знаний, полученных работниками при обучении. Это в полной мере относится и к работам на высоте.

К работам на высоте относятся работы [4], при которых:

а) существуют риски, связанные с возможным падением работника с высоты 1,8 м и более, в том числе:

- при осуществлении работником подъема на высоту более 5 м или спуска с высоты более 5 м по лестнице, угол наклона которой к горизонтальной поверхности составляет более 75°;

- при проведении работ на площадках на расстоянии ближе 2 м от неогражденных перепадов по высоте более 1,8 м, а также если высота защитного ограждения этих площадок менее 1,1 м;

б) существуют риски, связанные с возможным падением работника с высоты менее 1,8 м, если работа проводится над машинами или механизмами, поверхностью жидкости или сыпучих мелкодисперсных материалов, выступающими предметами.

Кроме того, в зависимости от условий производства все работы на высоте делятся на:

а) работы на высоте с применением средств подмащивания (например, леса, подмости, вышки, люльки, лестницы и другие средства подмащивания), а также работы, выполняемые на площадках с защитными ограждениями высотой 1,1 м и более;

б) работы без применения средств подмащивания, выполняемые на высоте 5 м и более, а также работы, выполняемые на расстоянии менее 2 м от неогражденных перепадов по высоте более 5 м на площадках при отсутствии защитных ограждений либо при высоте защитных ограждений, составляющей менее 1,1 м.

Как справедливо вытекает из требования Правил по охране труда, при работе на высоте [5] работники должны иметь квалификацию, соответствующую характеру выполняемых работ. Уровень квалификации подтверждается документом о профессиональном образовании (обучении) и (или) о квалификации.

Работники допускаются к работе на высоте после проведения:

а) инструктажей по охране труда;

б) обучения безопасным методам и приемам выполнения работ;

в) обучения и проверки знаний требований охраны труда.

Работодатель (уполномоченное им лицо) обязан организовать до начала проведения работы на высоте обучение безопасным методам и приемам выполнения работ для работников:

а) допускаемых к работам на высоте впервые;

б) переводимых с других работ, если указанные работники ранее не проходили соответствующего обучения;

в) имеющих перерыв в работе на высоте более одного года.

Обучение безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте проводится в соответствии с требованиями [4] Правил.

Обязанность организации и проведения обучения охране труда и безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте, а также проверки знаний полностью ложится в соответствии со ст. 212 ТК РФ на работодателя.

До начала выполнения работ на высоте работодатель обязан утвердить перечень работ на высоте, выполняемых с оформлением наряда-допуска, и тех работ, которые будут выполняться с применением средств подмащивания, и работ, выполняемых на площадках с защитными ограждениями высотой 1,1 м и более. Это необходимо для правильного и в полном объеме обучения работников.

Для обучения работников, которые будут выполнять работы с применением средств подмащивания необходимо разработать программы обучения [1], которые будут отличаться от программ, предназначенных для работников, допускаемых к работам на высоте без применения средств подмащивания. Тем более, что для последней категории работников Правилами предусмотрено обучение в зависимости от группы по безопасности работ на высоте.

Работники, допускаемые к работам на высоте без применения инвентарных лесов и подмостей, а также с применением систем канатного доступа, делятся на следующие 3 группы по безопасности работ на высоте:

1-я группа – работники, допускаемые к работам в составе бригады или под непосредственным контролем работника, назначенного приказом работодателя;

2-я группа – мастера, бригадиры, руководители стажировки, а также работники, назначаемые по наряду-допуску на производство работ на высоте ответственными исполнителями работ на высоте;

3-я группа – работники, назначаемые работодателем ответственными за безопасную организацию и проведение работ на высоте, а также за проведение инструктажей; преподаватели и члены аттестационных комиссий, созданных приказом руководителя организации, проводящей обучение безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте; работники, проводящие обслуживание и периодический осмотр средств индивидуальной защиты (далее – СИЗ); работники, выдающие наряды-допуски; ответственные руководители работ на высоте, выполняемых по наряду-допуску; специалисты по охране труда; должностные лица, в полномочия которых входит утверждение плана производства работ на высоте.

Как видим, Правила дают четкое деление персонала, выполняющего работы на высоте, в зависимости от объема знаний, который необходим для этого. Также в Правилах указывается возрастной допуск к работам такого рода и периодичность проверки знаний безопасных методов и приемов выполнения работ на высоте.

В программу обучения рекомендуется включать приемы проверки и работы с ленточными и текстильными стропами, также проведение погрузочно-разгрузочных работ.

Для работы с текстильными стропами нужен один человек, тогда как с большегрузными металлическими стропами необходимо несколько человек, это позволяет значительно экономить время на проведение погрузочно-разгрузочных работ. Также решается проблема безопасности рабочего персонала при работе со стропами: на текстильных стропах нет торчащих проволок, приводящих к травмам рук.

Ленточные стропы значительно легче канатных и цепных. Это свойство заметно при работе со стропами большой грузоподъемности.

Текстильные стропы проявляют большую износостойкость, менее подвержены деформационным изменениям. Они достаточно быстро приобретают первоначальный вид после использования.

Текстильные стропы не подвержены воздействию многих химических веществ (технических масел, нефти, кислот, щелочей, органических растворителей, окислителей, морской воды и т. д.). Их легко и удобно сворачивать и хранить – не переплетаются друг с другом, компактно сворачиваются и занимают немного места.

Текстильные стропы сохраняют необходимые характеристики при работе в условиях низких температур до -60°C . Еще один показатель, очень важный при работе на холоде – это теплоотдача. В условиях Крайнего Севера с текстильными ленточными стропами работать безопаснее.

Преимущества текстильных стропов:

- Сохранность груза: грузы (особенно с мягкими кромками или тщательно подготовленными поверхностями) меньше повреждаются при подъеме. Именно это свойство – лучшая характеристика текстильных стропов, так как они бережно огибают изделие и не портят его внешний вид.

- Малый вес: текстильные стропы значительно легче металлических. Это свойство особенно заметно при работе со стропами большой грузоподъемности. Легче производить перемещение самого стропа, легче заводить под груз, легче цеплять к крановому крюку. Кроме того, текстильные стропы позволяют экономить не только человеческие ресурсы, но и время, затраченное на погрузочно-разгрузочные работы.

- Безопасность: на текстильных стропах не бывает заусенцев, острых кромок и выступающих поврежденных проволочек, приводящих к травмам. Как следствие – экономия средств на оплату временной нетрудоспособности и уменьшение простоев на рабочем месте.

- Высокая износостойкость и стойкость к деформации: текстильные стропы, по сравнению с металлическими, имеют большую износостойкость многократным сгибам и разгибам в одном месте.

- Текстильные стропы менее подвержены деформационным изменениям, воздействию абразивных материалов, воздействию многих химических веществ (кислот, щелочей, окислителей, морской воды).

- Компактность: текстильные стропы легко и удобно свертывать и хранить. Металлические стропы невозможно свернуть аккуратно, так как они обладают пружинящими свойствами, их очень трудно перемещать с места на место. Всех этих недостатков лишены текстильные стропы. Их можно свертывать как угодно, при этом они не распрямляются и не переплетаются друг с другом. Такие стропы можно легко разместить и постоянно иметь под рукой [3].

Вывод. В настоящее время являются актуальными разработка и внедрение программ обучения работам на высоте работников любых организаций: промышленных предприятий г. Сургута и ХМАО – Югры, предприятий ЖКХ, рекламных предприятий, нефтедобывающих предприятий и пр.

Литература

1. Кривошеина Е. В., Букалов Г. К. Особенности преподавания специальных дисциплин на примере лекции «Требования охраны труда при проведении работ на высоте» // Роль современного университета в технической и кадровой модернизации Российской экономики : сб. тр. IX междунар. науч.-метод. конф. Кострома : КГТУ, 2016. 121 с.
2. Официальный сайт Федеральной службы по труду и занятости. М., 2015. URL: <http://www.git24.rostrud.ru> (дата обращения 18.03.2016).
3. Официальный сайт фирмы ГАОУ ДПО Профессионал. М., 2016. URL: <http://www.eduprof.ru> (дата обращения 15.03.2016).
4. Об утверждении правил по охране труда при работе на высоте : приказ Минтруда РФ от 28.03.2014 № 155н ; зарегистрировано в Минюсте РФ 05.09.2014 № 33990) // Рос. газ. № 251. 5.11.2014.
5. Совершенствование работы профсоюзных организаций в сфере охраны труда на территории ХМАО – Югры: по результатам социологических исследований / А. П. Варлаков, В. А. Снисаренко, Д. С. Дубовец и др. Сургут : Библиотека, 2013. 140 с.

УДК 614.841.411:620:684.77-028.77

Манаева А. Р., Исаков Г. Н.
Manaeva A.R., Isakov G.N.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО САМОВОСПЛАМЕНЕНИЮ НАПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРЕВЕ В ВОЗДУХЕ

SYSTEM ANALYSIS AND EXPERIMENTAL DATA PROCESSING ON SELF-IGNITION FLOORING AT HIGH-SPEED HEATING IN AIR

Проведена обработка экспериментальных данных по самовоспламенению напольного покрытия (НП): определен адиабатный период индукции процесса самовоспламенения и время самовоспламенения. С позиций системного анализа описано терморазложение НП и роль процесса самовоспламенения при нахождении системы в критическом состоянии. Представлена иерархичность горения НП как сложной физико-химической системы.

Ключевые слова: время самовоспламенения, критическое состояние системы, иерархичность системы.

Анализ состояния вопроса. Пожары в помещениях часто носят нестационарный характер, в особенности это касается пожаров в помещениях с недостаточной вентиляцией, когда не обеспечивается необходимый приток кислорода [5; 6]. К таким относится большинство жилых и производственных помещений, где в качестве НП используется линолеум. При распространении пожара НП чаще всего не горят, а подвергаются термической деструкции. При этом прослеживается значительное дымообразование и выделение токсичных газов. Поэтому НП при возникновении пожара оказываются основным источником опасности для людей. Актуальность этой темы привела к разработке многочисленных подходов в отношении решения проблем поведения НП в условиях действия повышенных температур. Математическое моделирование макрокинетики позволяет понять основные закономерности процесса термодеструкции при повышенных тепловых нагрузках и оценить опасные последствия воспламенения, проанализировать возможные способы предупреждения возгорания [4].

Знание точного значения $T_{с.в.}$ (температуры самовоспламенения) и времени самовоспламенения ($t_{с.в.}$) является ключевым параметром, позволяющим управлять пожароопасностью. При определении кинетических параметров важно определить $t_{с.в.}$, так как в окрестности этой температуры функциональная связь между обобщенными критериями находится с учетом выполнения условий интегрального подобия.

В настоящее время наиболее совершенным методом определения кинетики терморазрушения полимерных материалов является динамический термогравиметрический анализ (ДТГА). Он позволяет определить температурные диапазоны начала и конца реакции; степень превращения вещества; максимальную скорость и моменты окончания физико-химических процессов. Также ДТГА дает возможность рассчитать кинетические параметры, значения порядка химических реакций, константы скорости; энергии активации реакций. Синхронно с фиксированием изменения температуры в образце, при котором производится исследование потери массы, дополнительно производится запись дифференциальных кривых потери массы (ДТГА) и кривых дифференциального термического анализа (ДТА), на которых фиксируются тепловые эффекты процессов деструкции полимеров. Такой комплексный анализ образцов полимеров обеспечивает надежное понимание процессов разложения полимеров [4; 7]. Почти все виды линолеумов являются сгораемыми материалами:

воспламеняются при температуре выше 200 °С и горят с выделением 9 218–21 370 кДж/кг теплоты (в зависимости от вида и количества наполнителя и антипирена).

Методика проведения эксперимента. В качестве объекта исследования использованы образцы НП на основе поливинилхлорида фирмы «ТАРКЕТТ» («Tango-4»). Методика экспериментального исследования состоит в следующем: образец нагревается в потоке высокотемпературного газа-окислителя при температуре от 298 К до 1298 К при скоростях нагрева 5, 10, 15, 20, 25 градусов в минуту на приборе STA 449 F1 Jupiter. Испытуемые и эталонные образцы (оксида алюминия – Al_2O_3) помещаем на платиновые тигли и устанавливаем на керамическом стержне, на который опускается электрическая печь.

Температура самовоспламенения ($T_{с.в.}$) на кривой ДТА определялась по точке перегиба в области экзотермического пика, отвечающего за самовоспламенение продуктов термодеструкции наполных покрытий [2].

Адиабатный период индукции процесса самовоспламенения определен из [8]:

$$t_{ад} = \frac{C_p}{Qk_0} \cdot \frac{R_0 \cdot T_{ст}^2}{E} \cdot \exp\left(\frac{E}{R_0 T_{ст}}\right), \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость (кДж/(кг·К)); Q – тепловой эффект процесса, (Дж/кг); k_0 – предэкспоненциальный множитель, $мин^{-1}$; E – энергия активации процесса, Дж/моль; $T_{ст}$ – температура стенки измерительной ячейки в момент самовоспламенения, К; R – универсальная газовая постоянная, 8,314 кДж/(моль·К).

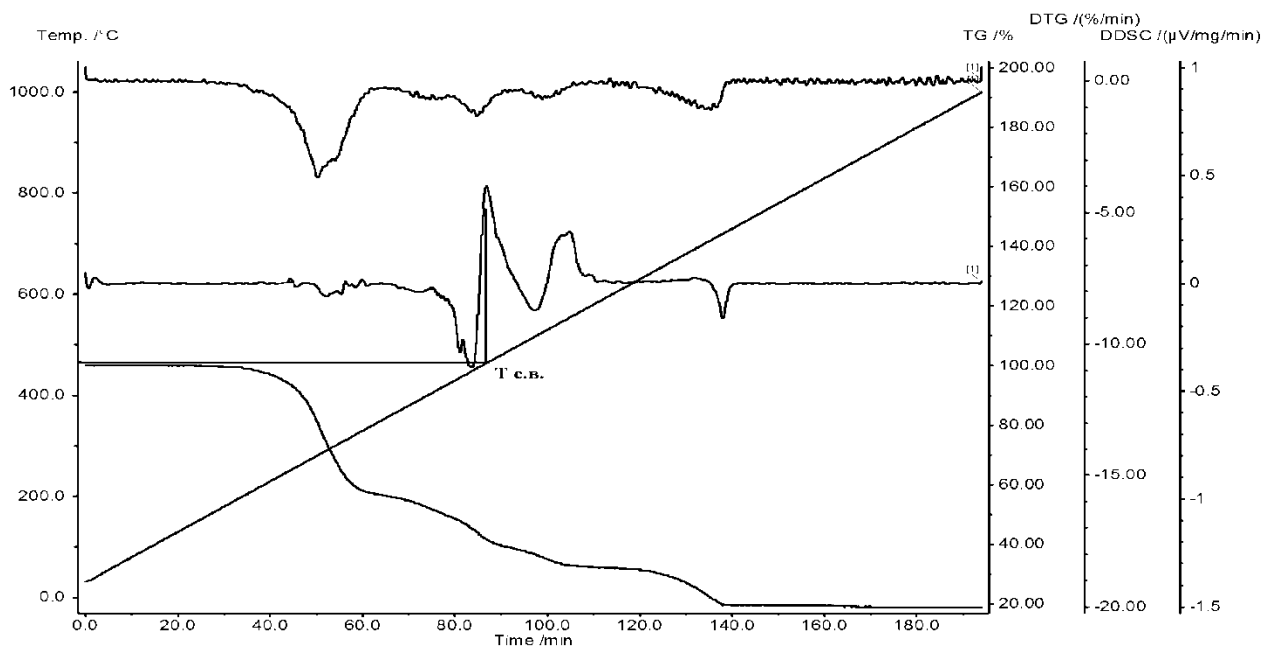


Рис. 1. ДТГА (дифференциальная кривая скорости потери массы), ДТА (кривая дифференциально-термического анализа), Т (температурная кривая), ТГ (термогравиметрическая кривая) при нагреве образца «Танго-4» со скоростью 5 град/мин в атмосфере воздуха

Период, за который произошло самовоспламенение НП при различных скоростях нагрева и в условиях, близких к пожару, определено по [5; 8]:

$$t_{с.в.} = t_{ад}(1 - e^{-a}), \quad (2)$$

где $a = 1,37$ для сосуда цилиндрической формы (форма измерительной ячейки).

C_p и Q_p определим, используя программный пакет Netzsch Proteus Analysis. Кинетические параметры в окрестности $T_{с.в.}$ определены согласно методике, подробно описанной в [3].

Таблица 1

Результаты по вычислению $t_{с.в.}$ образца НП марки «Танго-4»

Скорость нагрева, град/мин	$T_{ст.}$, К	E , Дж/моль	K_0 , с ⁻¹	Q , кДж/кг	a	C_p , кДж/(кг · К)	$t_{ад}$, сек	$t_{с.в.}$, сек
5	745	175000	4,60E+09	55090	1,37	0,708	1,37E-01	1,02E-01
10	765	175000	4,60E+09	29280	1,37	0,818	1,50E-01	1,12E-01
15	781	175000	4,60E+09	18020	1,37	1,775	3,14E-01	2,35E-01
20	797	175000	4,60E+09	11420	1,37	0,648	1,10E-01	8,19E-02
25	805	175000	4,60E+09	9020	1,37	0,421	7,09E-02	5,29E-02
100	849,5	175000	4,60E+09	2920	1,37	0,874	1,29E-01	9,60E-02
200	877,8	175000	4,60E+09	1490	1,37	0,874	1,21E-01	9,03E-02

Результаты исследований. Если представить горение НП как сложную физико-химическую систему (ФХС), то характерной особенностью такой системы является иерархичность структуры (рис. 2). Критическими условиями в данной ФХС называют такие, когда стационарное распределение реагирующей горючей смеси в сосуде с заданной геометрией становится невозможным.

На первом уровне иерархии рассматривается критическое состояние системы, при котором система становится неустойчивой относительно флуктуаций и возникает неопределённость: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдёт на новый, более дифференцированный и высокий уровень упорядоченности.

На втором уровне иерархии важно определить $T_{с.в.}$ и $t_{с.в.}$ как параметров, являющихся причиной возникновения процессов третьего и четвертого уровней иерархии – увеличение длительности 1-го этапа пожара в помещении и увеличение времени эвакуации. И на основании расчетов можно перейти к пятому уровню иерархии – прогнозированию поведения материалов в условиях повышенных тепловых нагрузок.

Ключевым моментом в данной системе является определение времени самовоспламенения, так как от этого будет зависеть длительность этапа нарастания пожара (начального этапа пожара) до полного охвата помещения пламенем. Понимание характера этапа пожара до полного охвата пламенем помещения имеет прямое отношение к обеспечению безопасности людей, находящихся в здании [6].

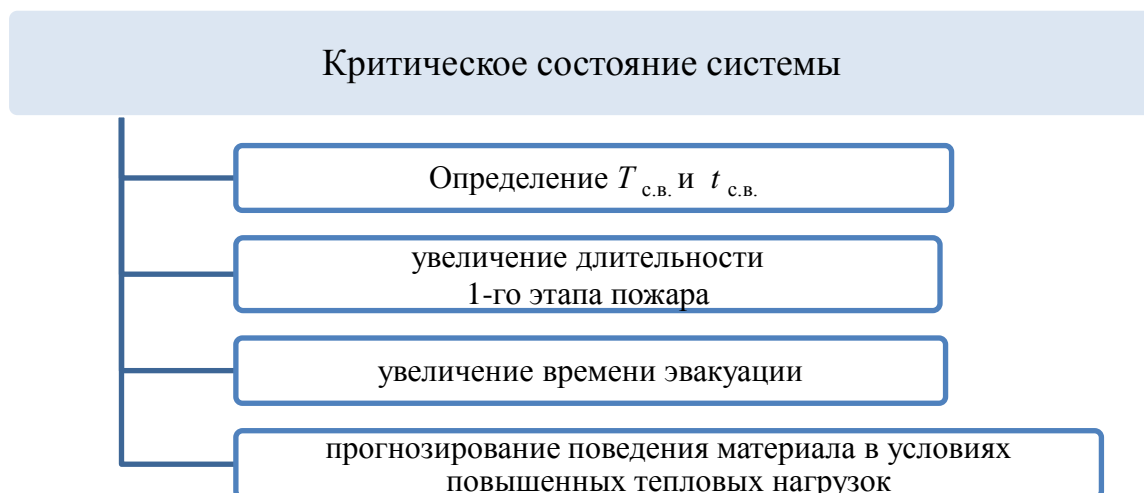


Рис. 2. Иерархичность процесса терморазложения как сложной физико-химической системы

При окончательном определении условий подбора таких сложных физико-химических процессов, как горение НП необходимо учитывать только критерии наиболее неравновесных стадий, так как они контролируют сложный процесс в целом [1], к такой неравновесной стадии относится самовоспламенение материала. В математическом плане наличие критических условий приводит к появлению промежуточных асимптотик и точек ветвления решений систем дифференциальных и интегральных уравнений, нахождение которых в каждом конкретном случае представляет собой сложную задачу [2].

Выводы:

1. Если представить зависимости $T_{с.в.} = f(dT/dt)$ в обобщенном виде, то с ростом скорости нагрева ($\frac{dT}{dt}$) температура $T_{с.в.}$ увеличивается, а время самовоспламенения уменьшается, что также соответствует релаксационным представлениям [1; 2] об исследуемом процессе (см. табл. 1).

2. Система уравнений (1)–(2) позволяет с высокой степенью достоверности ($p = 0,95$; $q = 0,05$) определять время самовоспламенения НП и учитывать факторы, повышающие данные величины, на этапах проектирования и эксплуатации напольных покрытий.

Литература

1. Исаков Г. Н. Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 142 с.
2. Исаков Г. Н., Белявская Д. В., Манаева А. Р. Определение характеристик пожарной опасности материалов на основе ПВХ методом релаксационного анализа // Полимерные материалы пониженной горючести : материалы VII междунар. науч. конф. Таганрог, 6–10 октября 2013 г. Таганрог : Изд-во ЮФУ, 2013. С. 213–216.
3. Исаков Г. Н., Манаева А. Р. Анализ дымообразующей способности напольных покрытий на основе поливинилхлорида в условиях пожара // Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2015. № 2. Т. 17. С. 43–47.
4. Исаков Г. Н., Манаева А. Р. Системный анализ вопросов безопасности применения напольных покрытий и математическая модель процессов их терморазрушения // Управление и высокие технологии : Прикаспийск. журн. 2015. № 1. С. 30–43.
5. Исаков Г. Н. Теория горения и взрыва (задачи и задания) : учеб.-метод. пособие. Сургут : ИЦ СурГУ, 2011. Ч. 1. 53 с.
6. Пузач С. В. Методы расчёта тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности зданий: моногр.. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
7. Уэндландт У. Термические методы анализа. М. : Мир, 1978. 528 с.
8. Франк-Каменецкий Д. А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике : учебник. 4-е изд. Долгопрудный : Интеллект, 2008. 408 с.

УДК 331.45:005.93(571.122)

Мартынова Д. Ю.
Martynova D. Yu.

**ПОКАЗАТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОМПАНИЙ
В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
НА ТЕРРИТОРИИ ХМАО – ЮГРЫ**

**PERFORMANCE INDICATORS OF COMPANIES OPERATIONS
IN LABOR PROTECTION FIELD AND INDUSTRIAL SAFETY
WITHIN TERRITORY OF KHMAO – UGRA**

Социально-ориентированные компании в своих нефинансовых отчетах отражают комплекс мероприятий по улучшению состояния охраны труда и указывают затраты на ее реализацию. Для сопоставимости результатов деятельности компаний в этой области необходимо более широкое применение базовых индикаторов результативности, а также использование социологических способов измерения, заключающихся в оценке удовлетворенности работников.

Ключевые слова: управление охраной труда, промышленная безопасность, риски травматизма, индикаторы результативности.

С целью обеспечения безопасных и комфортных условий труда для каждого сотрудника сегодня компании разрабатывают Политику в области охраны труда и промышленной безопасности, целями которой является создание безопасных условий труда и сохранение жизни и здоровья работников, обеспечение надежности работы на опасных производственных объектах и снижение риска аварий на них. В рамках такой политики создается интегрированная система менеджмента, построенная на основе комплексного и системного подхода к управлению, которая позволяет увязать в единое целое различные аспекты деятельности, оказывающие значимое влияние на безопасность труда и промышленную безопасность. Интегрированная система менеджмента может состоять из нескольких систем менеджмента в соответствии с требованиями международных стандартов ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001. Особое значение для снижения количества несчастных случаев, аварий и инцидентов на предприятии имеет внедрение Единой системы управления охраны труда и промышленной безопасности, соответствующей международному стандарту OHSAS18001:2007 «Система менеджмента профессионального здоровья и безопасности». Результативность функционирования интегрированной системы менеджмента обеспечивается высокой степенью вовлеченности работников всех уровней, а также лидерством и непосредственным участием руководства компании.

Эта система широко используется компаниями, расположенными на территории ХМАО. На каждом предприятии разрабатывается комплекс мер по предотвращению аварийных ситуаций, сохранению жизни и здоровья работников при возникновении таких ситуаций, в том числе по оказанию пострадавшим первой помощи. Наряду с осуществлением профилактических мер работодатель осуществляет обязательное социальное страхование работников от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний, а также расследование и учет несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.

Так, для реализации требований стандарта OHSAS18001:2007 ОАО «Тюменьэнерго» разработало Комплексную программу по снижению рисков травматизма персонала и сторонних лиц на объектах электросетевого комплекса, рассчитанную на период 2014–2017 гг.

Затраты на реализацию таких мероприятий социально-ориентирование компании указывают в своих Корпоративных социальных отчетах, демонстрируя открытость и эффективность своей деятельности по охране труда и производственной безопасности.

Так, затраты на мероприятия по охране труда в ОАО «Тюменьэнерго» составили в 2014 г. – 148,3 млн руб.; в 2013 г. – 150,7 млн руб. и в 2012 г. – 101,6 млн руб.; за 7 последних лет увеличились в 3,3 раза. В том числе на общее улучшение условий труда ОАО «Тюменьэнерго» в 2014 г. затрачено 8364,33 тыс. руб., с приростом на 5,645 тыс. руб. к предыдущему периоду; на обеспечение работников средствами защиты – 114 827,31 тыс. руб., прирост составил 77,4 тыс. руб.; на мероприятия по предупреждению несчастных случаев – 2 448,35 тыс. руб. с приростом на 1,65 тыс. руб. и на санитарно-гигиенические мероприятия по предупреждению заболеваний на производстве – 22 683,94 тыс. руб. с приростом 15,29 тыс. руб. [4].

Расходы на одного работника, включая средства защиты, в 2014 г. в ОАО «Тюменьэнерго» составили 19,77 тыс. руб. (соответственно в 2013г. – 19,5 тыс. руб., в 2012 г. – 14,023 тыс. руб.) [4].

Если обратиться к показателям ООО «Газпром трансгаз Сургут», то оно выделяет в среднем на охрану труда одного работника 30 тыс. руб. [2].

Результаты мероприятий представлены, например, в годовом отчете ОАО «Газпром» по целому ряду показателей. Эти данные указывают на снижение уровня травматизма по причинам, связанным с ДТП – на 38 %, с падением работников с высоты – на 38,6 %; улучшение условий труда – на 19 %.

Отмечается снижение риска травматизма на рабочем месте, соответствие рабочих мест требованиям гигиенических нормативов, повышение компетентности работников компании в области охраны труда и промышленной безопасности (отсутствие случаев травматизма по причинам, связанным с недостатками в обучении) и снижение аварийности на опасных производственных объектах на 23 % по сравнению с предыдущим периодом.

По этому же пути идут и другие компании. Так, за последние годы отмечаются устойчивые тенденции роста затрат на мероприятия по охране труда в ОАО «РЖД», также присутствующая в регионе. Финансовые вложения в охрану труда в ОАО «РЖД» выросли в за последние 7 лет в 2,1 раза. В среднем затраты на охрану труда одного работника в ОАО «РЖД» составляют до 18,6 тыс. руб. [5]. В результате, в РЖД за последние 10 лет произошло снижение общего травматизма в 2,7 и смертельного в 2,2 раза. При этом число пострадавших снизилось в 3,7 раза, а смертельных исходов в 3,2 раза. ОАО «РЖД» представляет данные по ключевым показателям производственной безопасности, в которые помимо расходов на безопасность труда и улучшение условий труда входят также коэффициент частоты производственного травматизма. Число травмированных на тысячу работающих – в 2014 г. составило 0,34 %; в 2013 г. – 0,39 %, 2012 г. – 0,39 %. Показатель общего травматизма в 2014 г. снижен относительно предыдущего года на 19 % [5].

Следует отметить, что основными причинами травматизма являются организационные проблемы. Так, в ОАО «РЖД» травмированы по этим причинам в 2014 г. – 74,4 % и в 2015 г. – 82,8 % [5].

Судя по отчету ОАО «Газпром» за этот же период, количество инцидентов уменьшилось в 3,5 раза, а пострадавших снизилось в 3,3 раза [2].

Устойчивые тенденции роста затрат на мероприятия по охране труда, уровня расходов на одного работника, общие тенденции снижения травматизма показывают, что происходит неуклонное улучшение условий труда на производстве.

Если рассматривать некоммерческие отчеты нефтегазодобывающих компаний, то сопоставимость показателей составляет 13,6 %, а для предприятий и организаций различных отраслей и сфер деятельности уровень сопоставимости будет еще ниже.

Для более полной и объективной оценки уровня безопасных условий труда работников различных компаний можно было бы использовать показатели, предложенные Россий-

ским союзом промышленников и предпринимателей. Факторы, определяющие «общественное лицо компании» при составлении их нефинансовых (социальных) отчетов, называются Базовыми индикаторами.

По мнению авторов, эти индикаторы представляют собой инструмент количественной, качественной интерпретации целей и измерения результатов деятельности, помогая совершенствовать системы управления, повышать эффективность мониторинга, контроля и оценки ключевых результатов работы организации. Российский подход отражает требования международных стандартов – Глобальной инициативой по отчетности (GRI) – и составлен по методике глобального рейтинга на основе анализа открытой корпоративной информации об управлении социальными аспектами бизнеса [1].

Базовые индикаторы результативности были разработаны в 2008 г. Если рассмотреть ретроспективу изменения подходов к оценке показателей деятельности по охране труда и промышленной безопасности в отчетах рассматриваемых компаний, то можно заметить, что за прошедшие годы критерии оценки деятельности все больше приближаются к рекомендованным Базовым индикаторам результативности. Предложено 5 показателей, относящихся к охране труда и промышленной безопасности. Они имеют название «Показатели результативности подходов к организации труда и достойный труд. Аспект: Здоровье и безопасность на рабочем месте»:

Уровень травматизма на производстве (человек на 1 000 работающих). Относится к основному показателю GRI:LA7.

Численность пострадавших со смертельным исходом (человек). Относится к основному показателю GRI: LA7.

Численность лиц с впервые установленным профессиональным заболеванием (человек). Относится к основному показателю GRI: LA.

Число человек/дней болезни в расчете на одного работника (число чел./дней на 1000 работающих). Относится к основному показателю GRI: LA7.

Расходы средств на охрану труда в расчете на одного работающего (руб./чел.).

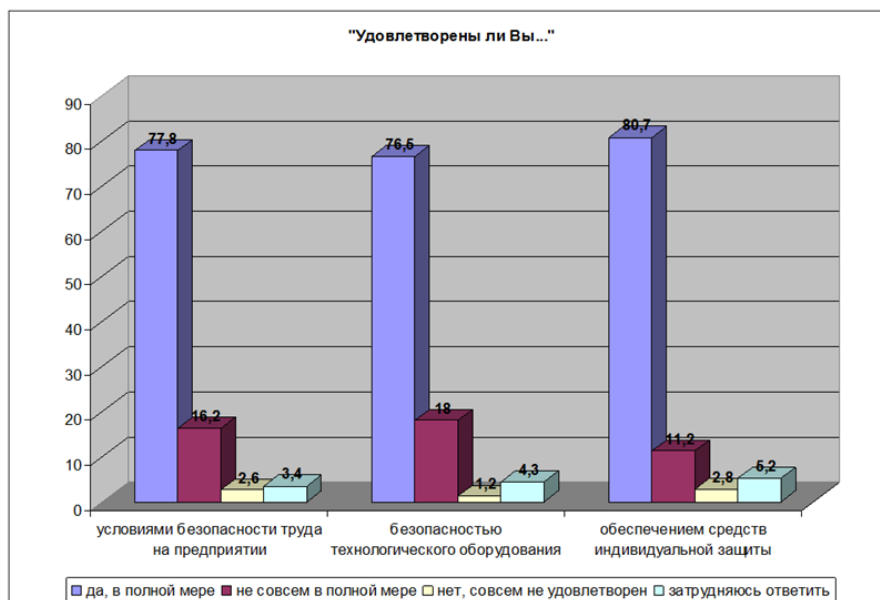


Рис. 1. Степень удовлетворенности безопасностью труда

Такие показатели позволяют иметь статистически измеримую информацию в сопоставимом виде. Это повысило бы информационную ценность рассматриваемых нами Корпоративных социальных отчетов, т. е. дало бы возможность корректно измерять и оценивать деятельность компании, делать однородные сравнения ее достижений.

Однако поскольку Корпоративные отчеты представляют собой документы, демонстрирующие обществу социальную ответственность компании, то для повышения убедительности предоставляемых данных можно было бы предложить ввести социологический способ измерения, заключающийся в оценке удовлетворенности работников. В этом случае в число индикаторов целесообразно ввести и субъективные оценочные показатели. В частности, для оценки результатов деятельности компаний в области охраны труда и промышленной безопасности нами были проведены такого рода исследования, позволившие определить степень удовлетворенности безопасностью труда работников предприятий ХМАО – Югры [3].

По результатам исследования был сделан вывод (см. рис. 1), что в целом условиями безопасности труда, а также безопасностью технологического оборудования, обеспечением средств индивидуальной защиты удовлетворены не менее 78 % работников предприятий ХМАО. Высокий уровень удовлетворенности труда работников подтверждает эффективность вложенных средств в охрану труда и промышленную безопасность в рассматриваемых предприятиях и организациях.

Литература

1. Базовые индикаторы результативности : рекомендации по использованию в практике управления и корпоративной нефинансовой отчетности. Рос. союз промышленников и предпринимателей. Москва, 2008. URL: <http://media.rspp.ru/document/1/1/c/1c20d18467e6706867107ae48f648dd6.pdf> (дата обращения: 20.04.2016).
2. Сила в развитии. Охрана труда : годовой отчет ОАО «Газпром» за 2014 г. URL: www.gazprom.ru (дата обращения: 20.04.2016).
3. Мартынов М. Ю., Мартынова Д. Ю. Роль профсоюзных организаций в сфере охраны труда на предприятиях (по результатам социологического исследования в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре). Евразийский Союз ученых (ЕСУ) // Ежемес. журн. 2015. № 1 (18). Ч. 4. С. 131–133.
4. Устойчивое развитие и взаимодействие с заинтересованными сторонами. 8.2. Охрана труда : годовой отчет–2014 ОАО «Тюменьэнерго». URL: <http://92.42.200.98/ru/> (дата обращения: 20.04.2016).
5. Производственная безопасность. Социальный блок : годовой отчет–2014 ОАО «РЖД». URL: <http://ar2014.rzd.ru/ru/performance-overview/social/industrial> (дата обращения: 20.04.2016).

УДК 614.835:625.748.54

*Мартынова Д. Ю., Воронин А. А.
Martynova D. Yu., Voronin A. A.*

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ АЗС НА ТЕРРИТОРИИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

SECURITY ISSUES AT FILLING STATION LOCATING WITHIN MUNICIPAL ENTITIES TERRITORY

Расположение АЗС на территории муниципальных образований в случае аварии создает риски повреждений и разрушений близлежащих зданий и поражения людей, даже в том случае, если ее размещение и оснащение соответствует всем установленным требованиям.

Ключевые слова: авария, зона поражения, поражающие факторы, прогнозирование последствий.

Рост числа автомобильного транспорта повышает спрос на бензин и вызывает необходимость размещения части АЗС на территории населенных пунктов. Возможные аварии на АЗС представляют серьезную опасность как для людей, находящихся на ее территории, так и для населения и окружающих объектов. Кроме того, возможно воздействие на АЗС и со стороны окружающих объектов, способное привести к возникновению аварии с пожарами и взрывами. Поэтому степень пожарной опасности на АЗС, помимо конструктивных и объемно-планировочных решений, обусловлена и особенностями их размещения по отношению к окружающим объектам.

Основными причинами аварий на АЗС являются:

- переполнение резервуаров при сливе нефтепродуктов из автоцистерн;
- разъединение соединительных трубопроводов между резервуаром и автоцистерной;
- переполнение топливных баков автомобилей;
- повреждение топливораздаточных колонок;
- коррозионный износ трубопроводов и резервуаров.

Каждая из аварийных ситуаций может иметь несколько стадий развития, при сочетании определенных условий может быть приостановлена или переведена в следующую стадию или на более высокий уровень:

- *уровень «А»* – авария, развитие которой не выходит за пределы рассматриваемого технологического блока;
- *уровень «Б»* – авария, развитие которой выходит за пределы рассматриваемого технологического блока, но ограничена территорией АЗС;
- *уровень «В»* – авария, развитие которой выходит за пределы, ограниченные территорией АЗС.

Локализация ряда аварий возможна лишь на первых стадиях развития. При невозможности локализации аварии происходит цепное развитие – разгерметизация соседнего оборудования и выброс из него других продуктов и т. д., что приводит к эффекту «домино», особенно опасному при больших количествах пожаровзрывоопасных веществ на АЗС.

Для оценки поражающих факторов опасности была выбрана наиболее типичная многоэтапная автозаправочная станция, расположенная в г. Сургуте на пересечении ул. Профсоюзной и пр. Ленина. На рис. 1 представлен план-схема расположения АЗС.

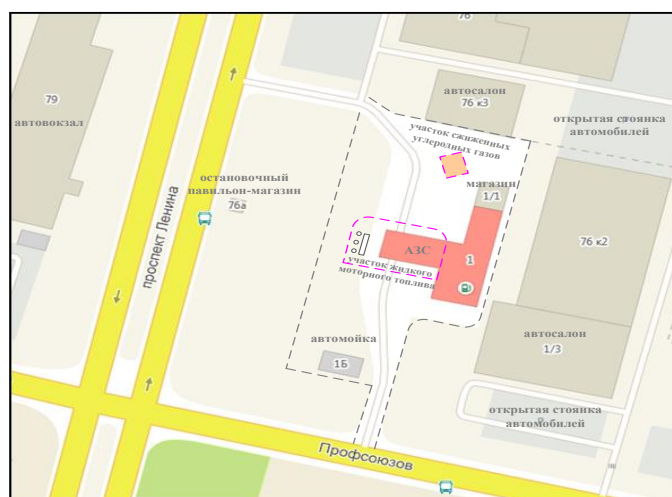


Рис. 1. План-схема расположения АЗС

АЗС предназначена для заправки легковых и грузовых автомобилей бензином А-92, А-95, А-98, дизельным топливом и сжиженным углеродным газом (пропан-бутан). Жилая зона находится на расстоянии порядка 100 метров (многоэтажный дом по проспекту Ленина). Размещение и оборудование АЗС полностью соответствует установленным требованиям.

АЗС можно разбить на два участка: 1) участок жидкого моторного топлива (бензин и дизельное топливо); 2) участок сжиженных углеродных газов (сжиженный пропан-бутан). Каждый участок снабжен оборудованием для перекачки и выдачи топлива, системой вентиляции и орошения участка сжиженных газов, платформами для топливозаправщиков и автомобилей.

Участок жидкого моторного топлива (бензин и дизельное топливо) можно разделить на три функциональных блока, каждый из которых отвечает соответствующей стадии технологической схемы:

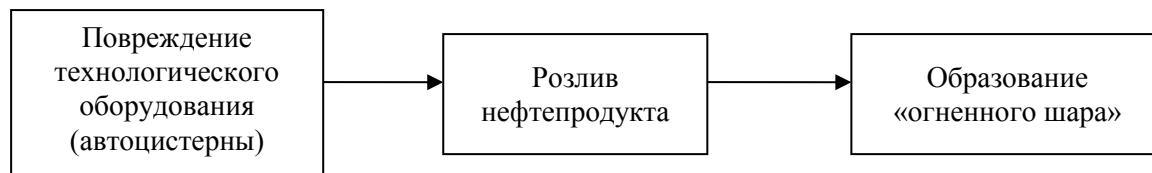
Блок № 1 – бензовоз, площадь поддона – 40,5 м².

Блок № 2 – подземные резервуары, площадь поддонов – 25 м² каждого.

Блок № 3 – топливораздаточные колонки 3 шт. – площадь свободного разлития.

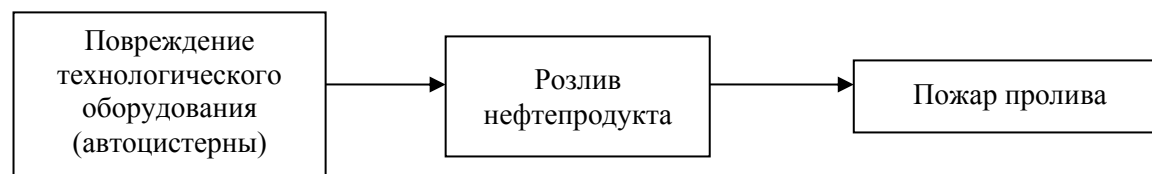
Для рассматриваемого объекта основным фактором риска возникновения аварии является разгерметизация автомобильной цистерны объемом 23 м³ при сливе нефтепродуктов в подземные емкости для хранения.

Вероятность разрушения автоцистерны и возникновения поражающих факторов, в соответствии со статистическими данными, равна 0,005 год⁻¹. Исходя из сценариев развития аварии с разливом нефтепродуктов и их статистической вероятности [2], а также моделировании процесса пожара с учетом случайных факторов [1], можно предположить, что наиболее опасный сценарий развития аварии может происходить по следующей схеме:



Поражающими факторами, воздействующими на персонал, население и окружающую среду является тепловое излучение.

Наиболее вероятный сценарий развития аварии на объекте может происходить по следующей схеме:



Поражающими факторами, воздействующими на персонал, население и окружающую среду является тепловое излучение, в том числе воздействие открытого пламени.

Для определения зон действия основных поражающих факторов использовалась методика [3, прил. В, Д]. Зоны действий основных поражающих факторов при аварийном разрушении цистерны рассчитаны для условий, приведенных в табл. 1. Показатели воздействия на людей теплового излучения при образовании огненного шара приведены в табл. 2, предельно допустимая доза теплового излучения при воздействии «огненного шара» на человека приведена в табл. 3, значения поражающих факторов – в табл. 4 и ожидаемое число погибших – в табл. 5.

Таблица 1

Исходные данные для прогнозирования последствий развития аварий

Тип топлива	Бензин (3-й класс)
Объем топлива автомобильной цистерны	23 м ³
Класс окружающего пространства (среднезагроможденное)	3-й класс
Условие растекания	Свободное
Режим взрывного превращения облака	4-й режим
Рассмотрен наихудший случай – утечка 80 % бензина от объема цистерны	

Таблица 2

**Показатели воздействия на людей теплового излучения
при образовании огневого шара**

Объект	Объём, м ³	Масса, т	Параметры огневого шара				Показатели поражения
			R – радиус огненного шара, м	T – время существования огненного шара, сек	q – интенсивность теплового излучения «огненного шара», кВт/м ²	Q – доза теплового излучения, кВт/м ²	Смертельные исходы, %
Автоцистерна	23	13,8	60,18	17	87,50	1,5 · 10 ⁶	Смертельный ожог

Примечание: показатели воздействия теплового излучения определены для расстояния 50 м (до здания операторной).

Таблица 3

**Предельно допустимая доза теплового излучения при воздействии
«огненного шара» на человека**

Степень поражения	Доза теплового излучения, Джм ²
Ожог 1-ой степени	1,2 · 10 ⁵
Ожог 2-ой степени	2,2 · 10 ⁵
Ожог 3-ой степени	3,2 · 10 ⁵

Таблица 4

Значения поражающих факторов

Зона	Расстояние от места аварии	Q _n , кВт/м ²	Q _{о.ш.} , кВт/м ²	t _s , с	Значения «пробит» - функции P _r		Условная вероятность поражения человека		r
					P _r ⁱ	P _r ^{о.ш.}	Q _i ⁱ	Q _n ^{о.ш.}	
Разгерметизация автоцистерны с бензином объемом 23 м³									
I.	40	173,25	95,53	17	7,51	9,92	1	1	1,31·10 ⁻⁹
II.	50	115,29	87,50		7,51	9,92	1	1	1,31·10 ⁻⁹
III.	70	59,09	70,86		6,79	7,65	0,97	0,99	1,27·10 ⁻⁹
IV.	80	44,88	62,99		6,39	6,71	0,92	0,96	1,21·10 ⁻⁹

Примечание: I – зона размещения персонала, частично здание операторной АЗС; II – зона размещения участка сжиженных углеводородных газов (сжиженный пропан-бутан); магазина, пристроенного к зданию операторной АЗС; автомобильной мойки, стоянки легковых автомобилей; III – частично здания автосалонов, остановочный павильон-магазин, четная сторона автомобильной дороги по пр. Ленина; IV – нечетная сторона автомобильной дороги по пр. Ленина, полностью здания автосалонов, частично открытые стоянки автотранспорта.

Результаты вычислений ожидаемого числа погибших приведены в табл. 5.

Таблица 5

Ожидаемое число погибших

Зона	Расстояние от места аварии	Число человек в зоне*	Условная вероятность поражения человека		Ожидаемое число погибших людей*	
			Q _i ⁱ	Q _n ^{о.ш.}	N ⁿ	N ^{о.ш.}
Разгерметизация автоцистерны с бензином объемом 23 м³						
I	40	6	1	1	6	6
II	50	12	1	1	12	12
III	70	–	0,97	0,99	–	–
IV	80	–	0,92	0,96	–	–

Примечание: * В I и II зоне принимаем число людей известное нам по условию расчета, без учета людей (клиентов АЗС), которые могут находиться в момент возникновения аварии. В III и IV зоне численность людей непостоянная, может меняться от времени суток, принимая во внимание работу автосалонов, загруженность автомобильным трафиком проезжей части пр. Ленина (в часы пик по нечетной стороне пр. Ленина наблюдается автотранспорт).

Зоны поражающих факторов приведены на рис. 2.

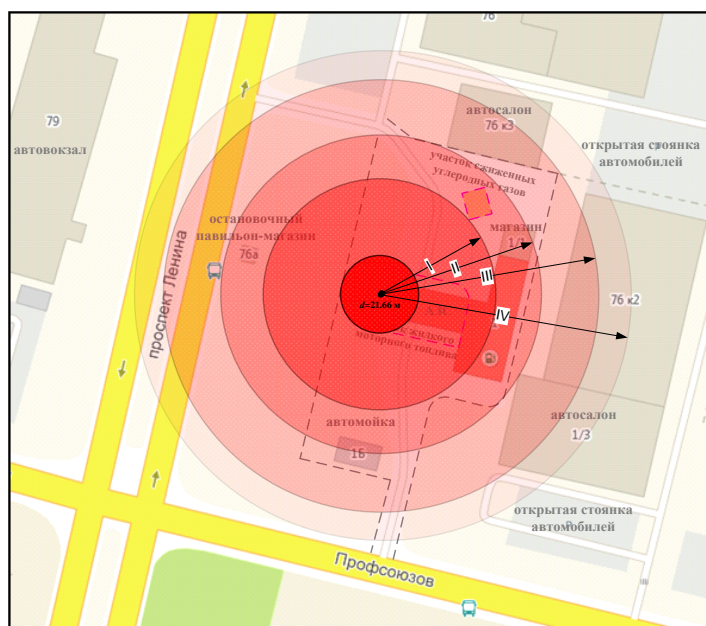


Рис. 2. Зоны поражающих факторов

Сравнение полученных результатов последствий аварий на АЗС (радиусов зон воздействия) с минимальными расстояниями от АЗС до объектов, к ней не относящихся, показывает, что существует вероятность повреждений и разрушения соседних зданий и поражения людей (не относящихся к работникам АЗС), которые находятся в районе аварии.

Анализ зон воздействия взрыва позволяет уточнять и корректировать решения по проектированию и размещению взрывопожароопасных объектов (АЗС) в черте города, планировать мероприятия, направленные на предотвращение и сведение к минимуму нежелательные последствия чрезвычайных ситуаций взрывного характера.

Литература

1. Исаков Г. Н., Манаева А. Р. Прогнозирование характеристик термодеструкции и дымообразования напольных покрытий в условиях пожара // Измерение, контроль, информатизация : материалы XVI междунар. науч.-технич. конф. Барнаул. 12 мая 2015 г. : в 2 т. Т. 1. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2015. С. 86–89.
2. Пчельников А., Лисанов М., Симакин В., Сумской С., Кучинина И. Количественная оценка риска аварий на объектах хранения нефтепродуктов. НТЦ «Промышленная безопасность», 2004. № 4. С. 72–75.
3. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : утв. и введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 1971-ст). Прил. В, Д, Е, Ж, И, М, Н. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (дата обращения: 20.04.2016).

УДК 519.87:614.8.027

Острейковский В. А., Шевченко Е. Н.
Ostreykovsky V. A., Shevchenko E. N.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА
В ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**QUANTITATIVE ASSESSMENT MATHEMATICAL MODELLING
OF TECHNOGENIC RISK IN THEORY OF SAFETY OF CRUCIAL OBJECTS**

В статье рассматриваются чрезвычайно актуальные вопросы математического моделирования расчетов количественного определения техногенной безопасности сложных динамических систем, предназначенных для использования в условиях хрупкой природной среды Севера. В качестве основного критерия безопасности технических систем используется техногенный риск.

Ключевые слова: риск, техногенный риск, исходное событие аварии, ущерб, безопасность.

В последние тридцать лет одним из основных показателей техногенной безопасности критически важных объектов (КВО) стали показатели риска. В данной статье под риском будем понимать возможный ущерб (последствие) вследствие реализации исходного события отказа, аварии или катастрофы исследуемого объекта. Применительно к тематике конференции таковыми объектами являются сложные динамические КВО, существующие или проектируемые для использования на Севере. В настоящее время особую опасность представляют системы добычи и транспортировки углеводородов, энергетические объекты и транспортные средства, в том числе с ядерными энергетическими установками.

Как известно [1; 4; 6; 7], количественное значение риска определяется с помощью выражения

$$R = H \{ Q C \}, \quad (1)$$

где R – количественный показатель риска; H – искомый оператор; Q – вероятность исходного события; C – последствия (ущерб) от исходного события (отказа, аварии, катастрофы).

Этот подход обычно интерпретируется двумерной кривой Ф. Фармера [4; 6] (рис. 1).

При этом под значением самого риска на рис. 1 понимается значение возможного ущерба C при соответствующем значении вероятности q .

Недостатками данного подхода являются: 1) неучет изменения величин Q и C во времени; 2) величины Q и C в общем случае являются либо случайными величинами, либо случайными процессами, что и наблюдается при реальной эксплуатации систем.

Если риск определяется как произведение вероятности нежелательного (исходного) события на величину ущерба от него, то

$$R = Q C,$$

где R – риск; Q – вероятность исходного события; C – ущерб от данного события.

Две в общем случае независимые переменные Q и C образуют двумерное пространство. На этом пространстве может быть определена двумерная функция R , которая представляет множество всех значений риска R_{ii} , соответствующих возможным комбинациям вероятностей Q_i и ущербов C_i

$$R_{ii} = Q_i C_i.$$

Для сложных систем понятие риска обобщается как сумма рисков от различных потенциально возможных событий [5].

В идеале это должна быть

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n Q_i C_i \quad (2)$$

сумма по всему дереву событий данной системы.

В этом случае все возможные риски образуют поверхность в трехмерном пространстве Q, C, R . Вид этой поверхности представлен на рис. 2.

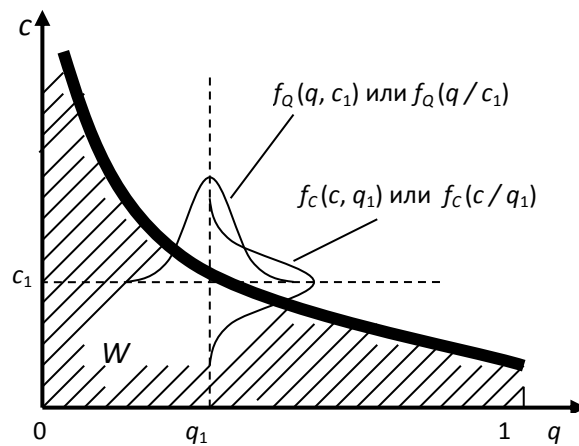


Рис. 1. Развитие модели риска

Математические модели для количественной оценки риска:

Класс моделей 1. Вероятности исходных событий q_i и ущерб c_i являются случайными и независимыми величинами. Тогда риск R определяется классическим способом по Ф. Фармеру

$$R = H_1 \{q, c\} = \sum_{i=1}^n q_i c_i, i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

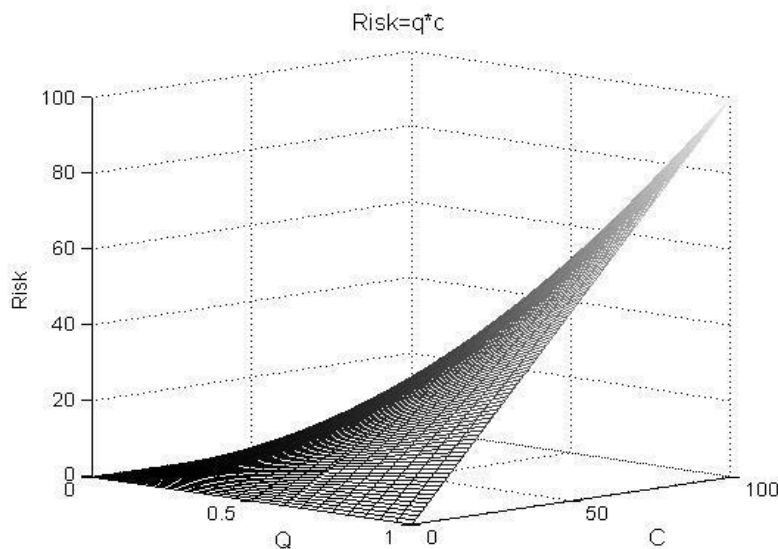


Рис. 2. Поверхность рисков

Класс моделей 2. Вероятности исходных событий q_i и ущерб c_i являются независимыми случайными величинами, задаваемыми в общем случае своими законами распределения $f_Q(q/c_i)$ и $f_C(c/q_i)$, как показано на рис. 1. Тогда

$$R = H_2 \{q, c\};$$

и

$$F_R(r) = \iint_W f_{QC}(q, c) dqdc = \iint_W f_Q(q) f_C(c) dqdc, \quad (4)$$

где $F_R(r)$ – функция распределения риска; W – область определения, задаваемая как

$$W_1 : \begin{cases} 0 \leq q \leq 1, 0; \\ 0 \leq c \leq c_{\max}; \end{cases} \text{ или } W_2 : \begin{cases} 0 \leq q \leq 1, 0; \\ 0 \leq c \leq r/q. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, если известен вид законов распределения и значения их параметров $f_Q(q)$ и $f_C(c)$, то можно определить вид и значение параметров функции распределения $F_R(r)$ и плотности $f_R(r)$ техногенного риска.

Формула (4) при независимых величинах вероятности и ущерба видоизменится следующим образом:

$$F_R(r) = \int_0^{1/r/q} \int_0^1 f_Q(q) f_C(c) dqdc, \quad (6)$$

$$f_R(r) = \int_q^1 \frac{1}{q} f_Q(q) f_C\left(\frac{r}{q}\right) dq. \quad (7)$$

Класс моделей 3. Вероятности исходных событий q_i и ущерб c_i являются зависимыми случайными величинами с функцией связи $Q = \alpha(c)$. Тогда

$$R = H_3 \{q, c/q\},$$

и

$$F_R(r) = \iint_{W_3} f_{Q/C}(q, c) dqdc = \int_0^{\infty} \int_0^{\alpha(c)} f_Q(q) f_C(c) dqdc, \quad (8)$$

по области интегрирования

$$W_3 : \begin{cases} 0 \leq q \leq \alpha(c); \\ 0 \leq c < \infty. \end{cases}$$

В практике исследования безопасности КВО используется целый ряд известных в математической статистике и теории надежности законов распределения ущерба и вероятностей исходных событий отказов, аварий и катастроф. К ним относятся законы: Гаусса, Вейбулла, логарифмически нормальный, экспоненциальный, гамма-распределение, Стьюдента, Парето, Эрланга и др.

В качестве примера приведем полученные в последние годы на кафедре информатики и вычислительной техники Сургутского государственного университета аналитические зависимости для количественного определения значений техногенного риска КВО (табл. 1–3) [4; 5–7].

Таблица 1

**Законы распределения случайных величин Q и C
в теории техногенного риска**

Распределение вероятности исходных событий	Распределение ущерба
Нормальный $m_q > 3\sigma_q$ $f_Q(q) = \frac{1}{\sigma_q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(q-m_q)^2}{2\sigma_q^2}}$	Нормальный $m_c > 3\sigma_c$ $f_C(c) = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c-m_c)^2}{2\sigma_c^2}}$
Рэля $f_Q(q) = \frac{q}{\sigma_q^2} e^{-\frac{q^2}{2\sigma_q^2}}$	Рэля $f_C(c) = \frac{c}{\sigma_c^2} e^{-\frac{c^2}{2\sigma_c^2}}$
Вейбулла $f_Q(q) = \alpha_q \lambda_q q^{\alpha_q-1} e^{-\lambda_q q^{\alpha_q}}$	Вейбулла $f_C(c) = \alpha_c \lambda_c c^{\alpha_c-1} e^{-\lambda_c c^{\alpha_c}}$
Логнормальный $q, \sigma > 0$. $f_Q(q) = \frac{1}{q\sigma_q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln q - m_q)^2}{2\sigma_q^2}}$	Логнормальный $c, \sigma > 0$. $f_C(c) = \frac{1}{c\sigma_c \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln c - m_c)^2}{2\sigma_c^2}}$
Стьюдента $f_Q(q, n) = \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_q}{2}\right) \sqrt{\pi n_q}} \left(1 + \frac{q^2}{n_q}\right)^{-\frac{n_q+1}{2}}$	Стьюдента $f_C(c, n) = \frac{\Gamma\left(\frac{n_c+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_c}{2}\right) \sqrt{\pi n_c}} \left(1 + \frac{c^2}{n_c}\right)^{-\frac{n_c+1}{2}}$
Усеченный нормальный $f_Q(q) = \frac{1}{\Phi\left(\frac{a_{2q}-m_q}{\sigma_q}\right) - \Phi\left(\frac{a_{1q}-m_q}{\sigma_q}\right)} \times$ $\times \frac{1}{\sigma_q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(q-m_q)^2}{2\sigma_q^2}}$	Усеченный нормальный $f_C(c) = \frac{1}{\Phi\left(\frac{a_{2c}-m_c}{\sigma_c}\right) - \Phi\left(\frac{a_{1c}-m_c}{\sigma_c}\right)} \times$ $\times \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c-m_c)^2}{2\sigma_c^2}}$
где $\Phi(x)$ – функция Лапласа в форме $\int_0^x \varphi_N(t) dt$; $\varphi_N(x)$ – плотность вероятности стандартного нормального распределения	
Экспоненциальный $f_Q(q) = \lambda_q e^{-\lambda_q q}$	Экспоненциальный $f_C(c) = \lambda_c e^{-\lambda_c c}$
Парето $f_Q(q) = \frac{k q_m^k}{q^{k+1}}$	Парето $f_C(c) = \frac{k c_m^k}{c^{k+1}}$
Эрланга $f_Q(q) = \frac{k q_m^k}{q^{k+1}}$	Эрланга $f_C(c) = \frac{k c_m^k}{c^{k+1}}$
Гамма-распределение $f_Q(q) = \begin{cases} q^{k-1} \frac{e^{-q/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)}, & q \geq 0 \\ 0, & q < 0 \end{cases}$	Гамма-распределение $f_C(c) = \begin{cases} c^{k-1} \frac{e^{-c/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)}, & c \geq 0 \\ 0, & c < 0 \end{cases}$

Аналитические зависимости для функций плотности
распределения техногенного риска

Распределения вероятности Q и ущерба C	Плотность распределения риска
Q – Гаусса $m_q > 3\sigma_q$ C – Гаусса $m_c > 3\sigma_c$	$f_R(r) = \frac{1}{2\pi\sigma_q\sigma_c} \times \int_0^1 \frac{1}{q} \exp\left\{-\frac{(q-m_q)^2}{2\sigma_q^2} - \frac{(r/q-m_c)^2}{2\sigma_c^2}\right\} dq$
Q – Рэлея C – Рэлея	$f_R(r) = \frac{r}{\sigma_q^2\sigma_c^2} \times \int_0^1 \frac{1}{q} \exp\left\{-\frac{q^2}{2\sigma_q^2} - \frac{r^2}{2q^2\sigma_c^2}\right\} dq$
Q – Вейбулла C – Вейбулла	$f_R(r) = \alpha_q \lambda_q \alpha_c \lambda_c r^{\alpha_c-1} \times \int_0^1 q^{\alpha_q-\alpha_c-1} \exp\{-\lambda_q q^{\alpha_q} - \lambda_c (\frac{r}{q})^{\alpha_c}\} dq$
Q – логнорм C – логнорм	$f_R(r) = \frac{1}{2\pi r \sigma_q \sigma_c} \times \int_0^1 \frac{1}{q} \exp\left\{-\frac{(\ln q - m_q)^2}{2\sigma_q^2} - \frac{(\ln r/q - m_c)^2}{2\sigma_c^2}\right\} dq$
Q – Стьюдента C – Стьюдента	$f_R(r) = \frac{\Gamma\left(\frac{n_q+1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{n_c+1}{2}\right)}{\pi\sqrt{n_q n_c}\Gamma\left(\frac{n_q}{2}\right)\Gamma\left(\frac{n_c}{2}\right)} \times \int_0^1 \frac{1}{q} \left(1 + \frac{q^2}{n_q}\right)^{-\frac{n_q+1}{2}} \left(1 + \frac{r^2/q^2}{n_c}\right)^{-\frac{n_c+1}{2}} dq$
Q – усеч. норм. C – усеч. норм.	$f_R(r) = \frac{\int_0^1 \frac{1}{q} \exp\left\{-\frac{(q-m_q)^2}{2\sigma_q^2} - \frac{(r/q-m_c)^2}{2\sigma_c^2}\right\} dq}{2\pi\sigma_q\sigma_c \left[\Phi\left(\frac{a_{2q}-m_q}{\sigma_q}\right) - \Phi\left(\frac{a_{1q}-m_q}{\sigma_q}\right)\right] \left[\Phi\left(\frac{a_{2c}-m_c}{\sigma_c}\right) - \Phi\left(\frac{a_{1c}-m_c}{\sigma_c}\right)\right]}$
Q – Парето C – Парето	$f_R(r) = \frac{k_q k_c q_m^{k_q} c_m^{k_c}}{r^{k_c+1}} \int_0^1 q^{k_c-k_q-1} dq$
Q – Эрланга C – Эрланга	$f_R(r) = \frac{\lambda_q^{k_q} \lambda_c^{k_c} r^{k_c-1}}{(k_q-1)!(k_c-1)!} \int_0^1 q^{k_q-k_c-1} e^{-\lambda_q q - \lambda_c \frac{r}{q}} dq$
Q – Гамма-распределение C – Гамма-распределение	$f_R(r) = \frac{r^{k_c-1}}{\theta_q^{k_q} \theta_c^{k_c} \Gamma(k_q) \Gamma(k_c)} \int_0^1 q^{k_q-k_c-1} e^{-\frac{q}{\theta_q} - \frac{r}{q\theta_c}} dq$

**Аналитические зависимости для функции плотности
распределения техногенного риска**

Распределения вероятности Q и ущерба C	Плотность распределения риска $f_R(r)$
Q – Рэлея C – Гаусса, $m_c > 3\sigma_c$	$\frac{1}{\sigma_q^2 \sigma_c \sqrt{2\pi}} \int_0^1 \exp\left\{-\frac{q^2}{2\sigma_q^2} - \frac{(r/q - m_c)^2}{2\sigma_c^2}\right\} dq$
Q – экспоненциальное C – Рэлея	$\frac{r\lambda_q}{\sigma_c^2} \int_0^1 \frac{1}{q^2} \exp\left\{-\lambda_q q - r^2 / 2q^2 \sigma_c^2\right\} dq$
Q – Рэлея C – экспоненциальное	$\frac{\lambda_c}{\sigma_q^2} \int_0^1 \exp\left\{-\frac{q^2}{2\sigma_q^2} - \frac{r\lambda_c}{q}\right\} dq$
Q – Стьюдента C – Вейбулла	$f_R(r) = \frac{\alpha_c \lambda_c}{r} \frac{\Gamma\left(\frac{n_q + 1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_q}{2}\right) \sqrt{\pi n_q}} \times$ $\times \int_0^1 \left(1 + \frac{q^2}{n_q}\right)^{-\frac{n_q+1}{2}} \left(\frac{r}{q}\right)^{\alpha_c} \exp\left\{-\lambda_c \left(\frac{r}{q}\right)^{\alpha_c}\right\} dq$
Q – Парето C – Гамма-распределение	$f_R(r) = \frac{k_q q_m^{k_q} r^{k_c-1}}{\theta_c^{k_c} \Gamma(k_c)} \int_0^1 \frac{e^{-r/q\theta_c}}{q^{k_q+k_c+1}} dq$
Q – Гамма-распределение C – Парето	$f_R(r) = \frac{k_c c_m^{k_c}}{\theta_q^{k_q} \Gamma(k_q) r^{k_c+1}} \int_0^1 q^{k_q+k_c-1} e^{-q/\theta_q} dq$

Как видно из приведенных в табл. 1–3 данных, аналитические выражения для функций плотности $f_R(r)$ зависят от параметров соответствующих законов распределений, что является преимуществом с точки зрения простоты определения функций распределения риска $F_R(r)$. Значения параметров законов плотностей $f_Q(q)$ и $f_C(c)$ можно получить двумя путями: первый путь – по статистическим данным реальной эксплуатации конкретного объекта или его аналогов, второй – методами математического моделирования на ЭВМ. Второй путь, естественно, имеет свои преимущества и недостатки по сравнению с первым. Для первого пути точность получения параметров законов распределения случайных величин по экспериментальным и статистическим данным всегда связан с проблемами обработки малых выборок.

В частности, для некоторых из представленных в табл. 1–3 зависимостей на рис. 3а–д приведены значения плотностей риска. Обоснования конкретных значений параметров распределения выбранных законов взяты на основании большого числа статистических исследований, выполненных авторами статьи в Обнинском ИАТЭ НИЯУ МИФИ, применительно к надежности и безопасности оборудования ядерных энергетических установок типа ВВЭР-1000 (Калининская АЭС), РБМК-1000 (Смоленская АЭС), БН-600 (Белоярская АЭС) и ЭГП-6 (Билибинская АЭС) [2; 4; 5–7], а также в Сургутском государственном университете по надежности и безопасности нефтяных трубопроводов [2–4; 6].

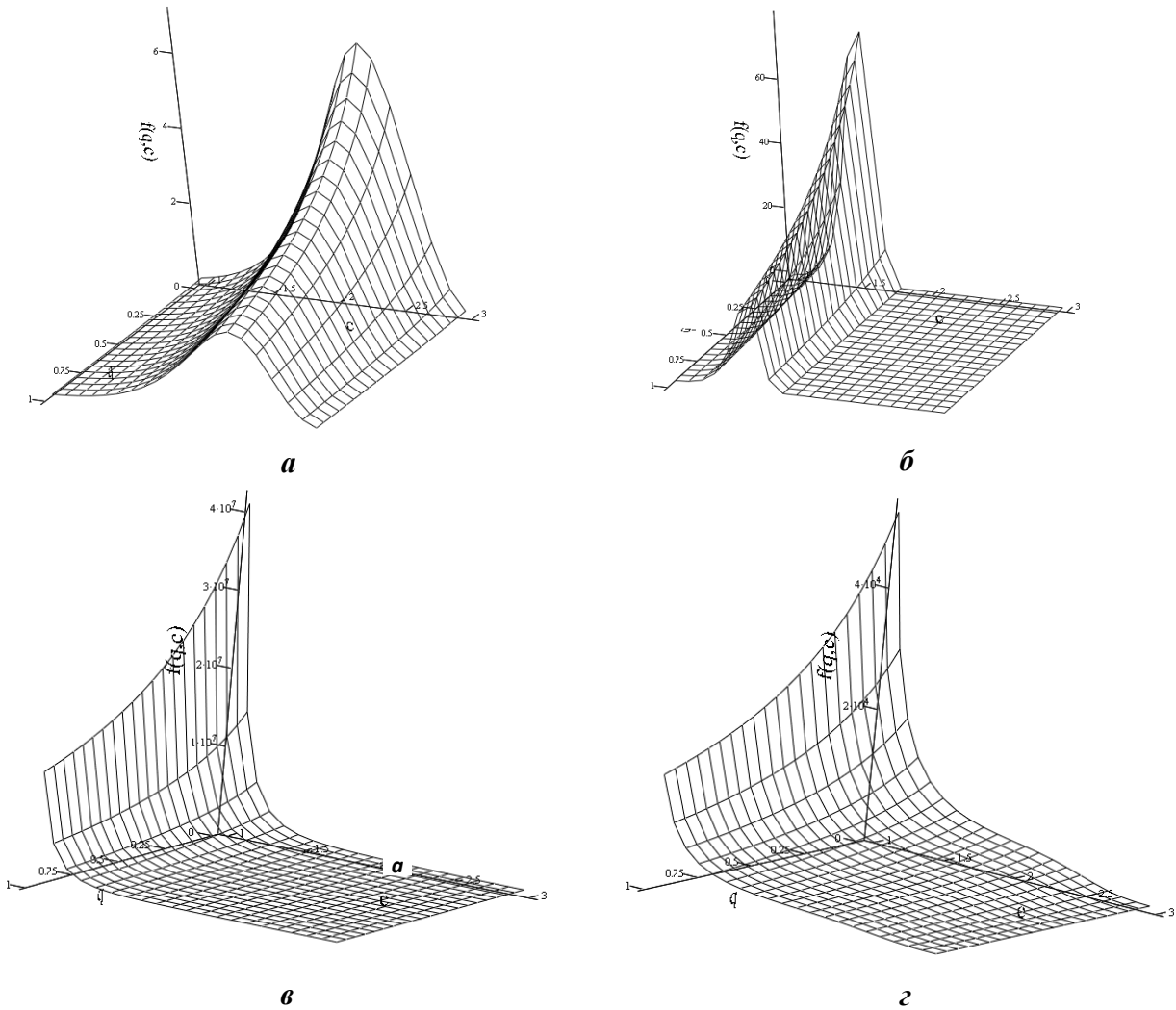


Рис. 3. Зависимость плотности $f_{QC}(q, c)$ для законов распределения случайных величин, распределенных Q по закону Стьюдента, C – по закону Вейбулла:
a – $\alpha_c = 10$; $\lambda_c = 0,0001$; $n_q = 10$; **б** – $\alpha_c = 10$; $\lambda_c = 0,0001$; $n_q = 20$;
в – $\alpha_c = 20$; $\lambda_c = 0,0001$; $n_q = 10$; **г** – $\alpha_c = 30$; $\lambda_c = 0,0001$; $n_q = 10$

Заключение

1. Получены аналитические выражения для определения плотности распределения техногенного риска при независимых случайных величинах вероятности исходных событий и ущерба от них при различных законах распределения.
2. Проведено численное моделирование на ЭВМ плотности вероятностей риска для законов распределения случайных величин, распределенных: Q по закону Стьюдента, C – по закону Вейбулла.
3. Рассмотрены комбинации законов распределения исходных событий и ущерба нормального, Рэлея, Вейбулла, логарифмически нормального, Стьюдента.
4. Для функций распределения Гаусса и Рэлея наблюдается быстрое приближение функции плотности риска к нулю с ростом значения риска в незначительных пределах. Логарифмически нормальный закон, закон Вейбулла в определенном диапазоне и закон Стьюдента имеют тяжелые хвосты, больше соответствующие реальным данным о редких событиях аварий.
5. Оказалось, что для функций распределения Вейбулла при некоторых рассмотренных значениях параметров функция плотности риска не может быть получена.

б. Как и следовало ожидать, значения плотностей вероятностей техногенного риска существенно зависят как от вида, так и от значений параметров законов распределения случайных величин Q и C .

Литература

1. Королев В. Ю., Бенинг В. Е., Шоргин С. Я. Математические основы теории риска : учеб. пособие. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 544 с.
2. Муравьев И. И., Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. В 2 т. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. Т. 1. С. 24–27.
3. Острейковский В. А., Муравьев И. И., Шевченко Е. Н. Время как фактор в теории техногенного риска // ИНФО-2015 : тр. междунар. науч.-практич. конф. Сочи, 1–10 октября 2015 / под общ. ред. С. У. Увайсова. М. : МИЭМ НИУ ВШЭ. 2015. С. 217–222.
4. Острейковский В. А., Генюш А. О., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование техногенного риска. Сургут : ИЦ СурГУ, 2010. 96 с.
5. Острейковский В. А. О некоторых классах моделей риска в теории техногенной безопасности // Надежность и качество : тр. междунар. симпозиума. В 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. Т. 1. С. 46–49.
6. Острейковский В. А. Теория техногенного риска: математические методы и модели : моногр. Сургут : ИЦ СурГУ, 2013. 320 с.
7. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н., Микшина В. С. Количественная оценка риска в техногенной безопасности сложных динамических систем : моногр. // Итоги науки : избран. тр. междунар. симпозиума по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2013 Т. 1. С. 12–31.

УДК 622.276.7:622.8

*Сазонова Ю. А., Гудошник Е. Э.
Sazonova Yu. A., Gudoshnik E. E.*

**ПРОБЛЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ
КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА СКВАЖИН КАК
ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕКТА**

**PROBLEMS OF INDUSTRIAL SAFETY DURING WELL WORKOVER
AS HAZARDOUS INDUSTRIAL FACILITY**

В данной статье рассмотрены проблемы промышленной безопасности, возникающие в условиях Крайнего Севера. На основе анализа показателей аварийности и травматизма выявлена закономерность между техническими причинами и факторами, влияющими на безопасность выполнения работ капитального ремонта скважин. Обоснована необходимость в определении этих факторов риска и их оценки. Конкретизированы проблемы и предложены пути по их предупреждению.

Ключевые слова: промышленная безопасность, опасный производственный объект, капитальный ремонт скважин, условия Крайнего Севера.

Научно-технический прогресс в предупреждении, ликвидации аварий и осложнений при бурении и добыче нефти способствует значительному повышению производительности труда, повышению эффективности и качества работ. Однако существует ряд проблем в области промышленной безопасности при обслуживании и ремонте буровых установок, находящихся в районах Крайнего Севера.

К районам Крайнего Севера относятся территории с суровым климатом, с четкой сменной времен года, большой продолжительностью зимы и коротким летом. Формируется климат за счет открытой территории с севера, что, в свою очередь, способствует проникновению арктических воздушных масс и атмосферных осадков в виде снега, превышающих иногда нормы метеорологических показателей [3].

Проанализировав общее состояние аварийности и производственного травматизма со смертельным исходом в отраслях нефтяной промышленности, а именно при обслуживании и ремонте буровых установок, на объектах поднадзорных Северо-Уральскому управлению Ростехнадзора за 2013, 2014 гг., 6 месяцев 2015 г., можно выявить следующую закономерность: большее количество аварий и травм приходится на такие времена года, как весна-лето-осень (рис. 1, 2) [5].

Основными техническими причинами аварий и несчастных случаев за следующие отчетные периоды являются: неудовлетворительное состояние технических устройств и сооружений, неисправность технического оборудования.

Основными опасными производственными факторами являются движущиеся машины и механизмы, разрушающиеся конструкции, повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования, материалов, повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны, повышенный уровень шума на рабочем месте, повышенный уровень вибрации и т. д. [1].

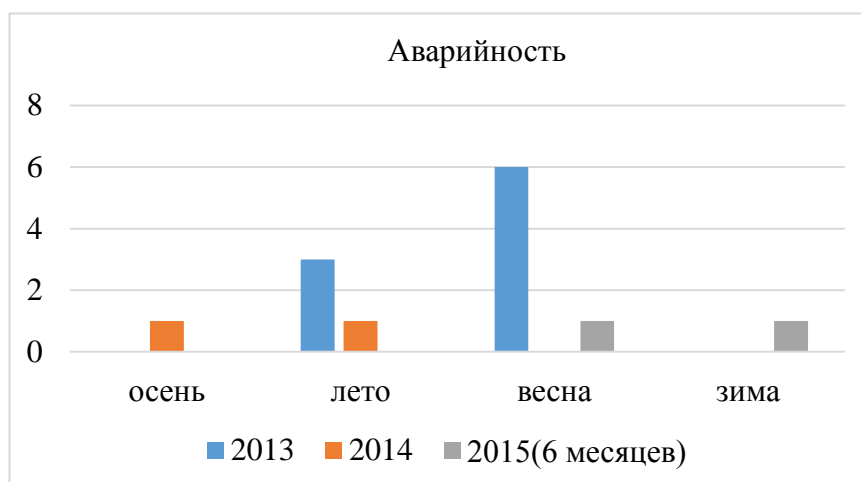


Рис. 1. Аварийность в отраслях нефтяной промышленности

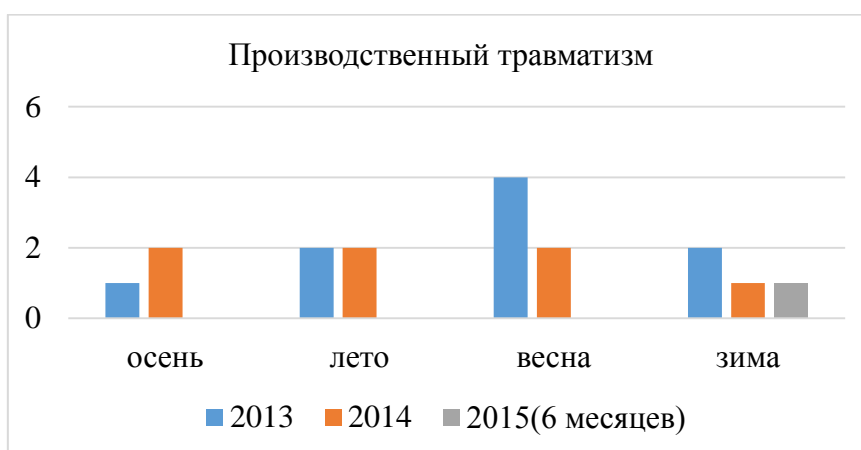


Рис. 2. Производственный травматизм в нефтяной промышленности

Возникающие аварийные ситуации и технические неполадки при обслуживании и ремонте скважин обусловлены следующим: непрерывный характер технологических процессов, осуществляемых круглосуточно независимо от различных климатических и сезонных изменений состояния окружающей среды, а также вахтовый метод работы, обосновывающий человеческий фактор как причину возникновения аварии или травмы.

Теоретически можно объяснить превышающие показатели аварийности и травматизма в это время тем, что большая часть объема работ выполняется именно в эти времена года, то есть возможными причинами неисправности, преждевременного износа, поломки, засорения, недостаточности смазки и т. д. являются резкие перепады температур, различные погодные условия в виде атмосферных осадков или порывов ветра, превышающих нормы метеорологических показателей и т. п. Немаловажным фактором преждевременного износа оборудования и аварийности, связанным с ним, является неустойчивый грунт и заболоченность территории в месте нахождения буровых установок и скважин [2].

Капитальный ремонт скважин и их обслуживание представляет собой производство работ повышенной опасности, а именно работы с оборудованием под давлением, погрузочно-разгрузочные работы с применением грузоподъемных машин, работы с использованием вращающегося оборудования, внутрискважинные операции, работы в отдаленной местности, работы на открытом воздухе в условиях низких температур, совмещенные работы при эксплуатации скважин и их ремонте.

К капитальным ремонтам и приравненным к ним работам по классификатору:

- ремонтно-изоляционные (шифр КР-1);
- устранение не герметичности эксплуатационной колонны (КР-2);
- устранение аварий, допущенных в процессе эксплуатации или ремонта (КР-3);
- переход на другие горизонты и приобщение пластов (КР-4);
- внедрение и ремонт установок, пакеров-отсекателей (КР-5).

Шифром КР-6 обозначается комплекс подземных работ, связанных с бурением:

- КР-7 – с обработкой призабойной зоны;
- КР-8 – исследование скважин;
- перевод скважин на использование по другому назначению (КР-9);
- ввод в эксплуатацию и ремонт нагнетательных скважин (КР-10);
- консервация и расконсервация скважин (КР-11).

Завершают классификатор прочие виды работ, обозначенные как КР-12.

Опасные факторы, сопутствующие этим работам, при не правильной технике безопасности или при ее не соблюдении, а также отсутствии контроля технического состояния и параметров технологических процессов будут являться первоочередными причинами возникновения аварий и травматизма [4].

Опасные факторы при обслуживании и капитальном ремонте скважин:

- давление жидкостей, газов и паров в оборудовании, коммуникациях;
- движущееся грузоподъемное оборудование и его части;
- перемещение грузов грузоподъемным оборудованием;
- вращающиеся части оборудования;
- давление жидкости/газа в стволе скважины, оборудование под давлением;
- взрывопожароопасная среда;
- оборудование и работы на высоте;
- отдаленность места выполнения работ;
- опасные погодные условия;
- дикие животные;
- неровные, скользкие поверхности;
- перепады температур;
- движение техники;
- взрывопожароопасная среда.

Все приведенные выше опасные производственные факторы (ОПФ) и проблемы, возникающие в процессе работы капитального ремонта скважин как опасного производственного объекта, можно избежать соблюдая правила охраны труда, инструкции, положения, связанные с этими работами, а также следующие меры безопасности, разработанные специально во избежание воздействия вышеперечисленных ОПФ:

- должны быть подготовлены технологические карты, инструкций и т. п. в соответствии с требованиями нормативно-технической документации РФ;
- оформлен наряд-допуск и другие разрешающие документы предприятия;
- использованы средства индивидуальной и коллективной защиты;
- все механизмы подъема и передвижки свай должны быть освидетельствованы на исправность и пригодность к работе с записью в сменном журнале перед началом работ;
- все механизмы подъема и передвижки свай должны быть промаркированы подтверждающими их грузоподъемность и проведенные испытания бирками/наклейками;
- на всех механизмах подъема и передвижки свай должны быть установлены ограничители по высоте и грузоподъемности;
- проверены механизмы на отсутствие пропусков и нарушение герметичности, а также исправность предохранительных замыкающих устройств;
- обеспечена связь между руководителем работ и оператором техники;

- ремонтируемый объект должен быть отключен от технологической системы запорной арматурой, освобожден от рабочей среды, очищен от грязи, шлама и отложений, продут азотом, промыт водой или пропарен водяным паром, отглушен стандартными заглушками/проглушками;
- электроприводы движущихся механизмов должны быть отключены от источников питания видимым разрывом;
- приняты меры по недопущению падения приспособлений и инструмента;
- все движущиеся и вращающиеся части оборудования и механизмов ограждены защитными экранами, кожухами или защитными щитками;
- все рабочие и специалисты, выполняющие работы на скважинах, должны быть обучены и аттестованы в специализированных учебных центрах;
- работники обучены приемам и навыкам, связанным со спецификой работ в данном районе, мерам предосторожности по отношению к опасной фауне;
- обеспечение внешними термометрами и приборами измерения силы ветра, находящимися в рабочем состоянии;
- при низких температурах от $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже необходимо предоставлять персоналу возможность погреться в помещениях в течение 10-минутного перерыва после каждого часа работы;
- при низких температурах от $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже необходимо увеличить контроль за параметрами и технологическими процессами всего производственного цикла;
- на кустовой площадке должно быть разработано положение о порядке организации безопасного производства работ (эвакуация людей, транспорта, оборудования при возникновении аварийной ситуации).

Соблюдая меры безопасности и определяя опасные факторы перед началом работ, возможность возникновения проблем стремится к нулю. В процессе работы также необходимо проводить оценку рисков и анализ безопасности работ, так как в условиях Крайнего Севера износ и возникновение прочих технических неисправностей оборудования/механизмов гораздо выше.

Литература

1. Волков А. С., Долгов Б. П. Техника безопасности при вращательном бурении скважин М. : Недра, 1980. 144 с.
2. Гончаров А. Е., Винниченко В. М. Пособие бурильщику и мастеру по предупреждению и ликвидации аварий и осложнений при бурении. М. : Недра, 1987. 128 с.
3. Денисов В. В., Грачев В. А., Азаров В. Н. и др. Экология : учеб. пособие. М. : МарТ, 2009. 768 с.
4. Лобкин А. Н. Обслуживание и ремонт буровых установок : учеб. пособие для учащихся профтехобразования и рабочих на производстве. М. : Недра, 1985. 320 с.
5. ГОСТ 12.0.003-74. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002.
6. Общее состояние аварийности и производственного травматизма со смертельным исходом : Северо-Уральское управление Ростехнадзора // Анализ аварийности и травматизма. URL: <https://www.sural.gosnadzor.ru> (дата обращения 9.04.2016).

УДК 656.13: 629.331.063.2: 504:061(571.122) ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЮГОРСК»

Сарынин И. И., Гудошник Е. Э.
Sarynin I. I., Gudoshnik E. E.

**ПЕРЕВОД АВТОТРАНСПОРТА ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЮГОРСК»
НА ГАЗОМОТОРНОЕ ТОПЛИВО. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ
СРЕДУ И СОЗДАНИЕ ЗДОРОВЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА**

**VEHICLES TRANSFER OF LLC «GAZPROM TRANSGAZ UGORSK»
TO NATURAL GAS MOTOR FUEL.
IMPACT ON ENVIRONMENT AND CREATING HEALTHY WORKING CONDITIONS**

Статья посвящена вопросу перевода автотранспорта на газомоторное топливо с характеристикой влияния на окружающую природную среду и здоровье населения в условиях Севера на примере ООО «Газпром трансгаз Югорск».

Ключевые слова: Газомоторное топливо, Газпром трансгаз Югорск, перевод автотранспорта, окружающая среда, здоровые условия труда.

В соответствии со ст. 58 Конституции Российской Федерации каждый имеет право на благоприятную окружающую среду, каждый обязан сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам, которые являются основой устойчивого развития, жизни и деятельности народов, проживающих на территории Российской Федерации.

В соответствии со ст. 37 Конституции Российской Федерации каждый имеет право на труд в условиях, отвечающих требованиям безопасности и гигиены [1].

Для успешного обеспечения автотранспортными предприятиями прав, закрепленных в конституции, в данной статье предлагается рассмотреть вопрос о переводе техники на газомоторное топливо (далее – ГМТ). ГМТ является компримированным природным газом (далее КППГ). КППГ – сжатый природный газ, используемый в качестве моторного топлива вместо бензина, дизельного топлива и пропана. Он дешевле традиционного топлива, а вызываемый продуктами его сгорания парниковый эффект меньше по сравнению с обычными видами топлива, поэтому он безопаснее для окружающей среды. Заправка КППГ автомобилей производится на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (далее – АГНКС).

Токсичные выбросы от автотранспортных средств (далее – АТС) отрицательно сказываются на здоровье людей и животных, вызывают повреждения растений, ускоряют коррозию металлов и разрушение строительных конструкций. Наибольший вред для человека, животного и растительного мира приносят оксиды азота и серы, сажа, альдегиды, оксид углерода, углеводороды, бенз(а)пирен, аммиак. Существенное значение имеют также запах и слезоточивое действие отработавших газов. Токсичные продукты сгорания топлива накапливаются в почве, воде, растениях и на сооружениях. Находясь в воздухе, они частично превращаются в другие соединения, которые могут быть даже более токсичными, чем исходные продукты.

На сегодняшний день КППГ является наиболее доступным и экологичным среди альтернативных моторных топлив. Его использование позволяет значительно снизить количество токсичных веществ в выхлопных газах, до уровня стандартов Евро-4, Евро-5.

Существенными факторами, стимулирующими государства мирового сообщества к развитию рынка ГМТ, являются экологические проблемы. Вклад АТС в загрязнение воздуха крупных городов и агломераций составляет от 50 до 90 % по всем видам загрязнений. Поэтому требования к снижению токсичности выпускных газов двигателя внутреннего сгора-

ния (далее ДВС) АТС постоянно возрастают, вводятся стандарты Евро-4 и Евро-5. Между тем перевод АТС на ГМТ сокращает выбросы диоксида углерода (основной парниковый газ) на 13 %, оксидов азота – на 15–20 %, в 8–10 раз снижает дымность отработанных газов и полностью исключает выбросы соединений свинца [2]. Если взять бензин качества Евро-4 за эталон, то окажется, что по выбросам оксидов азота КПП выигрывает почти в три раза, по СН – в 14 раз, по бензапирену – более чем в 16 раз, по саже – в 3 раза (в сравнении с соляркой – в 100 раз). Следовательно, по уровню выбросов вредных веществ в атмосферу КПП уступает только электроэнергии.

Длительный контакт людей со средой, отравленной выхлопными газами автомобилей, вызывает общее ослабление организма – иммунодефицит. Кроме того, газы сами по себе могут стать причиной различных заболеваний органов дыхания, нервной системы, органов зрения, сердечно-сосудистой системы и других частей организма. Отсюда можно сделать вывод: если уменьшить выбросы от АТС, то уменьшится заболеваемость населения.

Автомобили на ГМТ улучшают условия труда тем, что автомобили работают тише на 10 Дб по сравнению с аналогами на традиционных топливах. У большинства предприятий в эксплуатации находится старая техника, где повышенный уровень шума, а это затраты на компенсацию за вредные условия труда и дополнительные дни отпуска. Хотелось бы отметить, что техника на ГМТ ломается реже, а это несомненный плюс в том, что в условиях жесточайшей экономии на ряде предприятий были упразднены слесари и автомеханики, и водителям приходится самим ремонтировать автомобили, можно сказать, даже и на улице. Еще одно из преимуществ КПП для предприятий – его невозможно слить в отличие от жидких видов топлив. АТС, работающие на ГМТ, обозначаются отличительными надписями. Также работающие с АТС на КПП более технически грамотный персонал, ведь все сотрудники проходят специальное обучение. Касаясь вопроса безопасности, можно сказать, что раз в 3 года проводится освидетельствование баллонов Ростехнадзором. Сами баллоны состоят из прочных материалов, по сравнению с жидкими видами топлива, и баллонов для пропана. Располагаются баллоны на грузовом автотранспорте на большей высоте, выше высоты легковых автомобилей, с участием которых происходят основные ДТП. Температура воспламенения КПП выше, чем у других видов топлива. Еще одно преимущество газа в том, что он легче воздуха, и он не взрывается, а горит факелом.

Эксплуатация автомобильного, технологического транспорта и специальной техники на территории Ханты-Мансийского автономного округа (далее – ХМАО) и Ямало-Ненецкого автономного округа (далее – ЯНАО), где плохие дорожные и климатические условия, а также пониженные свойства топливно-смазочных материалов приводят к ускоренному изнашиванию агрегатов и узлов автомобилей, что, в свою очередь, приводит к увеличению выбросов в атмосферу от АТС. Усиливается загрязнение атмосферы в связи с текущими неисправностями и нарушениями регулировок при использовании транспорта, которые вызывают ухудшение показателей токсичности и топливной экономичности. Для повышения надежности АТС в условиях севера предприятия вынуждены закупать дорогостоящие ГСМ. В большинстве случаев при эксплуатации в условиях севера виной всему несвоевременное и некачественное техническое обслуживание и ремонт техники, нехватка современного оборудования и квалифицированного персонала для обеспечения безаварийной работы транспорта.

С учетом специфики промышленности регионов ХМАО и ЯНАО, АТС предприятий в основном выполняют объемы работ на удаленных участках производств от центральных баз, где не имеется специализированных ремонтно-механических мастерских. Благодаря проведенным анализам эксплуатации технологического транспорта крупные автотранспортные предприятия и компании ХМАО и ЯНАО начали уделять больше внимания диагностике АТС. Так как было отмечено, что ежедневного осмотра АТС перед выполнением работ на объектах недостаточно для поддержания работоспособности подвижного состава. Намечалась положительная динамика: у ряда предприятий на производственных мощностях начали появляться диагностические центры, специалисты и сотрудники которых проверяют состоя-

ние и исправность эксплуатируемого транспорта. Также в обязанности персонала начали входить экспресс-замеры на токсичность и дымность АТС для соответствия требованиям экологической безопасности, чтобы давать разрешение выпускать технику на линию.

Затрагивая вопрос экономии, отметим, что стоимость КПП в 2–3 раза меньше стоимости жидкого топлива. Цены на топливо в марте 2016 г. в городе Югорске АИ-95 – 37 руб., ДТ – 39 руб., КПП – 12 руб. 60 коп. При этом по расходу топлива 1 м³ КПП эквивалентен 1 литру жидкого топлива. Соответственно, сокращаются расходы на транспортные перевозки. Кроме того, газобаллонный автомобиль (далее ГБА) окупается быстрее своего аналога на жидком топливе, несмотря на более высокую стоимость приобретения. Экономия и в увеличении межремонтных пробегов автомобилей, а также на транспортном налоге на территории ХМАО, т. к. АТС, использующие ГМТ, получают скидку 50 % вне зависимости от мощности двигателя. А на территории Свердловской области скидку 100 % по транспортному налогу для автобусов, соответствующих требованиям ЕВРО-4 и ЕВРО-5. Транспорт на КПП соответствует данным требованиям.

Например, при эксплуатации 1 ГБА КАМАЗ экономия затрат на топливо в год составляет в среднем 480 тыс. руб., 25 КАМАЗов – 12 000 тыс. руб., что существенно даже для экономически благополучных регионов.

Благодаря использованию природного газа в качестве топлива увеличивается срок службы масла и самого ДВС. При работе мотора на ГМТ не происходит смывания масляной пленки со стенок блока цилиндров, кроме того, на головке блока цилиндров не образуются отложения углерода, не закоксовываются поршневые кольца, из-за которых происходит изнашивание элементов двигателя внутреннего сгорания, а его межремонтный пробег увеличивается в полтора-два раза. Кроме того, улучшается работа системы зажигания – срок службы свечей возрастает на 40 %. Все это сокращает затраты на ремонт.

Компания «Газпром трансгаз Югорск» (далее Общество) осуществляет свою деятельность в трёх субъектах Российской Федерации. А именно в ХМАО, в ЯНАО и в Свердловской области. Для осуществления бесперебойного обеспечения Общества грузовыми и пассажирскими перевозками были созданы автотранспортные филиалы компании, подразделения которых находятся вдоль всей сети обслуживания газопроводов.

Актуальность перевода АТС на ГМТ продиктована ужесточением экологических требований к АТС, энергосбережением и увеличением цен на нефтяное моторное топливо.

На территории ЯНАО в 2014 г. выбросы в атмосферный воздух от АТС составили 76,9 т, а это 11,7 % от всех выбросов в атмосферу. По статистическим данным на конец 2014 г. в ЯНАО было зарегистрировано 167 автобусов и 142 грузовых автомобиля на альтернативном виде топлива. На территории ХМАО в 2014 г. выбросы в атмосферный воздух от АТС составили 213,3 т, а это 12,7 % от всех выбросов в атмосферу. По статистическим данным на конец 2014 г. в ХМАО было зарегистрировано 270 автобусов и 504 грузовых автомобиля на альтернативном виде топлива. В Свердловской области в 2014 г. выбросы в атмосферный воздух от АТС составили 432,3 т, а это 30,1 % от всех выбросов в атмосферу. По статистическим данным на конец 2014 г. в Свердловской области было зарегистрировано 267 автобусов, 874 грузовых автомобилей на альтернативном виде топлива [4].

На конец 2014 г. использовали газ в качестве моторного топлива 590 автомобилей Общества, из них:

- в ЯНАО находилось 151 ед.;
- в ХМАО – Югре – 306 ед.;
- в Свердловской области – 133 ед.

Газомоторная инфраструктура Общества состоит из 13 АГНКС, которые расположены в:

- Свердловской области: г. Нижняя Тура; г. Краснотурьинск; п. Пелым (Ивдельский район); г. Ивдель.

- ХМАО – ЮГРА: г. Югорск; п. Уньюган (Октябрьский район); п. Перегребное (Октябрьский район); п. Андра (Октябрьский район); п. Сосновка (Белоярский район); п. Сорум (Белоярский район); г. Белоярский.

- ЯНАО: п. Ягельный (Надымский район); п. Пангоды.

Средняя загрузка АГНКС газобаллонным автотранспортом Общества составляет 27 %, что позволяет производить заправку сторонних АТС как физических, так и юридических лиц. Частные и юридические лица в последнее время все больше интереса проявляют к вопросу применения КПП в качестве моторного топлива, осуществляя переоборудование бензиновых АТС и закупая ГБА [3].

Одной из причин слабого развития автопарка ГБА в частном пользовании является слабая инфраструктура АГНКС. Общество выступает флагманом в своем регионе в области развития сети АГНКС, что позволит расширить применение ГБА для обслуживания газотранспортной системы и в последствии снизит затраты на топливо, а также ремонт автопарка. Уже в октябре 2015 г. на балансе Общества было 734 единицы техники переведено на ГМТ, из них 204 автомобиля работают исключительно на КПП. К концу 2018 г. в планах Общества перевести на газомоторное топливо 75 % автопарка [3]. Для достижения данной цели Общество помогает строительству АГНКС.

Перспектива развития сети АГНКС Общества включает в себя запуск в эксплуатацию с 2016 г. до 2020 г. дополнительно 10 АГНКС:

- г. Карпинск (Свердловская область);
- п. Светлый (ХМАО, Березовский район);
- п. Лыхма (ХМАО, Белоярский район);
- п. Лонгъюган (ЯНАО);
- п. Хулимсунт (ХМАО, Березовский район);
- п. Приполярный (ХМАО, Березовский район);
- п. Приобье (ХМАО, Октябрьский район);
- п. Верхнеказымский (ХМАО, Белоярский район);
- п. Березово (ХМАО);
- п. Игрим (ХМАО, Березовский район).

Использование природного газа в качестве моторного топлива помогает решить и вопрос экологии. Не секрет, что в эксплуатации автотранспортных предприятий находятся АТС, работающие на жидком топливе и не соответствующие необходимым экологическим нормам в силу своего возраста. Существующий модельный ряд ГБА КАМАЗ соответствует нормам уровня Евро-4. Стоит добавить, что при работе на природном газе заметно убавилась шумность ДВС и снижена в разы дымность отработавших газов. Все это особенно актуально для городов.

Таким образом, АТС, использующие в качестве топлива КПП, являются самым экологически чистым, высококорентабельным и безопасным инструментом в автотранспортных перевозках.

Имеющиеся в Обществе производственные мощности позволяют своими силами переоборудовать АТС для работы на ГМТ, проводить техническое обслуживание и текущий ремонт ГБА, а также проводить техническое освидетельствование автомобильных газовых баллонов для их дальнейшей эксплуатации.

По своим техническим характеристикам ГБА не имеет каких-либо ограничений при эксплуатации в северных условиях и работает в Обществе во всех климатических условиях, начиная от г. Нижняя Тура Свердловской области и заканчивая г. Надым ЯНАО. АТС на ГМТ осуществляют различного вида грузоперевозки, на автобусных маршрутах эксплуатируются автобусы и микроавтобусы, специальная техника работает на трассе.

Таким образом, мы видим, что ООО «Газпром трансгаз Югорск» как экологически ответственное предприятие уделяет серьезное внимание вопросам развития парка АТС, работающих на ГМТ.

Литература

1. Конституция РФ (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 № 6-ФКЗ, от 30.12.2008 № 7-ФКЗ, от 05.02.2014 № 2-ФКЗ, от 21.07.2014 № 11-ФКЗ) // Собрание законодательства РФ. 2014. № 31, ст. 4398.
2. ООО «Газпром газомоторное топливо». URL: <http://gazprom-gmt.ru/> (дата обращения: 12.04.2016).
3. ООО «Газпром трансгаз Югорск». URL: <http://yugorsk-tr.gazprom.ru/> (дата обращения: 15.04.2016).
4. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. URL: <http://rpn.gov.ru/> (дата обращения: 30.03.2016).

УДК 614.841.42/.49:614.842.61

Фатеев В. Н.
Fateyev V. N.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ПОЖАРОТУШЕНИЕМ ОЧАГОВ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ С ПОМОЩЬЮ ЗАКРУЧЕННЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

EXTINGUISHING WILDFIRES SYSTEM ANALYSIS AND MANAGEMENT BY SWIRLING GAS JET

Защита лесных ресурсов от пожара является важной задачей управления лесным хозяйством. Усовершенствование методов борьбы с лесными пожарами является актуальной и важной задачей, вызывающей как научный, так и практический интерес. В этой работе описано получение и изучение вихревых кольцевых структур, образующихся при взрыве монтажного порохового патрона в ударной трубе с использованием специального насадка, а также воздействие таких структур на фронт низового лесного пожара.

Ключевые слова: газовая динамика, закрученный поток, лесные пожары, локализация и тушение, эксперимент.

Лесной пожар – это стихийное, неуправляемое распространение огня по лесным площадям, в рамках которого имеют место взаимосвязанные процессы конвективного и радиационного переноса энергии. Основными причинами возникновения лесных пожаров является деятельность человека, грозовые разряды, самовозгорания торфяной крошки и сельскохозяйственных палов в условиях жаркой погоды или в так называемый пожароопасный сезон [3].

Как показали экспериментальные и теоретические исследования, описанные в работе [3], фронт низового пожара имеет сложную структуру, включающую в себя зоны прогрева, сушки и пиролиза лесных горючих материалов (ЛГМ), горения горючих газообразных продуктов пиролиза и догорания конденсированных продуктов. Согласно работе [3] процессы горения зависят от поступающего к очагу горения кислорода и горючих газообразных продуктов пиролиза лесных горючих материалов, таким образом, эти процессы имеют диффузионный характер. Эволюция лесного пожара представляет собой сложный многостадийный процесс, лимитирующийся в основном образованием газовых горючих смесей продуктов пиролиза и их диффузией с кислородом окружающей среды и их последующее сгорание. Разрушение структуры фронта пожара, как показали эксперименты, описанные в работах [3–7], прекращает его распространение. Исходя из того, что во фронте лесного пожара находится

легко детонирующая смесь продуктов пиролиза ЛГМ [2], достаточно небольшого импульса давления для детонации этой смеси и прекращения пламенного горения. Помимо этого, механическое воздействие ударной волны на основные элементы ЛГМ приводит к их срыву, что также способствует прекращению распространения низового лесного пожара.

Целью данной работы являлось получение и изучение вихревых кольцевых структур, образующихся при взрыве монтажного порохового патрона в ударной трубе с использованием специальной насадки, а также воздействие таких структур на фронт низового лесного пожара, который представляет собой систему взаимодействующих процессов теплопереноса [9–11] при горении.

В Институте гидродинамики СО АН СССР им. М. А. Лаврентьева совместно с Управлением пожарной охраны УВД Новосибирского облисполкома разработан новый высокоэффективный способ тушения пожаров на аварийно фонтанирующих газонефтяных скважинах. Основное достоинство нового способа – простота и возможность быстрой реализации при применении малых количеств огнетушащих средств. Суть этого способа заключается в следующем. У основания факела, который при пожаре на скважине достигает высоты 80–100 м, с максимальным диаметром 10–15 м, создаётся вихревое кольцо, движущееся вдоль оси факела снизу вверх. При таком движении «атмосфера» вихревого кольца сдувает пламя и пожар прекращается. Такие вихревые кольца получают с помощью взрыва небольших зарядов взрывчатого вещества в баке соответствующего диаметра [1].

С практической точки зрения более привлекательны для тушения пожаров на скважине сравнительно низкоскоростные, так называемые всплывающие вихревые кольца, которые образуются при подъеме компактного облака лёгкого газа в атмосфере. Такие вихри образуются при взрыве зарядов взрывчатого вещества без применения специальных устройств и конструкций. При этом, однако, необходимо ликвидировать проскок пламени через вихревое кольцо. Этого можно достичь, используя способность вихревого кольца переносить распыленную примесь.

Если в момент образования вихревого кольца заполнить его огнетушащим порошком, то такое вихревое кольцо даже при относительно небольшой скорости будет сдувать пламя факела. Натурные испытания нового способа, проведенные на специальном полигоне при участии Управления пожарной охраны Тюменской области, подтвердили его эффективность. Так, тушение горящего нефтяного фонтана при расходе 6 000 т в сутки осуществлено с использованием всего 6 кг взрывчатого вещества и 500 кг огнетушащего порошка.

Для генерирования вихревых кольцевых структур использовалась ударная труба со специальным насадком, общий вид которой показан на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из стальной цилиндрической трубы – 1 с крышкой и механизмом для автоматического инициирования ударных волн – 2, диффузорных насадков эллиптического профиля с центральной вставкой – 3. Насадки эллиптического профиля были выбраны, основываясь на экспериментальных и теоретических исследованиях в работах [8; 13–15].

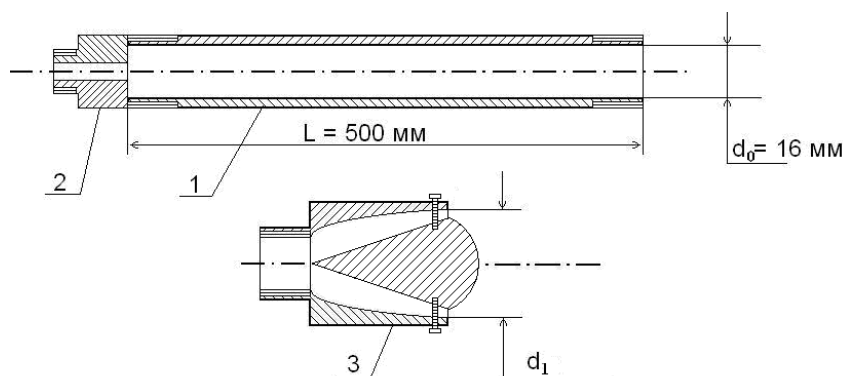


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (ударной трубы)

Для измерения скорости использовалась баллистическая трасса, оснащенная четырьмя бесконтактными блокирующими сечениями, что позволяет измерять время прохождения возмущения между 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 1 и 4 сечениями и вычислять соответствующие этим участкам скорости V_1 , V_2 , V_3 , V_4 . Поток газа для получения вихревых структур инициировался с помощью монтажных патронов шифра Д1 диаметром 6,8 мм.

Реализованная система регистрации конструктивно выполнена в виде компактного модуля, показанного на рис. 2. На его лицевой панели находятся основные пользовательские компоненты, такие как индикаторы и кнопки управления. Символьный жидкокристаллический индикатор (WH2004) используется для отображения результатов эксперимента. Для фото-видеорегистрации быстропротекающих процессов использовалась высокоскоростная цифровая кинокамера NAC HSSC512.

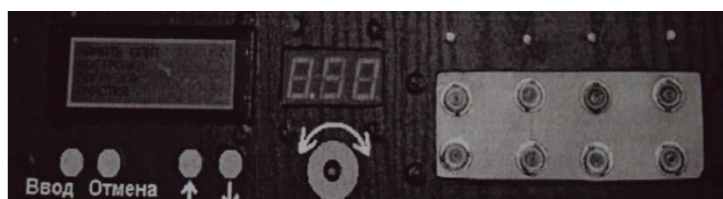


Рис. 2. Общий вид модуля регистрирующей аппаратуры

Скорость потока регистрировалась модулем (рис. 3).



Рис. 3. Отображение скоростей, полученных в результате эксперимента

Результаты математической обработки результатов экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты математической обработки результатов экспериментов

№	V_1 , м/с	V_2 , м/с	V_3 , м/с	V_4 , м/с	δ_i , %
1	353,606	348,000	347,847	349,345	0,385
2	350,140	348,121	348,088	348,516	0,113
3	367,647	348,121	348,088	352,793	1,324

Визуализация картины течения осуществлялась при помощи высокоскоростной цифровой кинокамеры. Объектив кинокамеры охватывал прямоугольную область съемки. Результат съемки фиксировался при помощи компьютера, на котором наблюдалась картина течения потока (рис. 4). Регистрация процесса производилась при частоте съемки $50 \cdot 10^3$ кадров/с и время выдержки кадра 3 мс.

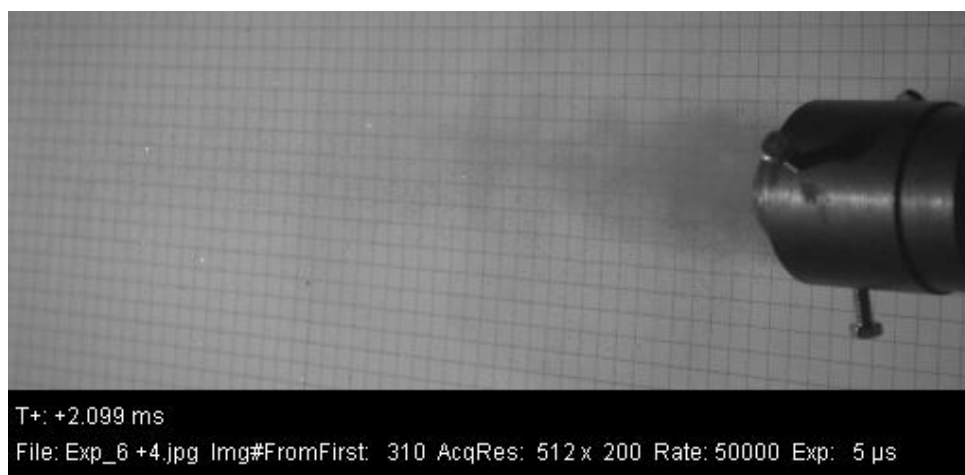


Рис. 4. Фотография картины течения газа на выходе в открытое пространство

На снимке видно, что поток газа образовал кольцевой вихрь малой интенсивности. Малая интенсивность кольцевого вихря объясняется высокой скоростью потока (околозвуковой) и несовершенством геометрических характеристик используемого насадка. В ходе дальнейших исследований были произведены изменения: насадка была заменена на коническую, схема установки представлен на рис. 5, а вместо монтажных патронов шифра Д1 использовались патроны шифра Д4, тем самым увеличилась масса заряда и, соответственно, интенсивность кольцевых вихрей.

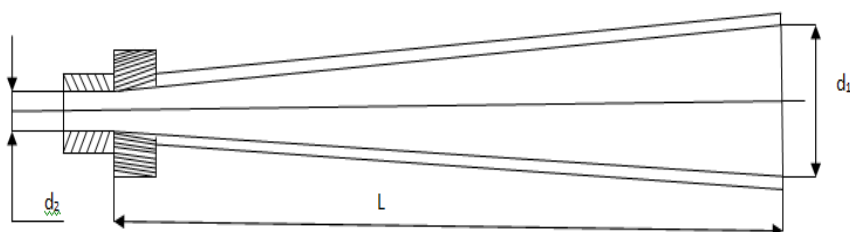


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

На рис. 5: $L = 600$ мм – длина расширения насадки, $d_1 = 70$ мм – диаметр на выходе насадки, $d_2 = 6.8$ мм – диаметр входного отверстия для патрона.

Общий вид установки показан на рис. 6. Из рис. 6 видно, что по всей длине L ствол ударной установки представляет собой конически расширяющееся сопло, которое начинается от обжатого края гильзы.



Рис. 6. Фотография экспериментальной установки

В натуральных условиях была проверена предложенная возможность тушения низового лесного пожара.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Ударная труба со специальной насадкой конической формы направлялась в сторону смоделированного очага природного пожара. Для генерации потока использовались продукты взрыва монтажных патронов шифра Д4 с известными характеристиками. Патрон вставлялся в специальное отверстие, расположенное в крышке ударной трубы, затем с помощью специального механизма проводился удар по капсюлю патрона, тем самым порождая поток газа, который направлялся в зону лесного низового пожара и воздействовал на фронт пламени, прекращая тем самым процесс горения.

Результаты испытаний (рис. 7) показали применимость предложенного способа тушения низовых лесных пожаров кольцевыми вихревыми потоками. Один «выстрел» обеспечивает локальное прекращение горения ЛГМ на площади радиусом 0,2–0,25 м. Причем тушение пламени осуществлялось с 2 м, безопасного для обслуживающего персонала расстояния. Полученный результат соответствует требованиям к безопасности проведения работ по тушению пожаров [12].



Рис. 7. Фотография эксперимента до выстрела и после выстрела соответственно

Литература

1. Ахметов Д. Г., Луговцов Б. А., Тарасов В. Ф. Тушение пожаров на газонефтяных скважинах с помощью вихревых коле // ФГВ. 1980. № 5. С. 8–14.
2. Бусев А. И., Ефимов И. П. Определения, понятия, термины в химии. М. : Просвещение, 1977. 224 с.
3. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука, 1992. 408 с.
4. Гришин А. М. Моделирование и прогноз катастроф. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2003. Ч. 1. 524 с.
5. Гришин А. М., Ковалев Ю. М. Об усилении ударных волн при взаимодействии с фронтом лесного пожара // ДАН СССР. 1990., № 1. Т. 312. С. 50–54.
6. Гришин А. М. Физика лесных пожаров. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1994. 218 с.
7. Гришин А. М., Голованов А. Н., Зима В. П. и др. Экспериментальная отработка модели дезинтегратора на фронте низового лесного пожара // Математическое и физическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред и экологии : избран. докл. междунар. конф. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2000. 240 с.
8. Гришин А. М., Ковалев Ю. М. Экспериментальное и теоретическое исследование воздействия взрыва на фронт верхового лесного пожара // ДАН СССР. 1989. № 5 Т. 308. С. 1074–1078.
9. Исаков Г. Н. Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 142 с.

10. Исаков Г. Н., Белявская Д. В., Манаева А. Р. Определение характеристик пожарной опасности материалов на основе ПВХ методом релаксационного анализа // Полимерные материалы пониженной горючести : материалы VII междунар. науч. конф. Таганрог, 6–10 октября 2013 г. Таганрог : Изд-во ЮФУ, 2013. с. 213–216.

11. Исаков Г. Н., Манаева А. Р. Анализ дымообразующей способности напольных покрытий на основе поливинилхлорида в условиях пожара // Известия Самар. науч. центра РАН, 2015. № 2. Т. 17. С. 43–47.

12. Меркулов В. И. Гидродинамика знакомая и незнакомая. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. С. 136.

13. Устройство для локализации и тушения лесных пожаров. Пат. 2033826 СИ Россия, МКИ 6 А 62 С 3/02. / А. М. Гришин, В. А. Антонов, Л. Ю. Наймушина, А. Н. Голованов, Ю. В. Кустов. № 4852597; заявлено 20.07.90; опубл. 30.04.95, бюл. № 12. 4 с.

14. Устройство для локализации и тушения низовых лесных пожаров. Пат. на пол. мод. 19572 Россия. / А. М. Гришин, В. П. Зима, В. И. Самойлов, А. Ф. Цимбалюк. № 2000123272/20; заявл. 11.09.2000; опубл. 10.09.2001, бюл. № 25.

15. Устройство для локализации и тушения лесных пожаров. Пат. на пол. мод. 80755 Российская Федерация, МКИ 6 А 62 С 3/02. / А. Н. Голованов, Ю. П. Панкратов, А. Ф. Цимбалюк, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман, А. А. Ключков. № 2006143913/22; заявл. 11.12.2006; опубл. 27.02.2009, бюл. № 6.

УДК 614.841.412:536.468

Фомина Е. Р.

Fomina E. R.

О КРИТЕРИЯХ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЖИДКИХ КАПЕЛЬ НА НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

TOWARDS LIQUID DROPLET IGNITION CRITERION ON HEATED SURFACE

В статье с помощью эксперимента оценивается возможность воспламенения масляных капель при аварийном выбросе их на разогретую поверхность турбокомпрессоров. Установлено, что воспламенение капель приводит к их возгоранию, поэтому они являются источником зажигания либо горючих жидких нефтепродуктов (масло, нефть), либо газоздушных смесей. Предложено уточнить механизм и кинетические параметры химических реакций окисления, а также провести сравнительную оценку их воспламеняемости при различных соотношениях окислителя и горючего для совершенствования методики оценки пожарной опасности конкретных компрессорных масел.

Ключевые слова: масляные капли, воспламенение, методика оценки пожарной опасности.

Анализ пожаро- и взрывоопасных ситуаций показывает, что аварии на газоконпрессорных станциях [3] сопряжены с возможностью образования горючей взрывоопасной среды при утечках, разгерметизации и разрывах технологических участков оборудования, которые при наличии источников зажигания [3–4] приводят к авариям с тяжелыми последствиями. Например, на линейных компрессорных станциях ОАО «Газпром» более 55 % случаев пожаров и взрывов происходит на магистральных компрессорах, причем из них в 60 % случаев источником зажигания является выброс масла и попадание его на нагретые части турбоагрегата.

Под воздействием высокой температуры поверхности $T_{ст}$ масло разлагается и испаряется, образуя тонкий диффузионный слой горючей смеси с окружающим атмосферным воздухом. При этом нижняя граница этого слоя совпадает с горизонтальной разогретой поверхностью масляной пленки, температуру T_w которой ввиду незначительной толщины [6] будем считать равной температуре стенки турбоагрегата $T_{ст}$. Верхняя граница диффузионного слоя Δ_d имеет температуру окружающей среды T_0 . В работах [5; 8] этот слой горючей смеси условно назван «приведенной пленкой», которую в первом приближении можно считать неподвижной с преобладающим влиянием молекулярного переноса тепла и массы путем теплопроводности и диффузии. Оценим толщину диффузионного слоя Δ_d по формуле:

$$\Delta_d = \sqrt{D \cdot t_i}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии, m^2/c , t_i – время самовоспламенения горючей смеси, с.

Для определения коэффициента диффузии обычно используется степенная функция [5]

$$D = D_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \cdot \frac{p_0}{p}, \quad (2)$$

где T_0 , p_0 , D_0 – температура, давление и коэффициент диффузии при нормальных условиях [5]; n – показатель степени, который может быть принят равным 1,75 [5].

Будем считать, что время самовоспламенения (теплового взрыва) [1; 5; 8] горючей смеси вблизи разогретой поверхности T_w приблизительно совпадает со временем достижения в пределах «приведенной пленки» нижнего концентрационного предела воспламенения продуктов разложения и испарения смазочного масла с воздухом. Для большинства тяжелых углеводородов, которые могут образовываться из масла при высоких температурах [7], значения нижних пределов взрываемости π_{min} бинарных смесей горючих газов и паров с воздухом, не превышает молярных долей горючих $y_2 \approx 0,015 \div 0,02$ [5].

В связи с этим рассмотрим модель воспламенения смазочного масла, когда оно попадает на разогретую поверхность с температурой $T_{ст}$, растекается на ней в виде тонкой пленки и самовоспламеняется за счет тепловыделения от экзотермических реакций окисления [1; 5; 8]. Пренебрегая выгоранием компонентов за время самовоспламенения, критические условия можно определить из уравнения [5; 8]:

$$r_0^2 = \frac{8 \cdot \lambda \cdot (T_w - T_0)}{Q \cdot \kappa_0 \cdot y_1^{v_1} \cdot y_2^{v_2} \cdot \left(\frac{\mu \cdot p}{R_0 \cdot T_w}\right)^v \cdot \ell \cdot \frac{E}{R_0 \cdot T_w}} \quad (3)$$

где E – энергия активации химической реакции, (Дж/моль); Q – тепловой эффект реакции, (Дж/кг); $R_0 = 8,314$ (Дж/моль·К) – универсальная газовая постоянная; λ – коэффициент теплопроводности смеси, (Вт/м·К); $r_0 = \Delta_d/2$ – характерный размер «приведенной пленки», значение которого для плоской симметрии равно половине толщины диффузионного слоя, (м); κ_0 – предэкспонент, c^{-1} ; μ – молярная масса, кг/моль; v_1 , v_2 – порядки реакции по окислителю и горючему; y_1 , y_2 – молярные концентрации компонентов; T_w – температура на поверхности «приведенной пленки», К.

Индексы: 1 – окислитель; 2 – горючее.

Смазочные масла, применяемые в турбокомпрессорных агрегатах (ТКА) на дожимных газоконпрессорных станциях [3], предназначены для трущихся узлов в ТКА и отнесены к классу энергетических [7]. В аварийных ситуациях происходит выброс или утечка масла и попадание на нагретые части ТКА. Проведем оценку возможного воспламенения типового компрессорного масла [7] в воздухе с помощью экспериментов (табл. 1).

При условии:

Атмосферное давление $P = 747$ мм рт. ст.

Относительная влажность воздуха $RH = 70\%$.

Температура окружающей среды $T = 22$ °С.

Таким образом, с помощью эксперимента удастся оценить возможность воспламенения масляных капель при аварийном выбросе их на разогретую поверхность турбокомпрессоров. Воспламенение капель приводит к их возгоранию, поэтому они являются источником зажигания либо горючих жидких нефтепродуктов (масло, нефть), либо газоздушных смесей [1; 3–4, 7]. Для совершенствования предлагаемой методики оценки пожарной опасности конкретных компрессорных масел в аварийных ситуациях необходимо уточнить механизм и кинетические параметры химических реакций окисления по методикам [2; 5], а также провести сравнительную оценку их воспламеняемости при различных соотношениях окислителя и горючего.

Таблица 1

Оценка возможного воспламенения типового компрессорного масла в воздухе

№ образца	T1	T2	T3	T4	T5
1	340 °С Не горит, испаряется, нагар минимальный (2–4 с)	360 °С Не горит, интенсивно испаряется, брызги, нагар минимальный. (Менее 1 с. Масло мгновенно вскипает и распадается на множество мелких частиц)	720 °С Не горит, вскипает	780 °С Не горит	900 °С воспламенение паров масла
2	340 °С Не горит, испаряется, нагара нет (2–3 с)	360 °С Не горит, испаряется, нагара нет (1–2 с)	720 °С Не горит, вскипает	790 °С Не горит	890 °С Воспламенение паров масла
3	340 °С Не горит, испаряется, нагар есть (3 с)	360 °С Не горит, испаряется, нагар есть (3 с)	720 °С Не горит, вскипает	780 °С Воспламенение паров масла	
4	340 °С Не горит, испаряется, нагар есть (3–4 с)	360 °С Не горит, испаряется, нагар есть (2–4 с)	720 °С Не горит, вскипает	775 °С Не горит	880 °С Воспламенение паров масла

Литература

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука, 1980. 480 с.
2. Исаков Г. Н. Теплоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 142 с.
3. Исаков Г. Н., Хованов В. Л. Анализ взрывоопасных ситуаций на газокomppressorной станции //Фундам. и прикладн. проблемы современной механики : сб. материалов VI всерос. науч. конф. Томск : Изд-во ТГУ, 2008. С. 468–469.
4. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М. : ВНИИ ПО, 2003.
5. Основы практической теории горения : учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Померанцева. 2-е изд. перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
6. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М. : Химия, 1976. 232 с.
7. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочник / К. М. Бадыштова и др. М. : Химия, 1989. 432 с.
8. Франк-Каменецкий Д. А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике : учебник-моногр. 4-е изд. Долгопрудный : Интеллект, 2008. 408 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алмазова Елена Геннадьевна – старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники, Сургутский государственный университет

Антипин Дмитрий Павлович – старший преподаватель кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики, Сургутский государственный университет

Антонов Сергей Юрьевич – аспирант, Сургутский государственный университет

Антонова Валерия Максимовна – контролер энергосбыта 3-го разряда, ООО «Газпром трансгаз Сургут» УЭЭС, г. Сургут

Барбарош Нина Семёновна – магистрант, Сургутский государственный университет

Баус Станислав Сергеевич – магистрант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Бейбулатов Семен Юрьевич – студент, Самарский государственный технический университет

Букалов Григорий Константинович – доктор технических наук, профессор, Костромской государственный технологический университет

Бурмистрова Екатерина Александровна – ассистент кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики, Сургутский государственный университет

Быковских Дмитрий Александрович – инженер-программист научного центра междисциплинарных исследований, Сургутский государственный университет

Бычин Игорь Валерьевич – ведущий специалист научного центра междисциплинарных исследований, Сургутский государственный университет

Вагин Дмитрий Олегович – магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет

Вирстюк Анастасия Юрьевна – инженер-программист II категории производственного управления по наладке и техническому обслуживанию автоматизированных систем управления, СургутАСУнефть, ОАО «Сургутнефтегаз»

Власко Андрей Федорович – аспирант, Сургутский государственный университет

Воронин Алексей Александрович – заместитель начальника 32-й Пожарной части, 11-й отряд федеральной противопожарной службы государственной противопожарной службы по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре (договорной), г. Сургут

Гавриленко Тарас Владимирович – кандидат технических наук, директор научного центра междисциплинарных исследований, Сургутский государственный университет

Газя Геннадий Владимирович – кандидат биологических наук, начальник службы охраны труда СУБР-3, ОАО «Сургутнефтегаз»

Галкин Валерий Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Политехнического института, Сургутский государственный университет

Годовников Андрей Иванович – аспирант, Сургутский государственный университет

Голдобин Дориан Артемьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики, Сургутский государственный университет

Гореликов Андрей Вячеславович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики, Сургутский государственный университет

Горынин Глеб Леонидович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных технологий и конструкций, Сургутский государственный университет

Григорьев Юрий Игоревич – ассистент кафедры строительных технологий и конструкций, аспирант, Сургутский государственный университет

Грицков Сергей Николаевич – аспирант, Сургутский государственный университет

Гришин Анатолий Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физической и вычислительной механики, заслуженный деятель науки РФ, Национальный исследовательский Томский государственный университет

Гусев Сергей Александрович – инженер, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

Далинкевич Андрей Александрович – доктор химических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ЦНИИСМ», г. Москва

Дорф Валерий Анатольевич – кандидат технических наук, директор по научной работе, институт «Оргэнергострой», г. Москва

Дубовик Алексей Олегович – аспирант, Сургутский государственный университет

Ефремова Ирина Игоревна – студент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Жиренков Александр Александрович – старший преподаватель кафедры строительных технологий и конструкций, Сургутский государственный университет

Жиренков Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных технологий и конструкций, Сургутский государственный университет

Журавлев Антон Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и информатики, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург

Журавлева Людмила Анатольевна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры химии, Сургутский государственный университет

Занин Александр Олегович – ведущий инженер пожарно-спасательной службы ООО «Газпром переработка», аспирант, Сургутский государственный университет

Зима Владислав Павлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования и прогноза катастроф, Национальный исследовательский Томский государственный университет

Иванова Елена Васильевна – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики, Сургутский государственный университет

Игонин Тимофей Николаевич – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, г. Москва

Исаков Геннадий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, Сургутский государственный университет

Капустин Дмитрий Егорович – руководитель группы, институт «Оргэнергострой», г. Москва

Караваева Анастасия Андреевна – инженер научно-исследовательского отдела сопровождения строительства скважин, СургутНИПИнефть, ОАО «Сургутнефтегаз»

Карауш Сергей Андреевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды, Почётный работник высшего профессионального образования РФ, Томский государственный архитектурно-строительный университет

Касымов Денис Петрович – младший научный сотрудник лаборатории моделирования и прогноза катастроф, Национальный исследовательский Томский государственный университет

Кислицин Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики, Сургутский государственный университет

Колева Галина Юрьевна – доктор исторических наук, профессор кафедры гуманитарных наук института менеджмента и бизнеса, Тюменский индустриальный университет

Конарева Екатерина Аркадьевна – магистрант, Сургутский государственный университет

Красновский Ростислав Олегович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий сектором, институт «Оргэнергострой», г. Москва

Кривошеина Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Костромской государственный технологический университет

Кроль Ирина Соломоновна – заместитель директора по научной работе, институт «Оргэнергострой», г. Москва

Куликова Анна Алексеевна – инженер-проектировщик, СургутНИПИнефть, ОАО «Сургутнефтегаз»

Лаврентьев Михаил Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, декан факультета информационных технологий, Новосибирский государственный университет

Макарова Анна Александровна – студент, Самарский государственный технический университет

Макеева Екатерина Николаевна – студент, Самарский государственный технический университет

Максаева Людмила Борисовна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина, г. Москва

Максимов Алексей Александрович – электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования 4-го разряда, ЦБПО ЭПУ, ОАО «Сургутнефтегаз»

Мальцева Людмила Анатольевна – учитель физики, МБОУ «Федоровская СОШ № 5», Сургутский район

Манаева Алина Рамзиловна – преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности, Сургутский государственный университет

Мартынова Дина Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Сургутский государственный университет

Михеев Виталий Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный технический университет

Михеев Петр Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

Молотков Александр Сергеевич – ведущий геолог отдела планирования геологоразведочных работ по Западной Сибири центра геологического сопровождения деятельности, СургутНИПИнефть, ОАО «Сургутнефтегаз»

Муковнина Галина Сергеевна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры технологии пищевых производств и парфюмерно-косметических продуктов, Самарский государственный технический университет

Муллагильдин Рустам Мухтарович – инженер II категории НИО сопровождения строительства скважин, СургутНИПИнефть, ОАО «Сургутнефтегаз»

Ненашева Татьяна Алексеевна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, г. Москва

Острейковский Владислав Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и вычислительной техники, Заслуженный деятель науки и техники РФ, академик Международной академии информатизации, Сургутский государственный университет

Платова Юлия Сергеевна – студент, Самарский государственный технический университет

Радомский Сергей Анатольевич – главный конструктор, АО «Средства автоматизации Радомского и компания», Почетный предприниматель, г. Сургут

Руденко Елена Юрьевна – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры технологии пищевых производств и парфюмерно-косметических продуктов, Самарский государственный технический университет

Рыжак Виталий Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой радиоэлектроники и электроэнергетики, Сургутский государственный университет

Рысев Павел Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики, Сургутский государственный университет

Ряховский Алексей Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики, Сургутский государственный университет

Савельев Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск

Сальников Василий Герасимович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника», Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск

Славгородский Сергей Александрович – доцент кафедры строительных технологий и конструкций, Сургутский государственный университет

Снигирева Вера Алексеевна – аспирант, Сургутский государственный университет

Соколов Сергей Борисович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры строительных технологий и конструкций, Сургутский государственный университет

Уразалиев Ильяр Бикмухаметович – инженер, Сургутские электрические сети, филиал АО «Тюменьэнерго»

Урманцева Нелли Руслановна – преподаватель кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, аспирант, Сургутский государственный университет

Фатеев Владимир Николаевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории моделирования и прогноза катастроф, Национальный исследовательский Томский государственный университет

Фомина Елена Романовна – ассистент кафедры безопасности жизнедеятельности, Сургутский государственный университет

Фуфаева Мария Сергеевна – кандидат химических наук, младший научный сотрудник, Институт химии нефти Сибирского отделения РАН, г. Томск

Чалков Андрей Сергеевич – студент, Тюменский индустриальный университет

Шакиров Дамир Ринатович – студент, Самарский государственный технический университет

Шевченко Елена Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники, Сургутский государственный университет

Шеломенцев Владислав Александрович – студент, Тюменский индустриальный университет

Ширковец Андрей Игоревич – кандидат технических наук, начальник отдела международных отношений и инжиниринга, ООО «Болид», г. Новосибирск

Шульга Кирилл Сергеевич – аспирант, Омский государственный технический университет

Шуманская Елена Владимировна – инженер-проектировщик отдела проектирования систем электроснабжения нефтепромысловых объектов, СургутНИПИнефть, ОАО «Сургут-нефтегаз»

Яценко Ирина Германовна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий Научно-исследовательского информационного центра, Институт химии нефти Сибирского отделения РАН, г. Томск

Научное издание

СЕВЕР РОССИИ: СТРАТЕГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

*Материалы II Всероссийской научно-практической конференции
27 мая 2016 г.*

Том II

Технический редактор Е. В. Бодрова

За информацию, содержащуюся в статьях, ответственность несут авторы

Отпечатано в Издательском центре СурГУ.
Адрес издателя и типографии:
БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1.
Тел. (3462) 76-31-79.

Дата выхода в свет 12.12.2016 г. Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 37,3. Уч.-изд. л. 32,1. Тираж 100.