

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УчРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. О. СУХОГО»  
ПАО «ОАК» ОКБ Сухого

---

---

# **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ**

**Сборник научных трудов**

**В двух частях  
Часть 2**

**Гомель  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
2025**

УДК 621.01(063.3)

ББК 34.4

C56

Рецензенты: доктор технических наук, профессор *М. И. Михайлов* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *А. А. Бойко* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *В. П. Кудин* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *Н. В. Грунтович* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *А. В. Овсянник* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор геолого-минералогических наук, профессор *В. Д. Порошин* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор физико-математических наук, профессор *О. Н. Шабловский* (ГГТУ им. П. О. Сухого)

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. *А. Б. Невзорова*  
канд. физ.-мат. наук, доц. *А. А. Бабич*  
канд. техн. наук, доц. *М. Г. Гегедеш*  
канд. техн. наук, доц. *М. Ю. Целуев*  
канд. техн. наук, доц. *К. С. Курочка*  
канд. техн. наук, доц. *Ж. В. Кадолич*  
канд. техн. наук, доц. *Н. А. Демяненко*  
канд. техн. наук, доц. *Т. А. Трохова*  
канд. техн. наук, доц. *Ю. В. Крышнев*  
канд. техн. наук, доц. *Т. В. Алферова*  
канд. экон. наук, доц. *М. Н. Андриянчикова*  
канд. экон. наук, доц. *И. В. Ерманина*

Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. *А. А. Бойко*

**Современные** проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 2 / С56 М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – 283 с.

ISBN 978-985-535-617-3.

Представлены новейшие результаты научных исследований в области аддитивных технологий; наноматериалов в машиностроении; компьютерного моделирования технических, механических и биомеханических систем; мехатроники; энергосберегающих технологий и альтернативной энергетики; разработки нефтяных и газовых месторождений; физических и математических методов исследования сложных систем; проблем экономики, организации и управления производством.

Для научных и инженерно-технических работников промышленных предприятий и научно-исследовательских учреждений.

УДК 621.01(063.3)

ББК 34.4

ISBN 978-985-535-617-3 (ч. 2)  
ISBN 978-985-535-618-0

© Оформление. Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Секция 5. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

<i>Тораева Э., Оразов А., Абдыкадырова О.</i> Анализ переходных процессов в трансформаторах с использованием программного обеспечения .....	7
<i>Оразбердиева М., Оразбердиев Р., Дженбарова Б.</i> Возможности использования микроводорослей в альтернативной энергетике .....	9
<i>Заворохин Т. А., Зайнуллина Э. Р., Митяков В. Ю.</i> Теплообмен при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе .....	12
<i>Князев С. А., Сероштанов В. В.</i> Повышение теплогидравлической эффективности цилиндра с помощью стержней-турбулизаторов .....	15
<i>Рудченко Ю. А., Зализный Д. И., Сучков Д. В., Кусенкова В. А.</i> Особенности моделирования электрической нагрузки в расчетах режимов работы электрической сети частной жилой застройки .....	18
<i>Капанский А. А.</i> Роль климатических факторов в формировании энергетических режимов городского водоснабжения .....	21
<i>Грунтович Н. В., Капанский А. А.</i> Влияние температурных колебаний на потребление природного газа в региональных системах газоснабжения .....	24
<i>Сычёв А. В.</i> Оптимизация управления компенсирующими устройствами .....	27
<i>Капанский А. А., Кроль Д. Г., Павлов В. В., Веремеева Д. И.</i> Статистический анализ графиков электропотребления для выявления закономерностей формирования режимов потребления в частном жилом секторе .....	29
<i>Киселевич В. В.</i> Схема включения теплоаккумулирующих аппаратов в систему индивидуального теплоснабжения .....	32
<i>Гончаров М. Г., Зализный Д. И.</i> Расчет потерь напряжения и мощности в несимметричных трехфазных цепях .....	36
<i>Селиверстов Г. И., Савкова Т. Н.</i> Электрические и режимные параметры компактных воздушных линий сеточного типа .....	38
<i>Савкова Т. Н., Кравченко А. И., Колесник Ю. Н.</i> Исследование оптических характеристик цветных светодиодных ламп .....	42
<i>Шакин В. М., Добродей А. О.</i> Моделирование перенапряжений в электрической сети 10 кВ для оценки их уровней .....	44
<i>Алферова Т. В., Широков О. Г., Костюченко И. Д.</i> Показатели несинусоидальности тока и напряжения при работе светодиодного светильника SPO-6-36-4К-Р .....	48
<i>Жуковец С. Г., Белаш А. А.</i> Применение беспилотных летательных аппаратов для диагностирования оборудования подстанции Гомельских электрических сетей .....	52
<i>Широков О. Г., Алферова Т. В., Вегера М. А.</i> Параметры входных напряжения и тока при включении и работе сварочного инвертора Solaris MMA-208 .....	55
<i>Овсянник А. В.</i> Гидродинамика и теплообмен при течении пленки жидкости по вертикальной поверхности при граничных условиях первого рода .....	58
<i>Овсянник А. В., Ключинский В. П.</i> Моделирование и оптимизация полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел .....	62
<i>Макеева Е. Н., Агунович К. А.</i> Состав подземных водоисточников, используемых для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения города Гомеля .....	65
<i>Кидун Н. М., Никулина Т. Н., Колмачева П. С., Таран А. В.</i> Выбор теплоносителя для замкнутых двухфазных теплопередающих систем .....	68

**Секция 6. ГЕОЛОГИЯ И РАЗРАБОТКА  
НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

<i>Абрамович О. К.</i> Геодинамические исследования объектов нефтегазоразработки .....	72
<i>Байковский Д. И., Жуковский А. М., Гутман Р. Е.</i> Оптимизированный подход к проектированию профилей скважин с протяженным горизонтальным окончанием .....	75
<i>Емельяничков А. С., Лымарь И. В., Ходьков Е. Н., Цагельник А. А.</i> Особенности изучения петрофизических свойств сложнопостроенных пород-коллекторов семилукской карбонатной залежи Речицкого месторождения .....	78
<i>Минаков А. В., Кравченко А. Ю., Майлат Я. А., Воробьев С. Н.</i> Оценка условий выноса проппанта из трещин гидроразрыва, его влияния на продуктивность пластов и эффективность гидроразрыва пластов .....	82
<i>Жуковский А. М., Гутман Р. Е.</i> Влияние направления бурения скважин с гидроразрывом пласта на добычу нефти .....	86
<i>Кравцова А. А.</i> Условия формирования и перспективы нефтегазоносности отложений кепрока верхнесоленосной толщи Северной структурно-тектонической зоны Припятского прогиба .....	89
<i>Денисенко А. В., Мироненко К. В., Войтехин О. Л., Климович В. А., Дубина Д. А.</i> Повторный многостадийный гидроразрыв пласта в условиях ультранизкопроницаемых коллекторов Республики Беларусь .....	92
<i>Даниленко В. В.</i> Применение ретрокерн для оценки перспектив нефтегазоносности Елецко-Петриковских отложений Южного структурного района Припятского прогиба .....	95
<i>Порошин В. Д.</i> Сопоставление результатов определения направлений и скоростей фильтрационных потоков в разрабатываемых нефтяных залежах по трассерным и гидрохимическим исследованиям .....	99
<i>Порошина С. Л.</i> К вопросу усовершенствования гидрохимического мониторинга разработки нефтяных месторождений Припятского прогиба .....	102
<i>Писарев В. Ю., Авиновская Т. В., Злотников И. И.</i> Сравнительный анализ сорбционных свойств фосфогипса и диоксида кремния .....	105
<i>Клочко У. В., Бочаров Н. В., Шепелева И. С., Шелото А. В., Тишков А. А.</i> Оценка скорости звука в затрубном пространстве на примере воронежской залежи Речицкого месторождения нефти .....	108
<i>Карсеко К. С., Липский А. Л.</i> Оценка применимости и расчет эффективности методов увеличения нефтеотдачи низкопроницаемых коллекторов на примере залежи I–III пачек межсолевых отложений Речицкого месторождения .....	111
<i>Алхатиб Ш. М., Демяненко Н. А.</i> Применение нанотехнологий при добыче трудноизвлекаемой нефти .....	114
<i>Климов Т. А., Марковский А. П.</i> Возможности открытой геоинформационной системы QGIS на примере проектирования и анализа работ по мониторингу микросейсмических событий при гидроразрыве пласта .....	118
<i>Алхатиб Ш. М., Демяненко Н. А.</i> Исследование методов извлечения капиллярных и пленочных нефтей из природных резервуаров на завершающей стадии разработки нефтяных месторождений (использование поверхностно-активных веществ) .....	121
<i>Мархотко К. Ф.</i> Получение комплексной минеральной добавки для тампонажных растворов .....	124
<i>Горбаченко В. С., Демяненко Н. А., Лопушко М. А.</i> Тепловое воздействие при технологических обработках горячей водой на скважинах месторождений Припятского прогиба .....	127
<i>Авласенко И. С., Порошин Д. В., Пологеев В. В.</i> Инженерная оценка технологических преимуществ технологии с управляемым давлением при бурении скважин с аномально высокими пластовыми давлениями в Припятском прогибе .....	131

<i>Хорюшин В. Ю.</i> Разработка типовых дизайнов ограничения водопритока в условиях тонкой нефтяной оторочки Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения Западной Сибири .....	135
<i>Чекан А. О.</i> Оценка доминирующих петрофизических факторов эффективного применения циклического заводнения на месторождениях Припятского прогиба.....	138
<i>Глушаков К. А., Аткинговская Т. В.</i> Проведение трассерных исследований для контроля и регулирования процесса разработки на примере Давыдовского месторождения .....	142
<i>Киреев И. В.</i> Сравнительный анализ полно-азимутальной миграции ES360 и миграции Кирхгофа, используемых на этапе структурной интерпретации сейсмических данных в интервале верхнесоленосных отложений на примере Речицкого участка .....	145
<i>Жуковский А. М., Повзжик П. П.</i> Определение сжимаемости по результатам испытаний на предел прочности при трехосном сжатии .....	150
<i>Гегедеш М. Г., Бочаров Н. В., Ткачев В. М., Туркевич А. А.</i> Современные подходы к оценке накопленного усталостного износа буровых труб .....	153
<i>Бочаров Н. В., Ткачев В. М.</i> Применение метода индентирования для оценки изменчивости модуля Юнга горных пород изучаемого геологического разреза .....	156
<i>Янян Юй, Невзорова А. Б.</i> Исследование зимней безопасности сверхбольших резервуаров для хранения сырой нефти.....	160
<i>Захаров О. В., Захаров И. В., Бочаров Н. В.</i> Использование предиктивной аналитики и машинного обучения для прогноза аварий в процессе строительства нефтяных и газовых скважин .....	163
<i>Фролов В. В., Невзорова А. Б.</i> Цифровой анализ работы механизированного фонда скважин .....	167
<i>Далба В. С., Ходьков Е. Н., Цагельник А. А.</i> Определение водосодержания дистилляционно-экстракционным методом нетрадиционных пород-коллекторов скважины 452 Речицкого месторождения.....	170
<i>Фурсевич А. В., Машечко Е. И.</i> Разработка методики проведения современного комплекса лабораторных исследований бурового шлама и практическое ее применение... ..	174

#### Секция 7. ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

<i>Ворожун А. В.</i> Анализ динамики подвижного состава на основе математического и компьютерного моделирования .....	178
<i>Комнатный Д. В.</i> Анализ электромагнитного поля в роторах электродвигателей, изготовленных из композитных материалов .....	181
<i>Рюмцев А. А., Остриков О. М.</i> Дислокационная модель в сравнительном анализе альтернативных подходов описания структуры металлических стекол.....	185
<i>Тимошин С. И., Тимошин Е. С.</i> Вклады кварков и антикварков в спин нуклона из асимметрий глубоконеупругого рассеяния нейтрино на поляризованных нуклонах.....	188
<i>Тимошин Е. С., Тимошин С. И.</i> Кварковый вклад в спин нуклона из нейтринных экспериментов на поляризованных дейтронах .....	194
<i>Лашкевич В. И., Садовский А. А., Соловцова О. П.</i> Новое выражение для гипергеометрической функции ${}_3F_2(1)$ .....	201
<i>Бабич А. А.</i> Роль поляризации пучков для детального изучения свойств частиц и их взаимодействий на линейных электрон-позитронных коллайдерах .....	204
<i>Лискович М. И., Лискович Р. М., Шатон Д. А.</i> Оптимизация магнитно-абразивной обработки: моделирование магнитных полей для повышения качества финишной обработки деталей.....	207
<i>Кроль Д. Г., Иноземцева Н. В., Прядко М. О.</i> Кинематические характеристики шатунных точек механизма аналитическим методом с группой Ассур IV класса .....	210
<i>Концевой А. А., Бугримов А. А.</i> Устойчивые режимы возмущения фазовой границы высокоскоростной кристаллизации переохлажденного расплава .....	213

<i>Столяров А. И., Зайцев Е. В.</i> Оценка напряженного состояния артерии при раскрытии стента .....	217
<i>Гавриш В. Ю., Тамков А. Д.</i> Алгебра матриц Дирака в случае размерности пространства-времени $d \neq 4$ .....	220
<i>Гавриш В. Ю., Тамков А. Д.</i> Расчет однопетлевого интеграла электронной линии квантовой электродинамики .....	221
<i>Прач С. И., Лапко О. А.</i> Анализ методик расчета и выбора гидродинамических подшипников скольжения .....	225
<i>Савченко А. Ю., Мурашко О. П.</i> Решение задач в электроэнергетике с помощью инженерной графики.....	229

### Секция 8. ПРОБЛЕМЫ ЭКОНОМИКИ, ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

<i>Путьто О. В., Прохоров В. А.</i> Таможенное администрирование электронной торговли .....	233
<i>Yauiheni Kazheunikaui</i> Competitiveness of the belarusian oil-producing complex in modern conditions .....	236
<i>Трейтьякова Е. В.</i> Особенности управления бизнес-процессами предприятия в условиях цифровизации.....	240
<i>Галова Ю. А., Сидоркина В. А., Карчевская Е. Н., Соловьева Л. Л.</i> Роль сайта в продвижении строительной организации (на примере ОАО «Гомельстройматериалы»).....	249
<i>Соловьева Л. Л., Рубцова А. В., Шевченко М. Л.</i> SEO-оптимизация и ее роль в деятельности промышленного предприятия .....	246
<i>Сычёва Н. В., Сычёв А. В.</i> Проектное управление в системе трудовых отношений сельскохозяйственных организаций.....	249
<i>Зубарь А. А., Пономаренко Е. П.</i> Понятие «энергоэффективность» в экономике.....	252
<i>Лапицкая О. В., Черленок А. В.</i> Анализ развития экологического туризма через использование экологического потенциала региона .....	255
<i>Пономаренко Е. П.</i> Актуальные проблемы оценки финансового состояния организации .....	257
<i>Медведева А. В., Ерманина И. В.</i> Совершенствование управления производительностью труда на предприятии .....	260
<i>Ерманина И. В.</i> Об эффективном использовании туристического потенциала лесного фонда для развития экологического туризма.....	263
<i>Лученок А. И., Шестаков М. Е.</i> Анализ и прогнозирование инфляционных процессов при помощи программного комплекса «АиПИП» .....	267
<i>Шкабарина А. О.</i> Синергетический эффект туристских кластеров .....	273
<i>Vinnik O., Xie Zhanlei</i> Using the BACCM™ model to describe the basic concepts of china's energy industry.....	275
<i>Ятченко М. Д.</i> Направления реализации энергетической политики Республики Беларусь .....	278
<i>Митрофанова Г. В., Сапончик Д. А.</i> Совершенствование управления материальными запасами на предприятии .....	280

## СЕКЦИЯ 5. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

---

УДК 620

### АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Э. Тораева, А. Оразов, О. Абдыкадырова

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

*С помощью программы «MatLab» анализируются переходные процессы в трансформаторах, возникающие при коротком замыкании.*

**Ключевые слова:** переходные процессы, трансформатор, короткое замыкание, электронные программы.

### ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN TRANSFORMERS USING SOFTWARE

E. Torayeva, A. Orazov, O. Abdykadyrova

*State Power Engineering Institute of Turkmenistan, Mary*

*The article uses the MatLab program to analyze transient processes in transformers that occur during a short circuit.*

**Keywords:** Transient processes, transformer, short circuit, electronic programs.

Исследование переходных режимов трансформатора имеет большое значение для промышленности.

В трансформаторах переходной режим работы относится к режиму работы, во время которого трансформатор переходит из одного стабильного состояния в другое. Переходные явления могут быть вызваны многими причинами. Наиболее опасным переходным явлением для электрических систем является короткое замыкание. Поскольку при коротком замыкании величина тока увеличивается в десять раз, электрические потери увеличиваются и приводят к повреждению катушек. Во время переходного процесса мощность, ток и напряжение трансформатора изменяются.

Когда в трансформаторе происходит короткое замыкание, переходной процесс происходит в очень тяжелых условиях. Характеристики этого режима работы можно проанализировать аналитически и с помощью компьютерных моделей.

В данной работе в программе MatLab анализируется влияние короткого замыкания, возникающего в трансформаторах, на переходные процессы. Для проведения экспериментального анализа были выполнены расчеты, связанные с исходным состоянием, и сформулирована математическая модель трехфазного двухобмоточного силового трансформатора.

Для анализа и расчета короткого замыкания в трансформаторе по обобщенному уравнению электромеханического преобразователя представим его электрическую схему в следующем виде в неподвижном пространстве с осями координат  $\alpha, \beta, 0$  (рис. 1).

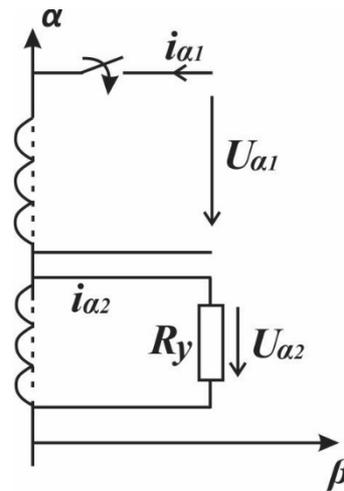


Рис. 1. Расчетная схема трансформатора

Модель экспериментальной установки представлена на рис. 2.

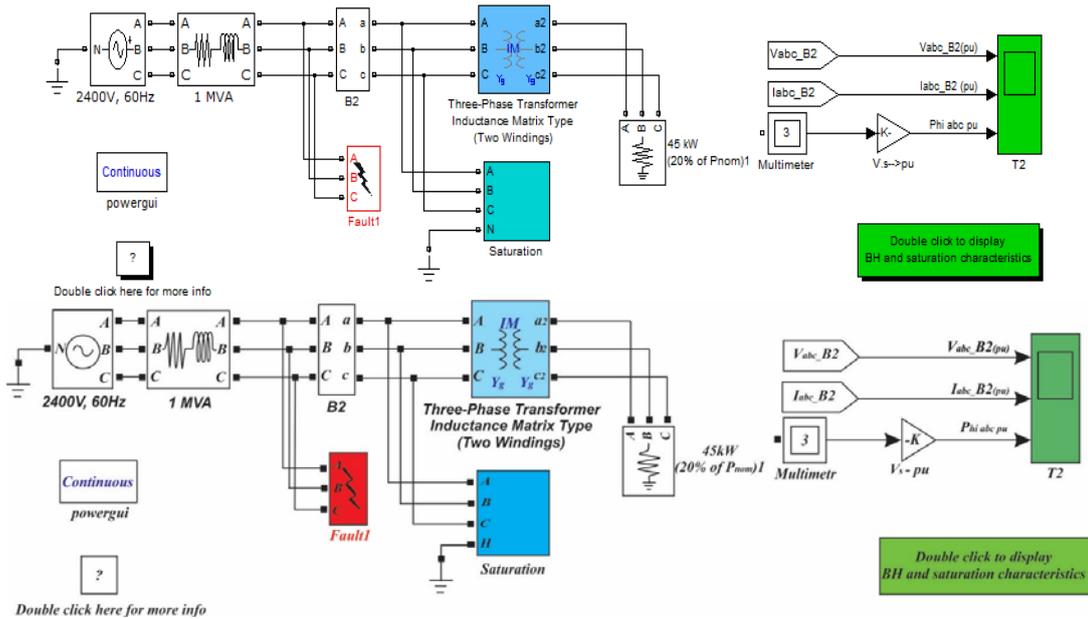


Рис. 2. Модель установки для исследования переходного процесса, вызванного коротким замыканием трансформатора

Как видно из модели, все три фазы трансформатора коротко замкнуты. Влияние короткого замыкания на переходные процессы, происходящие в трансформаторах, можно наблюдать с помощью осциллографа. На осциллографе показаны графики фазных токов, напряжений и мощностей трансформатора в зависимости от времени при коротком замыкании фаз трансформатора. Эти графики показаны на рис. 3.

Как видно из результатов, полученных с помощью осциллографа, при коротком замыкании изменяются амплитудные значения фазных токов, напряжений и мощностей. После момента короткого замыкания фазные токи, напряжения и мощности стремятся вернуться в прежнее нормальное состояние. При коротком замыка-

нии величина тока увеличивается в десятки раз, увеличиваются электрические потери. В этом случае электромагнитное состояние трансформатора сильно меняется, т. е. может привести к выходу его из строя. По этой причине короткое замыкание считается наиболее опасной из причин, вызывающих переходные процессы.

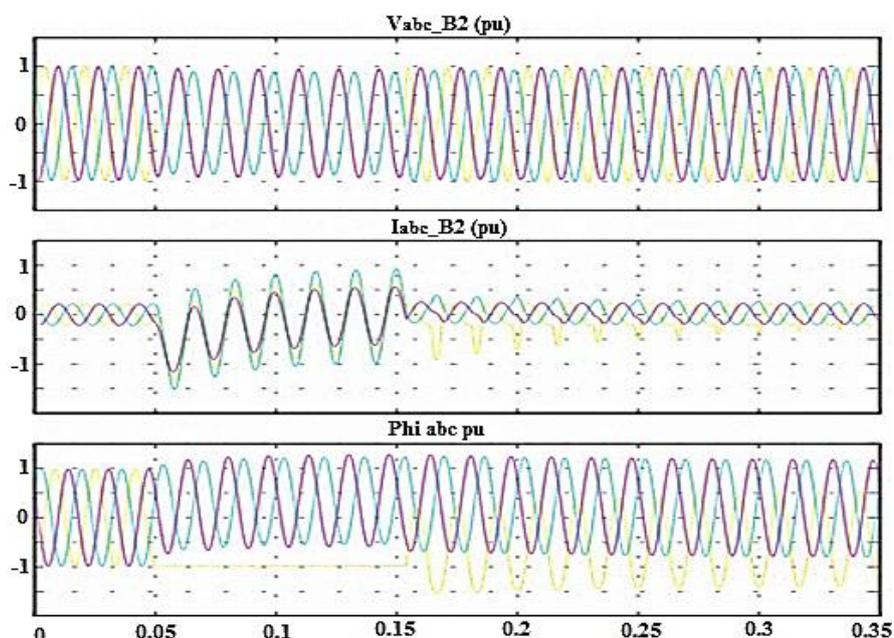


Рис. 3. Графики фазных токов, напряжений и мощностей трансформатора в зависимости от времени

Таким образом, компьютерная программа MatLab очень эффективна для анализа переходных процессов в трансформаторах и электрических машинах. Данная программа позволяет анализировать переходные процессы, возникающие при различных параметрах электрооборудования, трансформаторов, электрических машин, а также при различных уровнях короткого замыкания. В результате эксперимента могут быть измерены значения длительности и амплитуды переходного процесса.

УДК 662

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

М. Оразбердиева<sup>1</sup>, Р. Оразбердиев<sup>2</sup>, Б. Джепбарова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

<sup>2</sup>Туркменский государственный университет имени Махтумкули,  
г. Ашгабад

*Приведены результаты по определению жизнеспособности в лабораторных условиях микроводорослей в питательной среде на основе дренажных вод. Экспериментами доказано, что окислительно-восстановительный потенциал суспензии микроводорослей уменьшается, когда синтезируются биологические ценные вещества за счет загрязняющих веществ, содержащихся в составе дренажных вод.*

**Ключевые слова:** микроводоросли, питательная среда, состав дренажных вод.

## POSSIBILITIES OF USING MICROALGAE IN ALTERNATIVE ENERGY

M. Orazberdieva<sup>1</sup>, R. Orazberdiev<sup>2</sup>, B. Jepbarova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*State Energy Institute of Turkmenistan, Mary*

<sup>2</sup>*Turkmen State University named after Makhtumkuli, Ashgabat*

*This article presents the results of determining the viability of microalgae in laboratory conditions in a nutrient medium based on drainage water. Experiments have proven that the oxidation-reduction potential of a suspension of microalgae decreases when biologically valuable substances are synthesized due to pollutants contained in the composition of drainage water.*

**Keywords:** microalgae, nutrient medium, composition of drainage water.

На современном этапе развития общества к трем традиционным составляющим устойчивого развития современного общества – экономическому процветанию, социальному и экологическому благополучию – сегодня добавилась энергетическая безопасность. Для противодействия угрозам энергетической безопасности, подрывающим основы устойчивого развития, необходимо выработать и последовательно проводить в жизнь согласованные на межгосударственном уровне меры антикризисной энергетической политики.

Туркменистан, обладая богатейшими запасами нефти и газа, тем не менее, уделяет огромное внимание поиску новых экологически чистых источников энергии. В стране принята Национальная стратегия развития возобновляемой энергетики до 2030 г., а в целях усиления правовой базы для ее реализации – закон Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии» (2021 г.). Реализация Национальной стратегии будет способствовать устойчивому экономическому развитию страны.

Энергетический кризис в мире побуждает искать новые источники энергии. Задача биотехнологов заключается в повышении эффективности получения энергии из биомассы на этапе ее накопления в процессе фотосинтеза и в процессе последующего получения из биомассы топлива в результате работы микроорганизмов.

Биоэнергия является одним из экологически чистых возобновляемых источников энергии. Для производства биоэнергии в настоящее время в некоторых странах в качестве сырья используются различные масличные культуры. Наиболее широко применяемыми в мире являются рапсовое, кукурузное, пальмовое масло и соевые бобы. Однако в условиях Туркменистана выращивание для энергетических целей масличных культур, требующих большого количества воды, является экономически нецелесообразным.

С целью создания производственно-технологической базы для формирования новых подотраслей промышленности, способных в долгосрочной перспективе заменить существенную часть продуктов, производимых методом химического синтеза, продуктами биологического синтеза; для создания технологической и опытно-промышленной базы для формирования биотопливной промышленности 10 мая 2024 г. Президент Сердар Бердымухамедов утвердил Государственную программу комплексного развития биотехнологий в Туркменистане на 2024–2028 гг. Документом утвержден план мероприятий по реализации новой госпрограммы. Осуществление плана предписано Академии наук Туркменистана, профильным министерствам и ведомствам. Программа развития биотехнологий в стране нацелена на повышение научной составляющей в развитии отраслей экономики, на стимулирование инновационного производства экологичных, энергосберегающих импортозамещающих техно-

логий и экспорт ориентированных товаров, а также формирование конкурентоспособной национальной биоиндустрии в будущем.

Перспектива использования биотехнологии в энергетике не ограничивается только решением экономических вопросов. Также она решает и экологические проблемы путем снижения уровня загрязнения окружающей среды. В сфере экологии будут созданы эффективные методы ликвидации загрязнений и предотвращения вредного антропогенного воздействия на окружающую среду, в то же время в сфере сельского хозяйства внедрение биотехнологий будет способствовать повышению водной и продовольственной безопасности страны.

Технологии производства возобновляемой энергии из биомассы микроводорослей также находятся на начальной стадии. Продолжается поиск путей для более полной и дешевой практической реализации энергетического потенциала биомассы микроводорослей при производстве биоэнергии. Для развития биоэнергетики целесообразно использовать биоэнергетическое сырье на основе местных водных ресурсов. Использование местных водных ресурсов в условиях климатических изменений обусловлено национальной стратегией Туркменистана по изменению климата. Основной целью национальной стратегии является обеспечение устойчивого развития, влияющего на социально-экономическое развитие страны, в условиях изменения климата. Разработка технологии выращивания микроводорослей на основе использования коллекторно-дренажных вод с целью получения биоэнергии крайне важна и имеет огромные перспективы для развития возобновляемой энергетики в Туркменистане. В качестве питательной среды для выращивания микроводорослей используется коллекторно-дренажная вода, образованная на орошаемых площадях Туркменистана. В перспективе комплексное использование биомассы микроводорослей рекомендуется использовать в качестве источника сырья для производства энергоносителей. Энергетическое сырье из микроводорослей окажет меньшее воздействие на окружающую среду и продовольственную безопасность, чем из масличных культур. Использование коллекторно-дренажных вод для выращивания микроводорослей для энергетических целей позволяет существенно уменьшить дефицит водных ресурсов и улучшить состояние окружающей среды путем утилизации загрязняющих веществ, имеющих в составе дренажных вод. В связи с этим технология выращивания микроводорослей в дренажной воде является одной из ключевых направлений на пути широкомасштабного использования микроводорослей в качестве возобновляемого биоэнергетического ресурса и повторного использования минерализованных дренажных вод.

Территория Туркменистана характеризуется теплым засушливым климатом с большим числом ясных дней, высокой температурой воздуха и отсутствием продолжительных заморозков. В течение 5–6 месяцев в году климат благоприятен для культивирования микроводорослей как по светообеспечению, так и по температуре, причем по светообеспечению он благоприятен в течение 9–10 месяцев. В условиях теплого климата формируется значительное количество коллекторно-дренажных вод на орошаемых полях страны. Объем используемых в настоящее время коллекторно-дренажных вод незначителен, хотя в Туркменистане проведены многочисленные и многолетние исследования и разработаны рекомендации по использованию этих вод для орошения солеустойчивых кормовых культур.

Сельское хозяйство является наиболее важным сектором экономики страны. Сельскохозяйственное производство в стране – важнейший фактор любого аспекта землепользования, водного хозяйства, защиты окружающей среды и национального развития в целом. Поэтому сельское хозяйство сейчас рассматривается не только как

вид экономической деятельности, но и как фактор, воздействующий на окружающую среду.

Для определения жизнеспособности микроводорослей в научно-производственном центре возобновляемых источников энергии в Государственном энергетическом институте в питательной среде на основе дренажных вод проводится эксперимент в лабораторных условиях. Экспериментально доказано, что окислительно-восстановительный потенциал суспензии микроводорослей уменьшается, когда синтезируются биологически ценные вещества за счет загрязняющих веществ, содержащихся в составе дренажных вод. На измеряемые параметры влияет численность микроорганизмов дренажной воды и концентрация в ней их метаболитов. При росте и размножении в питательной среде на основе дренажной воды микроорганизмы продуцируют высоко заряженные ионные метаболиты, что приводит к изменению электрохимических свойств питательной среды.

Таким образом, практическая значимость производства биомассы микроводорослей представляет собой утилизацию дренажных вод, сформированных на орошаемых полях, и трансформацию возобновляемой энергии с целью получения энергетического сырья.

УДК 621.175

### **ТЕПЛОБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ**

**Т. А. Заворохин, Э. Р. Зайнуллина, В. Ю. Митяков**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Российская Федерация*

*Исследование посвящено изучению теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе. Эксперименты выполнены при массовом расходе пара 2,8 г/с и расходе охлаждающей воды, варьируемом в диапазоне 80–200 г/с. Местная плотность теплового потока измерена градиентными датчиками теплового потока и рассчитана по показаниям термопар. Сопоставление результатов подтверждает высокое быстрое действие, информативность и точность теплотрии по сравнению с термометрией. Распределение местной плотности теплового потока по периметру оценено в трех сечениях по длине трубы в диапазоне полярного угла  $\varphi = 0-180^\circ$  с шагом в  $15^\circ$ . Результаты эксперимента позволили оценить область скопления конденсата в нижней части трубы (в диапазоне  $\varphi = 135-180^\circ$ ) без использования визуализации и предложить методы интенсификации теплообмена и повышения энергоэффективности оборудования.*

**Ключевые слова:** теплообмен при конденсации, насыщенный водяной пар, горизонтальная труба, плотность теплового потока, энергоэффективность теплообменников.

### **HEAT TRANSFER DURING WATER STEAM CONDENSATION ON A HORIZONTAL PIPE**

**T. A. Zavorokhin, E. R. Zainullina, V. Yu. Mityakov**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation*

*The investigation is focused on the heat transfer during water steam condensation on a horizontal pipe. Experiments were carried out with a steam mass flow rate of about 2.8 g/s and a cooling water flow rate that varied in the range of 80–200 g/s. The local heat flux per unit area was measured using gradient heat flux sensors and calculated using thermocouple readings. The comparison of results indicates that heatmetry is more efficient, informative, and accurate than ther-*

*mometry. The distribution of local heat flux per unit area along the pipe perimeter was estimated in three cross-sections in the range of the polar angle  $\varphi = 0-180$  with a step of 15. The results of the experiment allowed us to evaluate the condensate accumulation area in the lower part of the pipe ( $\varphi = 135-180^\circ$ ) without using visualization and to propose methods of heat transfer intensification and improving the equipment efficiency.*

**Keywords:** condensation heat transfer, water steam, horizontal pipe, heat flux per unit area, equipment efficiency.

Повышение энергоэффективности и экологичности оборудования ТЭС и АЭС является одной из приоритетных задач для развития энергетики. В частности, совершенствование конструкций и интенсификация теплообмена в теплоотводящем оборудовании позволит снизить расход топлива, негативное влияние на окружающую среду, стоимость вырабатываемой энергии и т. п. Результаты исследований по изучению поверхностной конденсации пара [1–3] позволят разрабатывать и создавать новые конструкции теплообменников, обладающих меньшими массогабаритными показателями. Для действующих аппаратов применяются современные методы диагностики их состояния [4, 5], определяющие наличие коррозионного износа, протечек или загрязнения теплообменной поверхности.

Настоящее исследование посвящено измерению местной плотности теплового потока (ПТП) при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе с помощью градиентной теплотрии и термометрии. Эксперименты выполнены на стенде (рис. 1, а), измерительный участок которого включает три трубы из нержавеющей стали наружным диаметром 20 мм, толщиной стенки 2 мм, расположенные рядом с относительным шагом  $s/d = 1,67$ . Трубы зафиксированы резиновыми заглушками в стеклянном кожухе с внутренним диаметром 110 мм. Длина теплообменной поверхности составляет 450 мм. Насыщенный водяной пар с расходом 2,8 г/с подавался в межтрубное пространство по двум паропроводам, охлаждающая вода с температурой 20 °С и расходом, варьируемым в диапазоне 80–200 г/с, подводилась в центральную трубу, конденсат отводился в конденсатосборник.

Прямое измерение местной ПТП выполнено градиентными датчиками теплового потока (ГДТП) из монокристаллического висмута (размерами  $2,9 \times 6 \times 0,3$  мм), установленными заподлицо с наружной поверхностью трубы. Значение местной ПТП также рассчитано по показаниям термопар типа L, установленных диаметрально противоположно месту установки ГДТП на внутренней и наружной поверхности трубы. Первичные преобразователи монтированы в трех сечениях по длине центральной охлаждаемой трубы (рис. 1, б).

При конденсации пара на горизонтальной трубе распределение местной ПТП меняется по окружности. Поэтому стенд предусматривает возможность поворота центральной трубы вокруг оси в диапазоне полярного угла  $\varphi = 0-180^\circ$  с шагом в  $15^\circ$ , что обеспечивает измерение распределения местной ПТП минимальным числом первичных преобразователей.

Результаты измерений подтвердили высокую информативность ГДТП, связанную с их низкой постоянной времени (около 10 нс), что позволило оценить изменение ПТП во времени – временная теплограмма. Полученные результаты подтверждают существенную нестационарность теплообмена при конденсации. В качестве примера на рис. 2, а приведена временная теплограмма для нижней образующей трубы при  $\varphi = 180^\circ$ , построенная по показаниям ГДТП во втором сечении при расходе охлаждающей воды около 200 г/с. Пульсации местной ПТП обусловлены отрывом конденсата, скопившегося на нижней части трубы.

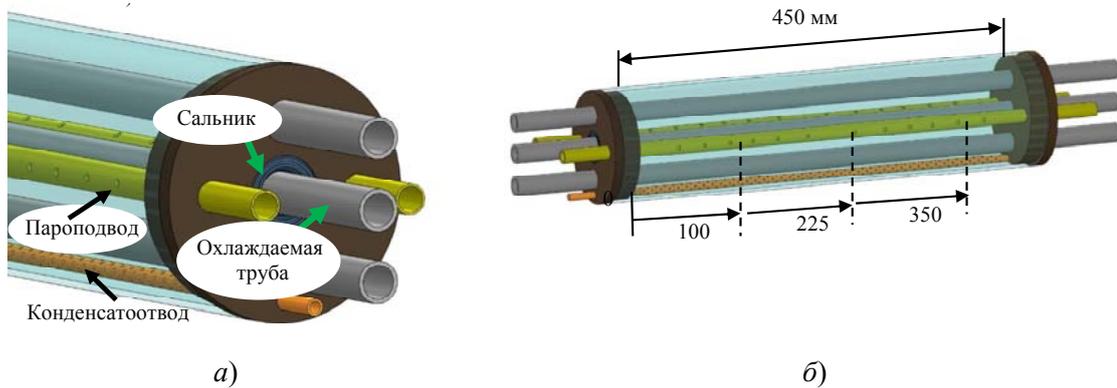


Рис. 1. Экспериментальная установка:  
 а – конструкция; б – расположение измерительных сечений

По показаниям ГДТП и термопар построены распределения местной ПТП по окружности трубы при расходе охлаждающей воды около 200 г/с – угловые теплограммы (рис. 2, б). Расчетной местной ПТП по показаниям термопар, выполненный по уравнению стационарной теплопроводности, указывает на практически равномерное распределение ПТП по окружности трубы (рис. 2 б, черная кривая). Угловая теплограмма, построенная по показаниям ГДТП, указывает на снижение местной ПТП в диапазоне полярного угла  $\varphi = 135\text{--}180^\circ$ , связанное с образованием поддонной зоны. Следовательно, для повышения среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации поверхностные интенсификаторы (ребра, лунки и т. п.) следует устанавливать в указанной области.

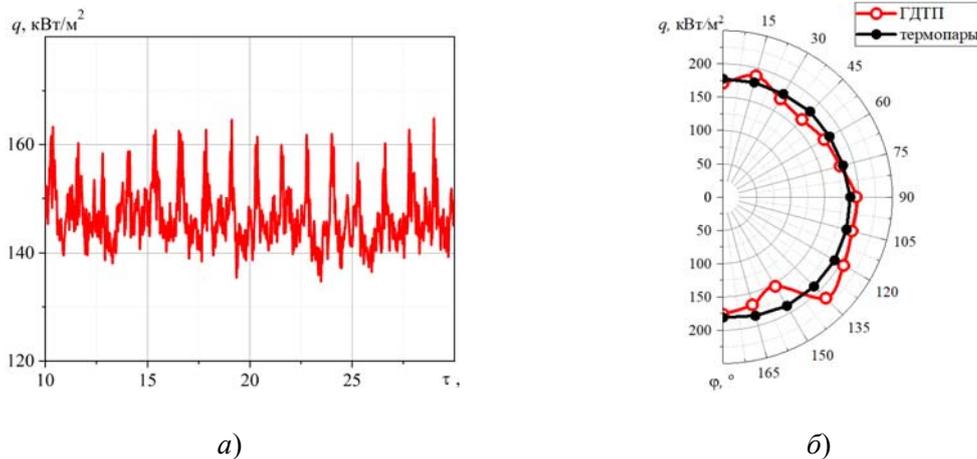


Рис. 2. Результаты эксперимента:  
 а – временная теплограмма при конденсации на нижней образующей трубы;  
 б – угловые теплограммы (красная кривая – теплометрия;  
 черная кривая – расчет по показаниям термопар)

Относительная стандартная неопределенность измерения местной ПТП с помощью ГДТП составляет 8 %, относительная неопределенность расчета по показаниям термопар – около 15 %.

Изучен теплообмен при поверхностной конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе с применением средств градиентной теплотометрии и термометрии. Подтверждена высокая информативность, точность и применимость ГДТП в качестве первичного преобразователя для систем мониторинга состояния теплообменного оборудования ТЭС и АЭС. Результаты исследования позволили выявить область снижения местной ПТП, вызванную скоплением конденсата, без применения визуализации, что позволяет определить эффективные и экономичные методы интенсификации теплообмена при конденсации.

#### Литература

1. Шарифуллин В. Н. Оценка величины коррозии в пароконденсатных теплообменниках / В. Н. Шарифуллин, А. В. Шарифуллин, А. Я. Латыпова // Известия вузов. Проблемы энергетика. – 2013. – № 1–2.
2. Разработка и апробация элементов системы мониторинга состояния и диагностики конденсатора паровой турбины / С. И. Хае, К. Э. Аронсон, Ю. М. Бродов, А. Г. Шемпелев // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 67–69.
3. Шарифуллин В. Н. Алгоритмы диагностики неполадок теплообменных аппаратов паротурбинных установок / В. Н. Шарифуллин, А. В. Шарифуллин, И. Ф. Гатауллин // Вестник КГЭУ. – 2012. – № 1 (12).
4. Исследование пульсаций местной плотности теплового потока при конденсации на трубе с гидрофобным покрытием / Ю. А. Кузма-Кичта, А. В. Лавриков, Н. С. Иванов, Д. В. Горбачев // Тепловые процессы в технике. – 2023. – Т. 15, № 9. – С. 402–409.
5. Sapozhnikov S. Z. Gradient heatmetry advances / S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. V. Mityakov [et al.] // Energies. – 2020. – Vol. 13, N 23. – P. 6194.

УДК 536.24

### ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИЛИНДРА С ПОМОЩЬЮ СТЕРЖНЕЙ-ТУРБУЛИЗАТОРОВ

С. А. Князев, В. В. Сероштанов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Российская Федерация*

*Исследовано влияние стержней-турбулизаторов на течение и теплообмен одиночного цилиндра кругового сечения. Два стержня располагались вдоль образующей цилиндра и симметрично разносились относительно лобовой точки на угол  $\psi$ . Методом градиентной теплотометрии получены распределения местного коэффициента теплоотдачи на поверхности цилиндра в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 4800\text{--}30000$ . С помощью цифровой трассерной визуализации (PIV) определены компоненты скорости вблизи цилиндра с турбулизаторами в следе за ним. Показано влияние диаметра турбулизаторов и угла  $\psi$  на структуру течения в следе за цилиндром, коэффициент сопротивления и среднее по поверхности число Нуссельта.*

**Ключевые слова:** градиентная теплотометрия, обтекание цилиндра, местное число Нуссельта, интенсификация теплообмена.

### THERMAL EFFICIENCY UPGRADING OF CYLINDER WITH TURBULATOR-RODS

S. A. Knyazev, V. V. Seroshtanov

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russian Federation*

*The impact of turbulator-rods on the flow and heat transfer at a single circular cylinder has been investigated. The two rods on the cylinder's generator were placed and mounted symmetrically.*

## 16 Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика

cally with respect to the front point at an angle  $\psi$ . distribution of local heat transfer coefficient on the surface of the cylinder in the range of Reynolds numbers  $Re = 4800-30000$  were obtained by the gradient heatmetry. Particle Image Velocimetry (PIV) was used to determine the velocity components near a turbulator-rods-equipped cylinder and following it. Shown influence of the turbulator-rods diameter and angle  $\psi$  on the flow structure in the cylinder's wash, drag coefficient and surface-averaged Nusselt number.

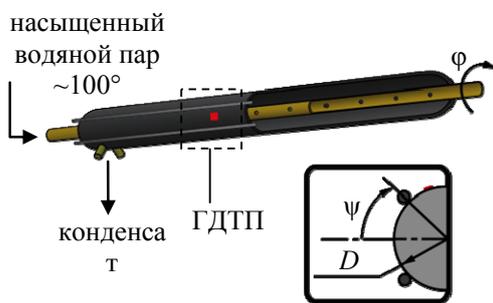
**Keywords:** gradient heatmetry, flow-around cylinder, local Nusselt number, heat transfer enhancement.

Повышение эффективности теплообменников способствует развитию исследований по интенсификации теплообмена, в том числе с помощью поверхностных интенсификаторов [1]. Управление потоком вблизи и на теплопередающих поверхностях позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи (КТО) и снизить гидравлическое сопротивление.

В работе экспериментально исследовано влияние стержней-турбулизаторов на течение и теплообмен вблизи одиночного цилиндра с применением PIV и градиентной теплотметрии. Результаты исследования позволяют управлять потоком вблизи цилиндра за счет изменения структуры течения в пограничном слое и смещения точки его отрыва. Исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re$  от 4,8 до  $30 \cdot 10^3$  в аэродинамической трубе Научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике» СПбПУ [1]. Аэродинамическая труба замкнутого типа оснащена системой охлаждения набегающего на обогреваемую модель воздушного потока, что позволяет поддерживать его температуру практически постоянной ( $20 \pm 0,2$  °C) в течение длительных опытов.

Экспериментальная модель – полый круговой цилиндр диаметром 66 мм, выполненный из листа стали толщиной 0,1 мм. Цилиндр имеет три патрубка, в один из которых осуществляется непрерывная подача пара парогенератором мощностью 4,2 кВт, в двух других патрубках обеспечивается отвод конденсата и излишков поступающего пара.

Исследуемый цилиндр мог проворачиваться вокруг своей оси на углы  $\varphi = 0-180$  ° с шагом измерения  $10$  °. Для определения плотности теплового потока на поверхность цилиндра устанавливался градиентный датчик теплового потока (ГДТП) (рис. 1, а).



а)



б)

Рис. 1. Схема (а) и фото (б) исследуемой модели со стержнями-турбулизаторами

Батарейный ГДТП выполнен из монокристаллического висмута размерами в плане  $2 \times 2$  мм и толщиной 0,2 мм. Чувствительность датчика составляет 4,7 мВ/Вт [2].

Два стержня-турбулизатора устанавливаются вплотную к образующим цилиндра. Для жесткого крепления стержней была изготовлена специальная рамка (рис. 1, б). Длина цилиндра составляет 600 мм, вследствие чего влияние концевых эффектов на поток воздуха не учитывалось. В работе использованы два набора стержней диаметром 1,6 и 3,2 мм, которые устанавливались симметрично на угол  $\psi = 15\text{--}90^\circ$  (рис. 1, б).

Для определения теплогидравлической эффективности предлагаемого метода помимо параметров теплообмена необходимо определить гидравлическое сопротивление. В работе использован метод [3], где для определения сопротивления, действующего на круглый цилиндр, применяется формула

$$C_D = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{U}{U_1} \left( \frac{U_1 - U}{U_1} \right) + \left( \frac{v^2 - u^2}{U_1^2} \right) \right] d \left( \frac{y}{d} \right),$$

где  $U$  – продольная составляющая скорости потока за телом;  $U_1$  – скорость невозмущенного потока;  $u$  и  $v$  – продольные и поперечные среднеквадратичные отклонения (СКО) составляющих скорости;  $d$  – диаметр цилиндра [3]. Необходимые компоненты скорости получены по результатам PIV.

В результате комплексного исследования рассчитана теплогидравлическая эффективность системы цилиндр-турбулизаторы:

$$\xi = \frac{Nu/Nu_0}{C_x/C_{x0}},$$

где индекс «0» – результаты, полученные для гладкого цилиндра.

На рис. 2 представлено распределение  $\xi$  для рассматриваемых диапазонов режимов течения и углов установки  $\psi$ . Наибольшее увеличение теплогидравлической эффективности получено для стержней-турбулизаторов меньшего диаметра ( $d = 1,6$  мм), причем существенное повышение эффективности наблюдается при углах  $\psi = 15^\circ$  и  $\psi = 90^\circ$ . Стержни большего диаметра ( $d = 3,2$  мм) практически не оказывают влияния на величину  $\xi$ , и более того, снижают ее в диапазоне углов  $\psi = 45\text{--}70^\circ$ .

Угол установки стержней-турбулизаторов по-разному влияет на течение и теплообмен: минимальный коэффициент сопротивления наблюдается при установке стержней-турбулизаторов меньшего диаметра на угол  $\psi = 90^\circ$ . «Тонкий» турбулизатор позволяет снизить сопротивления для всех исследуемых углов, тогда как стержень диаметром  $d = 3,2$  мм повышает сопротивление при его расположении на углу  $\psi = 60^\circ$ .

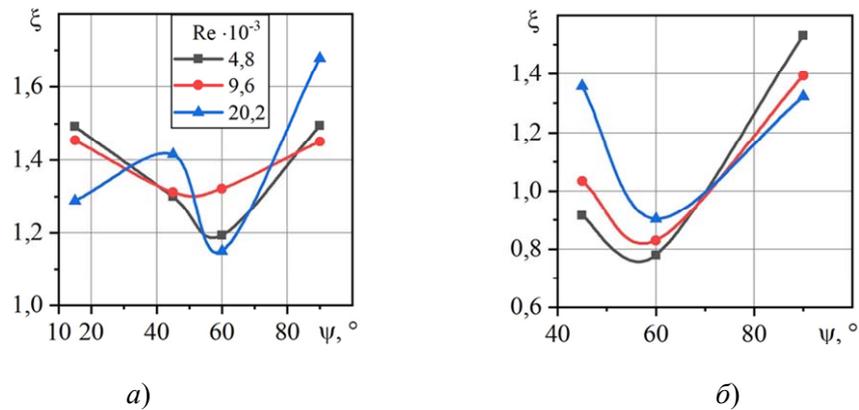


Рис. 2. Зависимость теплогидравлической эффективности от углового положения стержней-турбулизаторов:  
 $a - d = 1,6$  мм;  $b - d = 3,2$  мм

С точки зрения интенсификации теплообмена наиболее эффективным оказался угол установки  $\psi = 15^\circ$ , причем для стержней обоих диаметров. Меньшее влияние на осредненный по поверхности КТО наблюдается при углах  $\psi = 60^\circ$  и  $90^\circ$ , однако тонкий стержень эффективен в более широком диапазоне углов  $\psi$ .

Угол установки стержней-турбулизаторов по-разному влияет на течение и теплообмен: эффективные режимы и конфигурации системы для максимально интенсивного теплообмена не совпадают с таковыми для снижения аэродинамического сопротивления. Стержень диаметром 1,6 мм позволяет повысить теплогидравлическую эффективность во всем рассматриваемом диапазоне углов  $\psi$ , тогда как стержень диаметром 3,2 мм снижает теплогидравлическую эффективность в диапазоне углов  $\psi = 50-70^\circ$ .

#### Литература

1. Интенсификация теплообмена в одиночной овально-траншейной лунке на пластине при изменении угла наклона от  $0$  до  $90^\circ$  / М. Д. Селезнева, С. А. Князев, А. А. Клюс, В. В. Сероштанов // *Аэрокосмическая техника и технологии*. – 2023. – Т. 1, № 4. – С. 30–41.
2. Теплообмен в паре круговых цилиндров при их рядном и шахматном расположении / В. А. Маслов, М. Д. Селезнева, С. А. Князев, В. В. Яковлева // *Бутаковские чтения : сб. ст. II Всерос. междунар. конф. с участием молодых ученых, Томск, 13–15 дек. 2022 г. / Нац. исслед. Том. политехн. ун-т. – Томск, 2022. – С. 202–205.*
3. Antonia R. A. Determination of drag of a circular cylinder / R. A. Antonia, S. Rajagopalan // *AIAA Journal*. – 1990. – N 28(10). – P. 1833–1834.

УДК 621.3.052.3

### ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ В РАСЧЕТАХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ЧАСТНОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ

Ю. А. Рудченко, Д. И. Зализный, Д. В. Сучков, В. А. Кусенкова

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

*Рассмотрены особенности моделирования электрических нагрузок потребителей частного жилого фонда при выполнении расчетов режимов работы электрических сетей на-*

пряжением 0,4 кВ. Предложено нагрузку представлять активным и реактивным сопротивлениями, вольт-амперную характеристику этих сопротивлений считать линейной, применять для расчета прямой метод.

**Ключевые слова:** моделирование, электрическая нагрузка, бытовые потребители, расчет режима.

## FEATURES OF MODELING ELECTRICAL LOAD IN CALCULATIONS OF OPERATING MODES OF THE ELECTRIC NETWORK OF PRIVATE RESIDENTIAL DEVELOPMENT

Y. A. Rudchenko, D. I. Zalizniy, D. V. Suchkov, V. A. Kusenkova

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The features of modeling electrical loads of private residential consumers when performing calculations of operating modes of electrical networks with a voltage of 0.4 kV are considered. It is proposed to represent the load by active and reactive resistances, consider the current-voltage characteristic of these resistances to be linear, and use the direct method for calculation.*

**Keywords:** modeling, electrical load, household consumers, mode calculation.

В рамках научно-исследовательской работы по разработке методики оценки пропускной способности электрических сетей 0,4 кВ в условиях роста электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда требовалось разработать программное обеспечение для автоматизации расчетов режимов работы сети, для чего было необходимо выполнить моделирование электрических нагрузок потребителей.

Известно [1] несколько способов представления электрической нагрузки в расчетах режимов работы электрических сетей: мощностью нагрузки и сопротивлением нагрузки.

При моделировании нагрузки первым способом активная и реактивная мощности нагрузки могут задаваться в виде так называемых статических характеристик нагрузки, т. е. зависимостью от напряжения

$$P = P_n \left( \alpha_p \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + \beta_p \left( \frac{U}{U_n} \right) + \gamma_p \right),$$

$$Q = Q_n \left( \alpha_q \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + \beta_q \left( \frac{U}{U_n} \right) + \gamma_q \right),$$

где  $P_n$ ,  $Q_n$  – номинальные значения активной и реактивной мощности нагрузки;  $U_n$  – номинальное напряжение нагрузки или сети;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – аппроксимирующие коэффициенты.

При представлении нагрузки мощностью расчеты режимов работы электрической сети проводят итерационными методами, относительно так называемого балансирующего узла. Как правило, данный подход применяется для анализа режимов работы высоковольтных трехфазных трехпроводных электрических сетей, имеющих симметричную нагрузку. В этом случае количество узлов в схеме замещения сети получается минимальным, расчет требует относительно небольшого числа итераций и затрат времени.

Для упрощения расчетов принимают, что мощность нагрузки не зависит от напряжения и является постоянной величиной. Вольт-амперная характеристика такой нагрузки имеет нелинейную зависимость, значение тока обратно пропорционально напряжению. Исследования показали, что у потребителей электроэнергии частной жилой застройки нет электроприемников с подобной характеристикой.

При втором способе представления нагрузки она задается активным и реактивным значениями сопротивления.

Для трехфазной нагрузки:

$$R_n = \frac{3U_n^2}{P_n}, \quad X_n = \frac{3U_n^2}{Q_n},$$

для однофазной:

$$R_n = \frac{U_n^2}{P_n}, \quad X_n = \frac{U_n^2}{Q_n}.$$

Эти значения сопротивлений являются номинальными. При изменении напряжения на нагрузке сопротивление нагрузки может измениться. В расчетах часто пренебрегают возможными изменениями сопротивления нагрузки, считая его величиной постоянной. Вольт-амперная характеристика такой нагрузки линейна, значение тока нагрузки пропорционально напряжению. Проведенные исследования показали, что к бытовым электроприемникам, имеющим подобную характеристику, относятся различные электронагревательные приборы (электрочайник, электроплиты, электрообогреватели, утюг и т. п.), а также бытовые приборы с коллекторным двигателем (кухонные комбайны, блендеры, миксеры, пылесосы, электрические газонокосилки, ручной инструмент для ремонта и т. п.).

Такой подход дает возможность применения прямых методов расчета электрической сети, погрешность которых определяется лишь корректностью (точностью) исходных данных.

Для выбора метода расчета электрической сети 0,4 кВ частной жилой застройки были выделены их основные особенности, достоинства и недостатки, проведен их анализ. В результате было принято решение использовать прямой метод, что повлечет за собой необходимость линеаризации вольт-амперной характеристики нагрузки, что в свою очередь приведет к появлению погрешности расчета режима работы электрической сети.

Для оценки величины погрешности расчета, вызванной линеаризацией вольт-амперной характеристики нагрузки, было проведено экспериментальное определение зависимости сопротивлений нагрузки от напряжения для ряда бытовых электроприемников. На основании полученных данных был составлен набор (перечень) электроприемников типового потребителя частного жилого фонда работающих в период максимальной нагрузки и определена обобщенная зависимость сопротивления нагрузки от напряжения.

Было сделано предположение, что в вечерний максимум нагрузки могут работать одновременно: 1 обогреватель, 2 холодильника, 2 компьютера, 2 вентилятора, 1 микроволновая печь, 1 лампа накаливания, 1 люминесцентный светильник, 6 светодиодных светильников, 1 чайник, 1 утюг, 2 ноутбука, 2 телевизора, 1 электроплита и 1 пылесос. На рис. 1 показаны зависимости отклонения от номинального значения сопротивления (активного и реактивного) указанной нагрузки от напряжения сети, полученные с использованием математического пакета MathCAD.

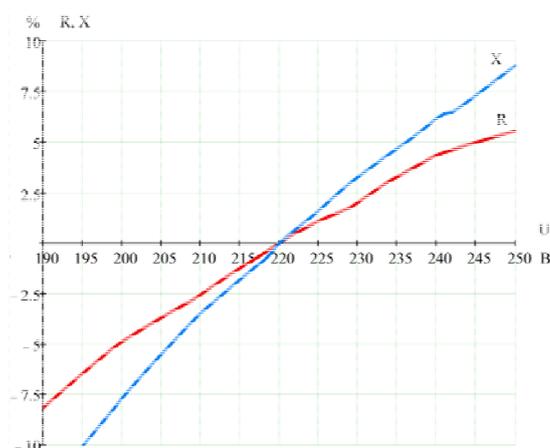


Рис. 1. Зависимость отклонения от номинального значения активного  $R$  и реактивного  $X$  сопротивлений нагрузки потребителя от напряжения сети

Анализ графиков, приведенных на рисунке, показывает, что в пределах допустимого отклонения напряжения ( $\pm 10\%$ ) сопротивление нагрузки изменяется примерно на  $5\%$  от номинального значения, что можно считать допустимым для проведения линеаризации ее вольт-амперной характеристики. Таким образом, при расчетах режима работы электрической сети  $0,4$  кВ частного жилого фонда, можно представить электрическую нагрузку бытовых потребителей в виде активного и реактивного сопротивлений и считать вольт-амперной характеристики нагрузки линейной, что позволит использовать прямые методы расчета.

#### Л и т е р а т у р а

- Идельчик, В. И. Электрические системы и сети : учеб. для вузов / В. И. Идельчик. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

УДК 620.9:621.65:681.5:628.1/2:504.06

## РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ГОРОДСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

А. А. Капанский

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Исследование посвящено анализу влияния климатических факторов на загрузку системы городского водоснабжения. Выявлена зависимость между повышением температуры воздуха и увеличением водопотребления, что приводит к росту энергозатрат на работу насосных станций и водоочистных систем. Установлено, что температуры выше  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  обуславливают до  $15,8\%$  водопотребления и  $15,6\%$  энергопотребления. Осадки, напротив, незначительно, но снижают потребление воды в периоды дождей. При отрицательных температурах значимых корреляций с водопотреблением не выявлено, однако установлена зависимость роста электропотребления в холодное время, обусловленная поддержанием работоспособности инфраструктуры водоснабжения. Результаты могут применяться для планирования режимов водоснабжения в условиях изменения климатических факторов и использоваться в дальнейшем для разработки стратегий энергоэффективного управления насосными станциями.

**Ключевые слова:** энергопотребление, водопотребление, температура окружающей среды, атмосферные осадки, водоснабжение, энергоэффективность, насосные станции, корреляционный анализ, регрессионный анализ, скользящее среднее.

## THE ROLE OF CLIMATIC FACTORS IN THE FORMATION OF ENERGY REGIMES OF URBAN WATER SUPPLY

A. A. Kapanski

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The study analyzes the influence of climatic factors on the load of the urban water supply system. A relationship has been found between an increase in air temperature and an increase in water consumption, which leads to an increase in energy costs for the operation of pumping stations and water treatment systems. It has been found that temperatures above 25 °C cause up to 15.8 % of water consumption and 15.6 % of energy consumption. Precipitation, on the contrary, slightly reduces water consumption during rainy periods. At negative temperatures, no significant correlations with water consumption were found, but a dependence on the growth of electricity consumption in the cold season, caused by maintaining the operability of the water supply infrastructure, was established. The results can be used to plan water supply modes in the context of changing climatic factors and used in the future to develop strategies for energy-efficient management of pumping stations.*

**Keywords:** energy consumption, water consumption, ambient temperature, precipitation, water supply, energy efficiency, pumping stations, correlation analysis, regression analysis, moving average.

Городская система водоснабжения представляет собой сложную и взаимосвязанную структуру, которая включает в себя насосные станции, водозаборные сооружения, распределительные сети и системы очистки воды. Для эффективного управления такой системой и минимизации энергопотребления необходимо иметь представление о роли экзогенных параметров, формирующих режимы водопотребления. Одной из ключевых задач в этой области является выявление факторов, которые на первый взгляд кажутся несущественными, но на практике оказывают значительное влияние на общую нагрузку всей системы. Исследование качественных и количественных связей в этом контексте позволяет разрабатывать более точные модели водопотребления, что, в свою очередь, создает прочную основу для оптимизации работы насосных станций и распределения энергетических ресурсов между водозаборами.

В научной литературе многократно подчеркивается особая роль температуры окружающей среды в планировании ресурсов водоснабжения. Так, исследования Twomey и Webber (2011) указывают на значительное увеличение спроса на воду в периоды повышенных температур [1]. В научной работе автор Zapata (2015) утверждает, что температура воздуха является определяющим фактором для потребления воды в жилых районах мегаполисов [2]. Климатические факторы также оказывает существенное воздействие на сельскохозяйственное водопотребление, что приводится в публикации авторов B. G. Bezerra и T. S. Lee (2012), которые отметили значительный рост потребления воды для орошения в жаркие периоды [3]. Отечественные исследования подтверждают важность температурных колебаний на снижение удельного энергопотребления благодаря уменьшению гидравлического сопротивления в трубопроводах при повышении температуры [4, 6].

Опираясь на мировой опыт и статистические показатели водоснабжения Гомеля, мы провели расширенное исследование, охватывающее режимы работы пяти ключевых водозаборов: Сож, Ипуть, Кореневский, Юго-Западный и Центральный.

Информационная база формировалась на основе часовых показателей работы насосных станций и получасовых данных системы учета электроэнергии. Дополнительно интеграция этих данных с климатическими показателями, такими как температура воздуха и осадки, полученными в сотрудничестве с Гомельским гидрометцентром, позволила увязать технологическую статистику с климатическими факторами. Это значительно расширило возможности анализа влияния внешних условий на водо- и электропотребление в системе.

Из проведенного литературного обзора была выдвинута гипотеза, что климатические факторы оказывают значительное влияние на динамику водопотребления и, соответственно, на затраты электроэнергии в системе водоснабжения. Рост температуры, как показывают мировые исследования, способствует увеличению потребления воды для бытовых нужд, полива и орошения. В свою очередь, атмосферные осадки оказывают противоположное влияние на водопотребление, снижая его в периоды обильных дождей. Однако первичный анализ показал, что влияние температуры и осадков (рис. 1) является слабо выраженным, о чем свидетельствуют низкие коэффициенты корреляции.

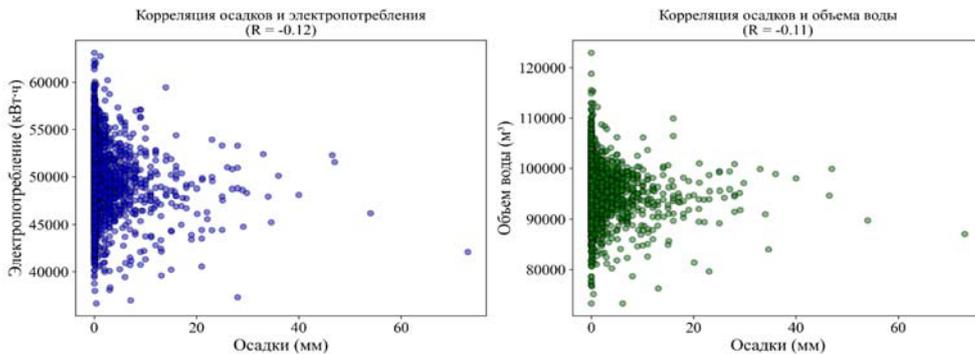


Рис. 1. Корреляция осадков электропотреблением и объемом подачи воды

При исследовании многомерной структуры данных отчетливо наблюдалось, что при достижении определенных значений температуры, связь между параметрами становится значимой. Для лучшего понимания на рис. 2 приводится анализ корреляции данных, разделенных по температурному порогу в 15 °С.

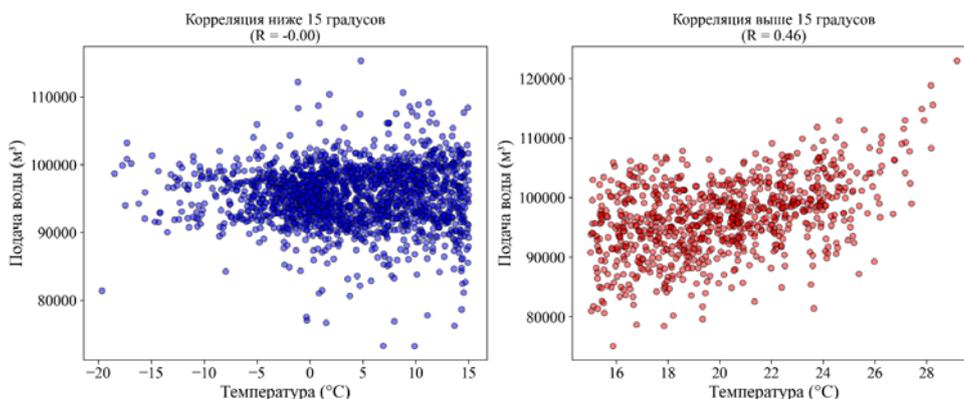


Рис. 2. Корреляция между подачей воды и температурой воздуха ниже и выше порога в 15 °С

Дальнейшее исследование включало разделение данных на два диапазона – до и после порога в 10 °С, с постепенным увеличением шага температуры. Для каждого диапазона были рассчитаны коэффициенты корреляции подачи воды и электропотребления в зависимости от температуры. Анализ показал, что при низких температурах корреляция подачи воды близка к нулю, что указывает на слабую значимость этого фактора в холодные периоды года. В то же время, для электропотребления выявлена отрицательная корреляция при низких температурах, что подтверждает увеличение энергозатрат в зимний период из-за роста гидравлических потерь и дополнительных расходов на обслуживание (например, отопление насосных станций, освещение и другие нужды). Влияние температуры на изменение энергопотребления составляет 15,6 %, а на изменение объема подачи воды – 15,8 %. Это означает, что при каждом градусе выше 25 °С энергопотребление увеличивается на 2597,1 кВт · ч, а объем подаваемой воды – на 4951,5 м<sup>3</sup> в сутки.

#### Литература

1. Twomey, K. M. Evaluating the energy intensity of the US public water system / K. M. Twomey, M. E. Webber // Energy Sustainability. – 2011. – Vol. 54686. – P. 1735–1748. DOI 10.1115/ES2011-54165
2. Zapata, O. More water please, it's getting hot! The effect of climate on residential water demand / O. Zapata // Water Economics and Policy. – 2015. – Vol. 1, N 03. – P. 1550007. DOI 10.1142/S2382624X15500071
3. Bezerra, B. G. Crop evapotranspiration and water use efficiency / B. G. Bezerra, T. S. Lee // Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments. – 2012. – Vol. 9. – P. 57–76. DOI 10.5772/29777
4. Грунтович, Н. В. Исследование влияния факторов на формирование удельных и общих расходов электрической энергии в технологической системе водоснабжения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский, О. В. Федоров // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 3 (32). – С. 54–59. – DOI 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-54-59
5. Зализный, Д. И. Адаптивное моделирование тепловых процессов электроэнергетического оборудования в реальном времени / Д. И. Зализный // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2015. – № 4 (63). – С. 44–52.

УДК 620.9

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА В РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

**Н. В. Грунтович, А. А. Капанский**

*ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», Минск, Республика Беларусь*

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Исследование посвящено анализу влияния сезонных климатических колебаний на динамику потребления природного газа в региональных системах газоснабжения. Основное внимание уделяется взаимосвязи между температурой наружного воздуха и объемом потребления газа в различных секторах экономики. Предварительные результаты подчеркивают сильную отрицательную корреляцию между снижением температуры и ростом потребления, что подчеркивает значимость климатических условий как ключевого фактора, влияющего на использование газа. Это исследование закладывает основу для разработки эффективных моделей прогнозирования, где температура воздуха играет определяющую роль при планировании газопотребления.*

**Ключевые слова:** региональные системы газоснабжения, потребление природного газа, температура наружного воздуха, корреляционный анализ.

## INFLUENCE OF TEMPERATURE FLUCTUATIONS ON NATURAL GAS CONSUMPTION IN REGIONAL GAS SUPPLY SYSTEMS

N. V. Gruntovich, A. A. Kapanski

*State Institute for Advanced Studies «GAS-INSTITUTE», Minsk,  
the Republic of Belarus*

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The study analyzes the impact of seasonal climate fluctuations on the dynamics of natural gas consumption in regional gas supply systems. The main focus is on the relationship between outdoor air temperature and gas consumption in various sectors of the economy. Preliminary results highlight a strong negative correlation between a decrease in temperature and an increase in consumption, which emphasizes the importance of climate conditions as a key factor influencing gas use. This study lays the foundation for developing effective forecasting models where air temperature plays a decisive role in planning gas consumption.*

**Keywords:** regional gas supply systems, natural gas consumption, outside air temperature, correlation analysis.

В последние десятилетия тема энергетической эффективности и устойчивости систем газоснабжения становится все более актуальной на глобальном уровне. В контексте Беларуси, страны с высоким уровнем газификации, прогнозирование потребления энергетических ресурсов является ключевой задачей в условиях меняющегося климата и экономических реалий. Региональные системы газоснабжения (РСГС) Беларуси, обслуживающие значительное количество энергетических, промышленных, бытовых и коммунальных потребителей по всей стране, сталкиваются с вызовами, связанными с необходимостью адаптации к изменяемым погодным условиям. Систематическое исследование взаимосвязи между температурой наружного воздуха и потреблением природного газа может предоставить ценные данные для планирования и оптимизации работы систем газоснабжения, а также для разработки дальнейших стратегий повышения эффективности системы планирования [1–6].

Целью проводимого исследования является анализ влияния сезонных температурных колебаний на динамику потребления природного газа Гомельской региональной системы газоснабжения. Особое внимание уделяется корреляционному анализу, позволяющему оценить степень влияния температурных изменений на потребление газа в различных секторах экономики. Стоит отметить, что в этой публикации представлены промежуточные результаты научной работы, в то время как конечной задачей является поиск ключевых закономерностей и тенденций, которые могут составить основу для формирования эффективной политики в области газоснабжения и планирования поставок природного газа на национальном уровне.

Проводимые исследования основывались на детальном анализе суточной статистики потребления природного газа за длительный период с 2012 по 2023 г. Для снижения размерности данных потребители газа в рамках региональной системы газоснабжения РПУП «Гомельоблгаз» сгруппированы в укрупненные балансовые группы, которые отражают основные секторы потребления. Выделены следующие группы: *энергетический сектор*, где газ выступает важнейшим источником для вы-

## 26 Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика

работки электро- и теплоэнергии; *промышленность*, охватывающая как крупные, так и мелкие предприятия с различными уровнями потребления газа; *сектор населения*, использующий газ для отопления домов и бытовых нужд; *сельское хозяйство*, где газ используется для технических операций, таких как обогрев помещений и сушка урожая; *коммунальные и жилищно-коммунальные хозяйства*, задействующие газ в своей повседневной деятельности.

Анализ корреляций по выделенным секторам экономики позволил сделать несколько важных выводов. Во-первых, в большинстве балансовых групп наблюдается очень сильная ежегодная отрицательная корреляция (от  $-0,90$  до  $-1,00$ ), подчеркивающая тесную связь между снижением температуры и ростом потребления газа. Это явно демонстрирует, что температурные условия играют ключевую роль в определении потребления газа во всех секторах. Во-вторых, вариативность корреляции между разными секторами и годами указывают на различную чувствительность к изменениям температуры, что может отражать специфику потребления газа в каждом из них. К примеру, сектор «Население» выделяется очень высокой и стабильной отрицательной корреляцией во все годы, указывая на значительное влияние температуры наружного воздуха на бытовое потребление газа. Секторы «Белэнерго» и «Минстройархитектуры» также показывают значительное влияние температуры на потребление газа, в то время как сектор «Белнефтехим» демонстрирует наименьшую силу связи, что может свидетельствовать о более сложных факторах, влияющих на его потребление газа, особенно в 2017 г.

На основе данных о потреблении газа в различных секторах экономики проведена оценка вариативности суточных данных. Для этого была построена диаграмма разброса. На рис. 1 каждый «ящик» показывает распределение потребления газа для групп потребителей, включая медиану, первый и третий квартили (25-й и 75-й процентиля), а также минимальные и максимальные значения в пределах 1,5 межквартильных размахов. Точки за пределами «усов» указывают на выбросы, отражающие аномально высокое или низкое потребление.

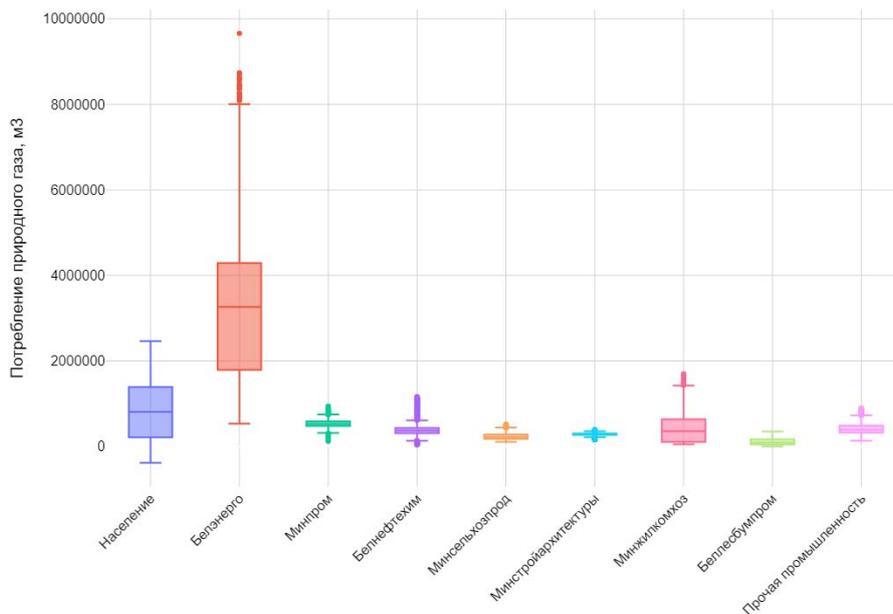


Рис. 1. Диаграмма разброса для различных групп потребителей природного газа

На представленной диаграмме группа «Энергетика» заметно выделяется среди остальных групп. Это можно увидеть по значительно большему разбросу значений потребления газа. Эти особенности распределения делают эту группу ключевой для учета при формировании стратегии газоснабжения, так как именно она может вносить наибольший вклад в общий объем потребления газа.

Для подтверждения различий в потреблении газа между балансовыми группами был проведен дисперсионный анализ.  $F$ -статистика в 12188,97 значительно превышает пороговое значение 3,84 при уровне значимости 0,05, а  $p$ -значение приблизилось к нулю, подтвердив высокую значимость различий. Межгрупповые вариации оказались значительно больше внутригрупповых, что продемонстрировало существенные различия в потреблении газа между группами.

Полученные результаты подчеркивают необходимость дифференцированного подхода к планированию газоснабжения с учетом потребностей каждой группы. Игнорирование таких различий может снизить точность планирования, что приведет к промахам и отразится на поставках и стоимости газа.

#### Литература

1. The study of structural fields of daily gas consumption of the balance groups of the regional gas supply system / D. Moroz, N. Hruntovich, S. Jhukovets [et al.] // E3S Web of Conferences, Prague, 14–15 мая 2020 года. – Prague, 2020. – P. 01066. – DOI 10.1051/e3sconf/202017801066.
2. Оптимизация схем электроснабжения промышленных предприятий / Е. И. Грачева, Т. В. Синюкова, Т. В. Табачникова, А. Н. Алимова. – Казань : Казан. гос. энергет. ун-т, 2022. – 135 с.
3. Regularities of the formation of structural fields of daily gas consumption of the regional gas supply system / D. Moroz, N. Hruntovich, A. Kapanski [et al.] // E3S Web of Conferences, Saint-Petersburg, 29–30 октября 2020 года. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 01076. – DOI 10.1051/e3sconf/202023001076.
5. Conditional-constant component in the total consumption of an energy resource and its influence on the energy efficiency of industrial consumers / N. Hruntovich, A. Kapansky, S. Jhukovets [et al.] // Sustainable Energy Systems: innovative perspectives : Conference proceedings, Saint-Petersburg, 29–30 окт. 2020 г. – Saint-Petersburg: Springer, Cham, 2022. – P. 459–470. – DOI 10.1007/978-3-030-67654-4\_48
6. Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович, Л. Г. Ефремов, О. В. Федоров // Вестник Чувашикого университета. – 2015. – № 3. – С. 40–48.

УДК 681.5

## ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

А. В. Сычѐв

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрена возможность оптимизации управления реактивной мощностью в системах промышленного электроснабжения, предлагается управление батареями статических конденсаторов выполнять автоматически с поддержанием заданного значения коэффициента мощности и с помощью программируемого таймера или дежурного персонала.*

**Ключевые слова:** управление, компенсация реактивной мощности, автоматизация, оптимизация.

## OPTIMIZATION OF CONTROL OF COMPENSATING DEVICES

A. V. Sychou

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The article examines the possibility of optimizing reactive power control in industrial power supply systems, it is proposed to control the static capacitor banks automatically, maintaining a given value of the power factor and using a programmable timer or duty personnel.*

**Keywords:** control, reactive power compensation, automation, optimization.

В целях повышения эффективности систем промышленного электроснабжения применяется компенсация реактивной мощности с помощью батарей статических конденсаторов (БСК). Мощность БСК должна управляться и это управление можно реализовать следующими способами:

- регулирование мощности БСК с поддержанием заданного значения коэффициента мощности  $\cos\varphi$  с помощью автоматического устройства;
- регулирование мощности БСК на фиксированных интервалах времени (например, рабочих сменах) в суточном цикле для обеспечения режима электропотребления, близкого к оптимальному, с помощью программируемого таймера или вручную дежурным персоналом.

Первый способ отличает высокая точность регулирования, но более высокая стоимость затрат на управляемую БСК. Второй способ менее точен, допускает возможность недокомпенсации или перекомпенсации реактивной мощности из-за погрешности прогноза реактивной электрической нагрузки на установленных для регулирования интервалах времени, но требует меньших денежных затрат на установку компенсирующих устройств.

Целью данной работы является рассмотрение синтеза одновременного применения двух указанных способов, что позволит снизить общие затраты на управление реактивной мощностью за счет комбинации точного, но дорогостоящего регулирования и менее точного, но более дешевого.

Применение автоматических регуляторов БСК широко предлагается производителями БСК и используется в системах электроснабжения промышленных объектов [1]. Также рассматривается целесообразность их применения и в системах электроснабжения бытовых потребителей [2]. Но с учетом отличий в стоимости реализации компенсации реактивной мощности целесообразным является сочетание использования регулирования мощности БСК с поддержанием заданного  $\cos\varphi$  и переключения нерегулируемой мощности БСК в суточном цикле на заранее определенных интервалах времени.

При совместной работе компенсирующих устройств с автоматическим регулятором и управляемых по циклограмме их суммарная мощность

$$Q_{\text{кв}} = Q_{\text{кв}}^{\text{а}} + Q_{\text{кв}}^{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{кв}}^{\text{а}}$ ,  $Q_{\text{кв}}^{\text{п}}$  – реактивная мощность компенсирующих устройств, управляемых автоматически и по циклограмме, квар.

В [3] показаны выражения, характеризующие влияние соотношения величин мощности компенсирующих устройств и способа управления ими на показатели электропотребления, которые определяют затраты на потребление реактивной электроэнергии. Такими показателями являются средняя реактивная мощность при по-

треблении/генерации реактивной энергии, среднеквадратичная мощность, которые будут иметь место при совместной работе компенсирующих устройств мощностью  $Q_{\text{ку}}^a$  с автоматическим регулятором, поддерживающим  $\cos\varphi = 1$ , и одновременном включении на всем интервале регулирования  $Q_{\text{ку}}^n$ . Значения  $Q_{\text{ку}}^a$ ,  $Q_{\text{ку}}^n$  и их соотношение зависят от суточного профиля реактивной мощности и ее характеристик как случайной величины (математического ожидания, стандартного отклонения).

Определение таких показателей предполагает наличие на промышленных объектах автоматизированных систем учета электроэнергии (АСУЭ), обеспечивающих сбор данных по электропотреблению в узлах нагрузки и возможность моделирования электропотребления на основе стохастических моделей. Наличие современных АСУЭ на сегодняшний день является нормой для промышленных предприятий, что позволяет выполнить необходимые расчеты по методике, приведенной в [3].

Таким образом, в целях оптимизации затрат на систему компенсации реактивной мощности предлагается осуществлять управление мощностью БСК в узле электрической нагрузки комбинированно с помощью автоматического регулятора или программируемого таймера или вручную дежурным персоналом. Установленная мощность БСК, регулируемых первым или вторым способом, может быть определена на основании стохастических моделей, вычисление параметров которых возможно на основании информации о суточном профиле электрической нагрузки, формируемой АСУЭ.

#### Литература

1. Компенсация реактивной мощности / Компания «Матик-электро», 2024. – URL: <https://matic.ru/reactive-power-compensation/>.
2. Ярошевич, А. В. Моделирование адаптивной системы компенсации реактивной мощности / А. В. Ярошевич // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та, Брест, 29–30 сент. 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. Р. Онысько [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2021. – С. 25–28.
3. Сычев, А. В. Стохастическое моделирование потребления реактивной мощности в узле нагрузки / А. В. Сычев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2003. – № 2. – С. 25–32.

УДК 621.311.21:519.2:332.142.6

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ В ЧАСТНОМ ЖИЛОМ СЕКТОРЕ

А. А. Капанский, Д. Г. Кроль, В. В. Павлов, Д. И. Веремеева

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрены характерные режимы электропотребления в частных жилых домах, необходимые для оценки пропускной способностью электрических сетей, а также расчет на примере деревни Ипполитовка Чечерского района, где анализируются временные ряды данных электропотребления. Статистическая обработка данных включает удаление нерепрезентативных домов, заполнение пропусков и исключение выбросов. На основе однофакторного дисперсионного анализа выявлены значимые различия между потребителями в том числе с однофазным и трехфазным подключением. Представлены типовые профили*

потребления для однофазной нагрузки и выявленные особенности потребления для трехфазных потребителей.

**Ключевые слова:** электропотребление, частные дома, однофазная нагрузка, трехфазная нагрузка, тепловая карта, дисперсионный анализ, пропускная способность сети.

## STATISTICAL ANALYSIS OF ELECTRICITY CONSUMPTION GRAPHS TO IDENTIFY REGULARITIES OF FORMATION OF CONSUMPTION MODES IN THE PRIVATE RESIDENTIAL SECTOR

A. A. Kapanski, D. G. Krol, V. V. Palov, D. I. Veremeeva

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*This study examines typical modes of electricity consumption in private homes, which are necessary for assessing the capacity of electrical networks. The example of the village of Ippolitovka in the Chechersk district is considered, where time series of electricity consumption data are analyzed. Statistical data processing includes the removal of unrepresentative houses, filling in gaps and eliminating outliers. Based on one-factor dispersion analysis, significant differences between consumers, including those with single-phase and three-phase connections, are revealed. Typical consumption profiles for single-phase loads and the identified consumption features for three-phase consumers are presented.*

**Keywords:** electricity consumption, private houses, single-phase load, three-phase load, heat map, dispersion analysis, network capacity.

Исследование электропотребления в частных домах играет первостепенную роль в разработке методов оценки пропускной способности электрических сетей, особенно на фоне увеличения нагрузок в жилом секторе. Эти нагрузки возрастают с ростом строительства новых домов и увеличением потребления электроэнергии для обогрева и охлаждения помещений. Как показал первичный анализ, потребители, проживающие в одноэтажных домах и коттеджах, демонстрируют значительное разнообразие в характере электропотребления, что связано с различиями в размерах жилых площадей, количеством жильцов и поведенческими особенностями домовладельцев.

Выявление общих свойств электропотребления жилых домов и их описание в виде типовых графиков электрических нагрузок становится важным шагом для планирования электроснабжения и предотвращения перегрузок в электрических сетях. Однако для получения типовых характеристик потребления требуется предварительная обработка большого объема статистической информации, включающая заполнение пустот, исключение выбросов, агрегирование и фильтрация данных. Цель данного исследования – на примере деревни Ипполитовка Чечерского района продемонстрировать способы обработки статистики для выявления закономерностей в формировании режимов электропотребления в жилых домах.

Данные для анализа электропотребления были собраны с автоматизированной системы учета электроэнергии, охвативший период с 14 августа 2023 г. по 6 мая 2024 г. и включающей более 12769 записей о 42 жилых домах. Регистрация электропотребления осуществлялась каждые полчаса, что обеспечило высокую детализацию временных рядов для изучения суточных электрических нагрузок. Предварительный анализ включал метод визуализации данных в виде тепловой карты [1], который дал возможность быстрого понимания общей картины потребления. Дома с отсутствующим потреблением или значительным количеством пропусков в данных прини-

мались как нерепрезентативные и исключались из дальнейшего анализа, избегая искажения результатов [2, 3].

После исключения домов с отсутствующим электропотреблением важной задачей стало заполнение пропусков в оставшихся данных. Для этого был использован метод подстановки, при котором отсутствующие значения заменялись данными из аналогичных временных периодов [4]. Это предположение основано на стабильности потребления в схожие часы. После заполнения пропусков проводилась оценка выбросов с помощью правила трех сигм [5, 6], что позволяло исключить значения, существенно отклоняющиеся от среднего, и минимизировать искажения в последующем анализе (рис. 1).

Для оценки различий в потреблении электроэнергии между домами использовался однофакторный дисперсионный анализ, который показал значимые различия, особенно между однофазным и трехфазным подключением [4]. Для однофазных потребителей были выделены две группы: с электропотреблением ниже и выше медианного значения. Электропотребление жилых домов выше медианного использовалось для анализа и формирования типового профиля мощности, так как эти потребители вносили наибольший вклад в формирование нагрузки и определяли более тяжелые условия для электросетей. На рис. 1 приведена диаграмма размаха, отражающая различия электропотребления между исследуемыми жилыми домами.

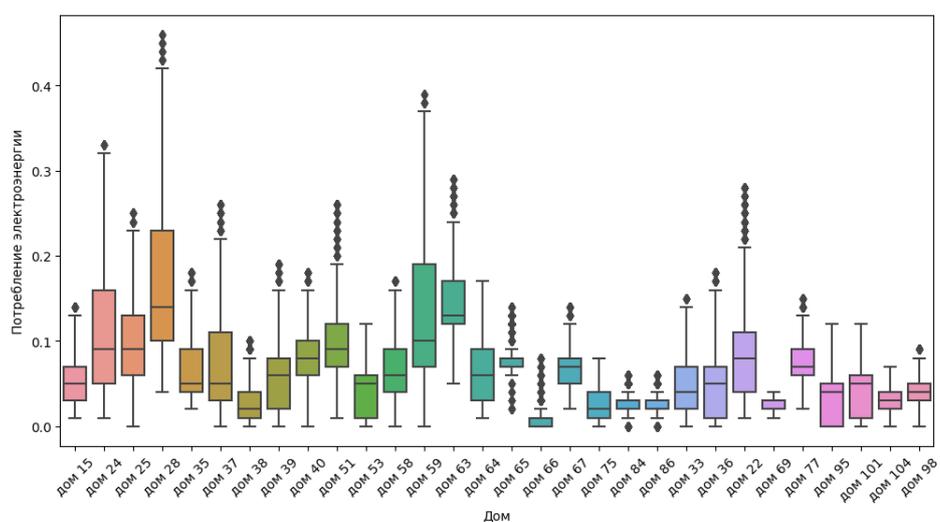


Рис. 1. Диаграмма размаха для электропотребления различных домов

Далее дома группировались по схожести профилей потребления на основе методов корреляционного анализа. Для однофазных потребителей результаты показали, что в ночное время (00:00–06:00) наблюдался самый низкий уровень получасовой активной мощности – порядка 0,10–0,15 кВт. Утренний пик начинался с 06:00, достигая 0,2 кВт к 09:00, что связано с началом активности жилого сектора. Днем (09:00–17:00) потребление стабилизировалось на уровне 0,2–0,22 кВт, а вечером (17:00–22:00) наблюдался наибольший пик, достигающий 0,3 кВт к 20:00–21:00. В конце дня нагрузка снижалась до 0,2 кВт. Важно отметить, что данные показатели являются усредненными годовыми значениями, которые существенно изменялись в зависимости от времени года, сохраняя форму получасового электропотребления (рис. 2).

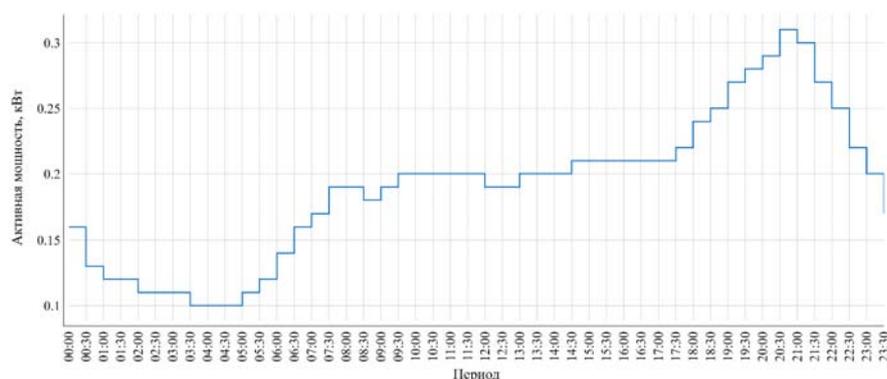


Рис. 2. Типовой усредненный профиль мощности однофазной нагрузки

Для трехфазной нагрузки результаты показали, что ночные и утренние часы характеризуются повышенными значениями мощности, что, видимо, связано с активной работой электрод котлов для поддержания температуры в помещениях. В зимние месяцы усредненная получасовая мощность достигала максимальных значений, превышая 4 кВт. В весенний период потребление постепенно снижалось до 2,7–3,0 кВт.

#### Литература

1. Gehlenborg, N. Heat maps / N. Gehlenborg, B.Wong // Nature Methods. – 2012. – Vol. 9. – N 3. – P. 213.
2. Cohen, A. C. Truncated and censored samples: theory and applications / A. C. Cohen // CRC press. – 2016. – 313 p.
3. Ивановский, Р. И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad / Р. И. Ивановский. – БХВ-Петербург, 2008. – 528 с.
4. Груздев, А. Изучаем pandas. Высокопроизводительная обработка и анализ данных в Python / Груздев, А., &Хейдт, М., 2022. – URL: <https://www.litves.ru/beok/a-v-gruzdev/zuchaem-pandas-vysokoprouzvoditelnaya-obvabotka-i-analiz-dann-44336423/>.
5. Концевая, Н. В. Анализ методов заполнения пропусков во временных рядах показателей финансовых рынков / Н. В. Концевая // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 8. – С. 18–20.
6. Злоба, Е. Статистические методы восстановления пропущенных данных / Е. Злоба, И. Яцкив // ComputerModelling&NewTechnologies. – 2002. – Т. 6, № 1. – С. 51–61.

УДК 696.46:697.27

### СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ АППАРАТОВ В СИСТЕМУ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

**В. В. Киселевич**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Представлена схема системы индивидуального теплоснабжения с электрическим котлом, в контуры отопления и горячего водоснабжения которой включены теплоаккумулирующие аппараты, заполненные парафином. Предлагаемое схемное решение обеспечивает повышение энергетической эффективности работы системы индивидуального теплоснабжения. Указанный эффект достигается благодаря снижению общего потребления электрической энергии на нужды отопления и горячего водоснабжения за счет использования запасенного в аккумуляторах тепла.*

**Ключевые слова:** система индивидуального теплоснабжения, электрический котел, аккумулятор теплоты, теплоаккумулирующий материал, скрытая теплота плавления.

## HEAT STORAGE DEVICES APPLICATION IN A SINGLE-USER HEAT SUPPLY SYSTEM WITH AN ELECTRIC BOILER

V. V. Kiselevich

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The configuration of a single-user heat supply system with an electric boiler is presented, wherein heat storage devices filled with paraffin are included in heating and hot water supply circuits. The proposed configuration solution provides an increase in the energy efficiency of the single-user heat supply system. The specified effect is achieved by reducing the total consumption of electric energy for heating and hot water supply needs due to the use of stored heat in heat storage units.*

**Keywords:** single-user heat supply system, electric boiler, heat storage unit, heat storage material, latent heat of fusion.

Эффективность работы систем индивидуального теплоснабжения, в которых единственным источником тепловой энергии является электрический котел, зачастую оказывается невысокой, поскольку для покрытия тепловых нагрузок на отопление и горячее водоснабжение (ГВС) необходимы довольно большие затраты электроэнергии [1]. Одним из возможных путей решения данной проблемы является дополнение систем индивидуального теплоснабжения теплоаккумулирующими аппаратами [1, 2].

На практике наибольший экономический эффект от применения теплоаккумулирующих устройств достигается, когда у потребителей электрической энергии действуют тарифы, дифференцированные по временным периодам. Аккумуляирование тепловой энергии в этом случае целесообразно проводить в ночное время суток, когда энергоемкие электроприемники отключены, а ее последующее расходование на нужды отопления и ГВС – в утренние и вечерние часы характеризуются значительным электропотреблением [1, 2].

Целью настоящей работы является разработка схемы, позволяющей оптимизировать работу системы индивидуального теплоснабжения с электрическим котлом.

**Описание системы индивидуального теплоснабжения.** Предлагаемая схема системы индивидуального теплоснабжения изображена на рис. 1. Отличительной особенностью данной схемы является наличие в ней двух теплоаккумулирующих аппаратов: аккумулятора теплоты для системы отопления (ТАО), подключенного параллельно электрическому котлу (ЭК), и гидравлически не связанного с котлом теплообменного аппарата для системы горячего водоснабжения (ТАГ), сочетающего функции теплового аккумулятора и емкостного водонагревателя.

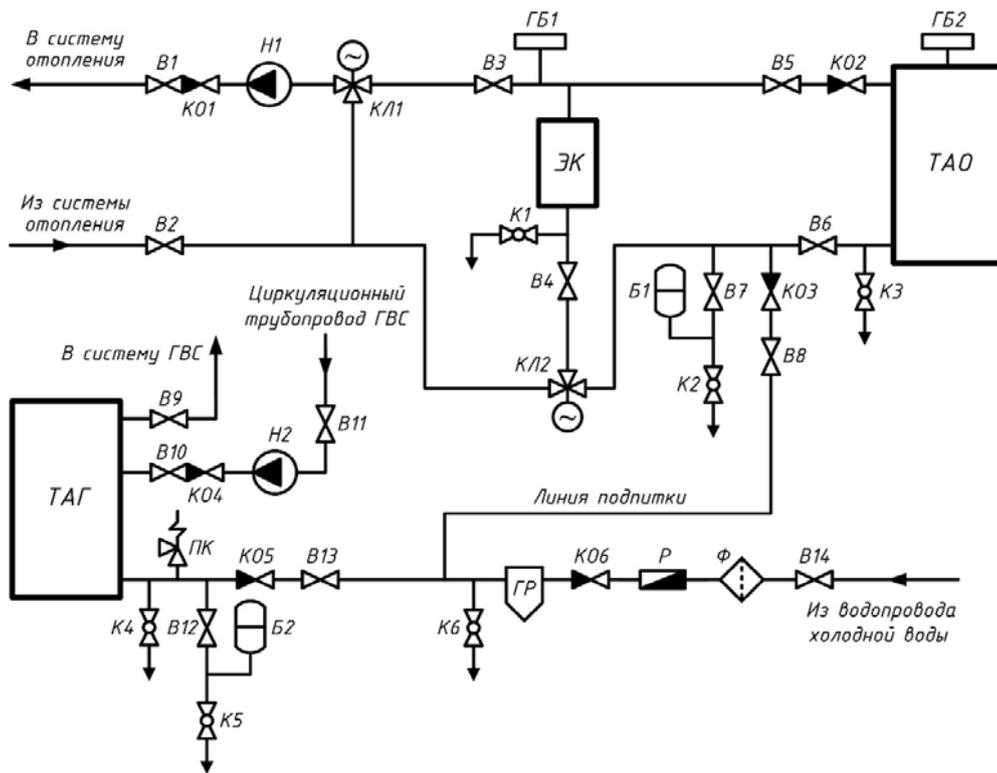


Рис. 1. Принципиальная схема системы индивидуального теплоснабжения с электрическим котлом

На рис. 1 приняты следующие обозначения: Б1 – Б2 – расширительные баки для компенсации термоиндуцированного повышения давления воды в контурах отопления и ГВС; В1 – В14 – запорные вентили; ГБ1 – ГБ2 – группы безопасности, в состав каждой из которых входят предохранительный клапан, воздухоотводчик и манометр; ГР – грязевик; К1 – К6 – шаровые краны для слива воды; КЛ1–КЛ2 – трехходовые регулирующие клапаны с электрическим приводом; КО1 – КО6 – обратные клапаны; Н1 – Н2 – насосы, обеспечивающие циркуляцию горячей воды в контурах отопления и ГВС; ПК – предохранительный клапан; Р – расходомер холодной воды; Ф – фильтр.

Конструкция каждого из аккумуляторов теплоты представляет собой цилиндрический корпус из нержавеющей стали, закрытый теплоизоляционным кожухом. Внутри корпуса коаксиально расположены снаружи оребренные металлические трубки и гладкие трубчатые электронагревательные элементы (ТЭН). Свободный объем между металлическими трубками и нагревательными элементами заполняют твердым теплоаккумулирующим материалом, в качестве которого в обоих аппаратах принят парафин с удельной скрытой теплотой плавления 189 кДж/кг при температуре 58–60 °С [3].

**Функционирование системы индивидуального теплоснабжения.** Зарядка аккумуляторов теплоты начинается в момент включения ТЭН, которые нагревают теплоаккумулирующий материал до температуры 70 °С. В окрестности температур 58–60 °С материал поглощает скрытую теплоту плавления, при этом часть аккумулярованного им тепла расходуется на нагрев воды, находящейся в межтрубном пространстве ТАО и ТАГ. По достижении в аккумуляторах установившегося теплового режима происходит отключение ТЭН.

Изоляция корпусов ТАО и ТАГ поддерживает температуру теплоаккумулирующего материала на уровне, превышающем 58–60 °С, и обеспечивает хранение аккумулированной тепловой энергии. Зарядку аккумуляторов рекомендуется проводить в ночное время, соответствующее периоду действия минимальных электрических нагрузок. При зарядке ТАО вентили В5 и В6 открыты, а клапан КЛ2 находится в положении, при котором проток воды из контура системы отопления в сторону ТАО закрыт. Тепловая зарядка ТАГ ведется при открытых вентилях В9 – В11.

Разрядка аккумуляторов осуществляется в часы средних и максимальных нагрузок, когда действует основной тариф на электроэнергию. Разрядка ТАГ начинается в момент разбора горячей воды у потребителей. В первое время горячая вода забирается из рабочего объема ТАГ, а затем по мере ее расходования в ТАГ через вентиль В13 и клапан КО5 поступает холодная вода из водопровода. Проходя через ТАГ, холодная вода поглощает теплоту, выделяющуюся при остывании теплоаккумулирующего материала, и в нагретом состоянии направляется в систему ГВС. В случае разрядки ТАГ до пороговой температуры, лежащей в диапазоне 45–50 °С, и наличии запроса тепла на нужды ГВС происходит автоматическое включение элементов ТЭН, выполняющих дозарядку ТАГ для стабилизации температурного режима системы ГВС.

В режиме разрядки ТАО электрический котел ЭК отключается, а трехходовой клапан КЛ2 переводится в положение, при котором проток воды открыт в направлении ТАО и закрыт в направлении ЭК. Вода из системы отопления насосом Н1 нагнетается в ТАО через вентиль В6, проходит сквозь рабочий объем ТАО и возвращается в контур системы отопления через обратный клапан КО2 и вентиль В5. Вода, циркулирующая по межтрубному пространству ТАО, нагревается за счет охлаждения теплоаккумулирующего материала, выделяющего при этом скрытую теплоту плавления.

Пороговая температура, определяющая момент полной разрядки аккумулятора ТАО, зависит от температурного графика системы отопления и, как правило, находится в интервале 35–40 °С. Автоматическое регулирование данного графика производится трехходовым клапаном КЛ1. Параллельная работа ЭК и ТАО реализуется посредством переключения клапана КЛ2 в промежуточное положение, обеспечивающее прохождение воды как в направлении ЭК, так и в направлении ТАО. Покрывание отопительной нагрузки в случае полной разрядки ТАО осуществляется при помощи электрического котла ЭК.

Предложена схема системы индивидуального теплоснабжения, в которой в дополнение к основному источнику тепловой энергии – электрическому котлу – установлены теплоаккумулирующие аппараты, заполненные парафином, способным при плавлении/затвердевании поглощать/выделять большое количество теплоты. Повышение эффективности функционирования системы индивидуального теплоснабжения в рамках предлагаемой схемы достигается благодаря уменьшению общего расхода электроэнергии на нужды отопления и горячего водоснабжения за счет использования предварительно аккумулированной тепловой энергии.

#### Литература

1. Торопов, А. Л. Применение электрических котлов для водяного поквартирного теплоснабжения / А. Л. Торопов // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 9. – С. 1451–1465.
2. Серов, С. Ф. Теплоаккумулирующие системы в теплоснабжении индивидуальных домов / С. Ф. Серов, Н. С. Дегтярев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 10-2. – С. 40–45.
3. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications / A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13, № 2. – P. 318–345.

УДК 621.3.052.3

## РАСЧЕТ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

М. Г. Гончаров, Д. И. Зализный

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрен алгоритм расчета суммарных потерь мощности и потерь напряжения для каждой фазы низковольтной трехфазной электрической сети на примере простейшей схемы. Полученный алгоритм может быть использован для разработки программного обеспечения по расчету несимметричных трехфазных электрических сетей.*

**Ключевые слова:** трехфазный потребитель, электрическая сеть, напряжение, проводимость, потери, нагрузка.

## CALCULATION OF VOLTAGE AND POWER LOSSES IN ASYMMETRIC THREE-PHASE CIRCUITS

M. G. Goncharov, D. I. Zalizny

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*An algorithm for calculating the total power losses and voltage losses for each phase of a low-voltage three-phase power grid is considered using the example of a simple circuit. The resulting algorithm can be used to develop software for the calculation of asymmetric three-phase electrical networks.*

**Keywords:** three-phase consumer, power grid, voltage, conductivity, losses, load.

В процессе проектирования и эксплуатации систем электроснабжения зачастую возникают задачи уточненного расчета значений напряжений питания потребителей с целью проверки пропускной способности линий электропередачи. Для таких расчетов существуют известные компьютерные программы RastrWin, Mustang и другие. Однако подавляющее большинство этих программ ориентировано на симметричные трехфазные цепи, то есть расчеты выполняются фактически как для однофазных цепей. Вместе с тем, в ряде случаев требуется учитывать несимметрию нагрузок потребителей. Это актуально для низковольтных систем электроснабжения в общественных и административных зданиях, а также для бытовых потребителей.

Цель данного исследования – создать алгоритм расчета для вычисления потерь напряжения и суммарных потерь мощности в простейшей трехфазной цепи.

В теории электрических сетей потерями напряжения принято называть алгебраическую разность между действующими значениями напряжений в требуемых узлах схемы [1]. Соответственно, для несимметричной трехфазной сети потери напряжения необходимо рассчитывать для каждой фазы между шинами низкого напряжения на трансформаторе и шинами потребителей.

Суммарные потери мощности в низковольтной сети определяются как разность между мощностью, передаваемой через трансформатор, и мощностью нагрузки на шинах потребителя. Если рассчитывать потери со стороны приходящего на трансформатор высокого напряжения, то необходимо прибавить еще и общие потери в трансформаторе.

Исследуемая схема представляет собой некоторую низковольтную трехфазную сеть от шин понижающей трансформаторной подстанции до шин потребителя с не-

симметричной нагрузкой. На рис. 1 представлена соответствующая схема замещения исследуемой сети.

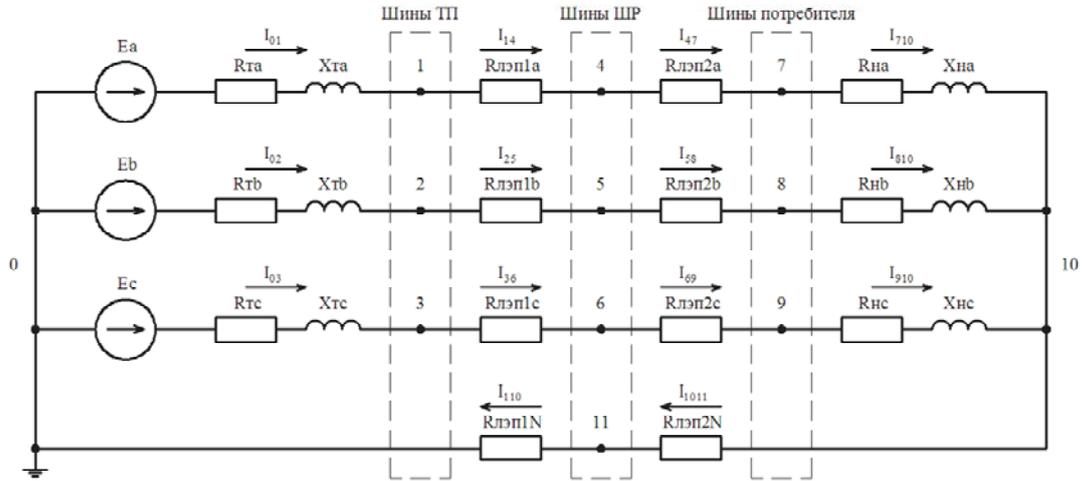


Рис. 1. Схема замещения цепи «Трансформаторная подстанция – потребитель»

Рассмотрим порядок расчета потерь напряжения:

1. Методом узловых потенциалов [2] рассчитываем комплексные значения потенциалов  $\dot{\phi}_i$  во всех узлах схемы.

2. Находим потери напряжения в каждой фазе как разность модулей потенциалов на шинах ТП и потребителя:

$$\Delta U_A = |\dot{\phi}_1| - |\dot{\phi}_7|; \Delta U_B = |\dot{\phi}_2| - |\dot{\phi}_8|; \Delta U_C = |\dot{\phi}_3| - |\dot{\phi}_9| \quad (1)$$

3. Приводим полученные значения в относительную форму:

$$\delta U_A = \frac{\Delta U_A}{U_{ном}} 100; \delta U_B = \frac{\Delta U_B}{U_{ном}} 100; \delta U_C = \frac{\Delta U_C}{U_{ном}} 100, \quad (2)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное значение фазного напряжения потребителя, равное, как правило, 220 В.

Для потребителей частного жилого фонда полученные значения не должны превышать предел в 8 %, указанный в нормативном документе [3].

Рассмотрим порядок расчета суммарных потерь мощности в электрической сети.

1. Определяем полную мощность нагрузки на шинах потребителя как сумму произведений фазного напряжения на потребителе на комплексно сопряженное значение тока в ветви цепи [2]:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{нагрузки} = & (\dot{\phi}_7 - \dot{\phi}_{10}) \left( \frac{\dot{\phi}_7 - \dot{\phi}_{10}}{R_{наА} + jX_{наА}} \right)^* + (\dot{\phi}_8 - \dot{\phi}_{10}) \left( \frac{\dot{\phi}_8 - \dot{\phi}_{10}}{R_{наВ} + jX_{наВ}} \right)^* + \\ & + (\dot{\phi}_9 - \dot{\phi}_{10}) \left( \frac{\dot{\phi}_9 - \dot{\phi}_{10}}{R_{наС} + jX_{наС}} \right)^* \end{aligned} \quad (3)$$

2. Аналогично определяем полную мощность, отдаваемую от шин трансформатора:

$$\dot{S}_{ТП} = (\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_4) \left( \frac{\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_4}{R_{ЛЭП1А}} \right)^* + (\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_5) \left( \frac{\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_5}{R_{ЛЭП2В}} \right)^* + (\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_6) \left( \frac{\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_6}{R_{ЛЭП3С}} \right)^*. \quad (4)$$

3. Рассчитываем потери активной мощности в трансформаторе:

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} + \left( \frac{|\dot{S}_{ТП}|}{S_{ном}} \right)^2 \Delta P_{к.ном}, \quad (5)$$

где  $\Delta P_{xx}$  – потери холостого хода трансформатора;  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора;  $\Delta P_{к.ном}$  – потери короткого замыкания трансформатора.

4. Находим потери активной мощности сети:

$$\Delta P_{сети} = \Delta P_T + \operatorname{Re}(\dot{S}_{ТП}) - \operatorname{Re}(\dot{S}_{нагрузки}). \quad (6)$$

5. Приводим полученное значение в относительную форму:

$$\delta P_{сети} = \frac{\Delta P_{сети}}{\Delta P_T + \operatorname{Re}(\dot{S}_{ТП})} 100. \quad (7)$$

Корректный расчет  $\delta P_{сети}$  имеет важное значение, так как этот параметр является одним из основных коммерческих показателей распределения электроэнергии.

Рассмотренные алгоритмы могут быть использованы при разработке программного обеспечения по расчету несимметричных режимов трехфазных электрических сетей. Алгоритмы являются универсальными и позволяют выполнять расчеты для схем с большим количеством потребителей.

#### Литература

1. Сибикин, Ю. Д. Электрические сети объектов электроснабжения : учебное пособие : [16+] / Ю. Д. Сибикин. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2021. – 280 с. : ил., табл. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=619094>.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – Москва : Высш. шк., 1996. – 638 с.
3. Электрические сети 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. Порядок расчета электрических нагрузок : СТП 33240.20.178-20. – Минск : Белэнерго, 2021. – 96 с.

УДК 621.315.1

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПАКТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СЕТОЧНОГО ТИПА

Г. И. Селиверстов, Т. Н. Савкова

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Выполнены исследования электрических и режимных параметров компактных воздушных линий сеточного типа. Дана сопоставительная оценка их параметров с параметрами традиционных воздушных линий.*

**Ключевые слова:** компактная ВЛ, электрические и режимные параметры ВЛ, зарядная мощность, потери мощности и напряжения.

## ELECTRICAL AND OPERATING PARAMETERS OF COMPACT AIR LINES OF THE GRID TYPE

G. I. Seliverstov, T. N. Savkova

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The electrical and operating parameters of compact air lines of the grid type have been studied. A comparative assessment of their parameters with the parameters of traditional air lines has been given.*

**Keywords:** compact overhead line, electrical parameters of overhead lines, natural power of overhead lines

Современная электроэнергетика – это отрасль, обеспечивающая развитие и функционирование всех отраслей народного хозяйства.

В целях ускоренного развития энергетики следует создавать ВЛ электропередачи с улучшенными удельными технико-экономическими показателями. Актуальность работы обусловлена поиском новых типов воздушных линий, отличающихся повышенной мощностью и сниженным экологическим влиянием.

Цель работы – исследование электрических параметров и режимов вариантов компактной воздушной линии электропередачи сеточного типа.

В исследованиях ставилась задача рассчитать и оценить электрические параметры и потери активной мощности и напряжения в сеточной двухрядной линии при изменении длины электропередачи  $L$  от 1 до 80 км.

Для исследования зависимости потерь активной мощности и потерь напряжения от передаваемой мощности и длины ее передачи рассматривались сеточные двухрядные линии [1, 2] с сечением проводов – АС-95/16, АС-120/19, АС-150/24, АС-185/29, АС-240/32, а также для сопоставительной оценки – традиционные одноцепные и двухцепные линии такой же длины и таких же сечений. Удельные параметры рассматриваемых вариантов линий – активное и индуктивное сопротивление, емкостная проводимость принимались на основании данных [1, 3].

В процессе исследований были определены погонные электрические параметры линий – активное сопротивление  $R_{л}$ , индуктивное сопротивление  $X_{л}$ , емкостная проводимость  $B_{л}$ , зарядная мощность  $Q_{с}$ .

Результаты расчетов для линий напряжением 110 кВ различных конструкций с сечением проводов АС-95/16 приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что активные сопротивления сеточной двухрядной и традиционной двухцепной линий равны между собой, индуктивные сопротивления и зарядные мощности при равной длине линий отличаются существенно.

Установлено, что электрические параметры сеточной двухрядной линии следующие: индуктивное сопротивление в 2,8 раза ниже, чем в традиционной одноцепной линии, и в 1,4 раза ниже, чем в традиционной двухцепной линии; ее зарядная мощность – в 2,9 раза выше, чем в традиционной одноцепной, и в 1,44 раза выше, чем в традиционной двухцепной линии электропередачи.

Как следствие, у компактных линий сеточного типа удельная натуральная мощность (на один провод расщепленной фазы) пропорциональна числу составляющих в расщепленной фазе и лежит в диапазоне 14,2–14,6 МВт.

**Электрические параметры сеточной двухрядной, традиционной одноцепной, традиционной двухцепной линий сечением АС-95/16**

Конструктивные и электрические параметры линий электропередачи												
L, км	$R_{л},$ Ом	$X_{л},$ Ом	$B_{л},$ $10^{-4},$ см	$Q_{с},$ Мвар	$R_{л},$ Ом	$X_{л},$ Ом	$B_{л},$ $10^{-4},$ см	$Q_{с},$ Мвар	$R_{л},$ Ом	$X_{л},$ Ом	$B_{л},$ $10^{-4},$ см	$Q_{с},$ Мвар
	сеточная двухрядная				традиционная одноцепная				традиционная двухцепная			
1	0,153	0,153	7,64	0,101	0,306	0,434	2,61	0,034	0,153	0,217	2,61	0,070
10	1,53	1,53	76,4	1,019	3,06	4,34	26,1	0,348	1,53	2,17	26,1	0,696
20	3,06	3,06	152,8	2,038	6,12	8,68	52,2	0,696	3,06	4,34	52,2	1,393
30	4,59	4,59	229,2	3,057	9,18	13,02	78,3	1,044	4,59	6,51	78,3	2,089
40	6,12	6,12	305,6	4,076	12,24	17,36	104,4	1,392	6,12	8,68	104,4	2,785
50	7,65	7,65	382	5,095	15,3	21,7	130,5	1,740	7,65	10,85	130,5	3,482
60	9,18	9,18	458,4	6,115	18,36	26,04	156,6	2,089	9,18	13,02	156,6	4,178
70	10,71	10,71	534,8	7,134	21,42	30,38	182,7	2,437	10,71	15,19	182,7	4,875
80	12,24	12,24	611,2	8,153	24,48	34,72	208,8	2,785	12,24	17,36	208,8	5,571

Этот параметр у традиционной линии напряжением 110 кВ при расстоянии между проводами разных фаз, равном 5 м, составляет 10 МВт.

Принципиальная схема воздушной линии электропередачи для исследования ее режимных параметров (активной  $P$ , реактивной  $Q$  и полной  $S$  мощностей, напряжения  $U$ ) включала источник питания, нагрузку и воздушную линию, их связывающую.

Исходные данные для определения потерь мощности и напряжения в линии электропередачи: напряжение источника питания 115 кВ; в качестве максимальной передаваемой мощности по линии электропередачи принималась предельно передаваемая мощность для различных сечений с коэффициентом мощности, равным 0,93.

В качестве примера расчеты потерь мощности  $\Delta P$  и напряжения  $\Delta U$  для различных типов линий с сечением проводов АС-95/16 приведены в табл. 2.

Результаты анализа расчетов режимов сеточной двухрядной и традиционных линий показывают следующее:

- потери активной мощности в сеточной двухрядной линии в 2,1 раза ниже, чем в традиционной одноцепной, и на 2 % раза ниже, чем в традиционной двухцепной линии при длине передачи электроэнергии 80 км;

- снижение индуктивного сопротивления и увеличение зарядной мощности в сеточной двухрядной линии из-за своих конструктивных особенностей приводит к существенному улучшению режимов напряжений электропередачи по сравнению с традиционной.

Более полно преимущества компактных линий сеточного типа характеризует степень использования ширины трассы и коридора линий при передаче через них максимального потока электрической энергии в натуральном режиме – удельной натуральной мощности, рассчитанной на метр ширины трассы  $P_{\text{нат}}/\text{м}$  и на метр коридора трассы  $P_{\text{нат}}/\text{м}^2$ .

**Результаты расчета потерь мощности и напряжения для различных типов  
ВЛ сечением АС-95/16**

Длина линии $L$ , км	Режимные параметры линии электропередачи					
	$\Delta P$ , МВт	$\Delta U$ , кВ	$\Delta P$ , МВт	$\Delta U$ , кВ	$\Delta P$ , МВт	$\Delta U$ , кВ
	сеточная двухрядная		традиционная		традиционная двухцепная	
1	0,049	0,112	0,098	0,251	0,049	0,125
10	0,483	1,108	0,973	2,496	0,485	1,242
20	0,955	2,189	1,939	4,967	0,962	2,457
30	1,418	3,243	2,897	7,410	1,432	3,646
40	1,872	4,270	3,848	9,828	1,896	4,809
50	2,317	5,270	4,792	12,219	2,353	5,945
60	2,754	6,243	5,730	14,584	2,805	7,056
70	3,185	7,188	6,660	16,923	3,250	8,140
80	3,609	8,107	7,584	19,235	3,690	9,197

Габариты линий – ширина трассы и высота опор с грозозащитными тросами при расчете значений  $P_{\text{нат}}/м$ ,  $P_{\text{нат}}/м^2$  определялись согласно [3, 4] и для линий одного класса напряжения различаются конструктивными параметрами сближенных расщепленных фаз.

Так, степень использования ширины трассы и коридора сеточных линий при передаче через них максимального потока электрической энергии в натуральном режиме при числе проводов в расщепленной фазе равном 2 и напряжении  $U = 110$  кВ составляет 14,2 МВт/м и 0,78 МВт/м<sup>2</sup> соответственно, у традиционных двухцепных – 4,4 МВт/м и 0,24 МВт/м<sup>2</sup>.

#### Литература

1. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В. Т. Федин, Ю. Д. Головач, Г. И. Селиверстов, М. С. Чернецкий. – Минск : Наука і тэхніка, 1993. – 224 с.
2. Далинчук, А. М. Оценка возможностей компактных воздушных линий сеточного типа / А. М. Далинчук, Г. И. Селиверстов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 г. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 204–207.
3. Карапетян, И. Г. Справочник по проектированию электрических сетей / И. Г. Карапетян, Д. Л. Файбисович, И. М. Шапиро ; под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ЭНАС, 2012. – 374 с.
4. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – Минск : Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.

УДК 628.984

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦВЕТНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Ю. Н. Колесник

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Представлены результаты измерения спектров излучения цветных светодиодных источников света. Рассматривается спектральный состав излучения и величина уровня пульсаций при различных режимах работы.*

**Ключевые слова:** спектр излучения, пульсация, цветовой источник света (ИС).

## STUDY OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF COLOR LED LAMPS

T. N. Savkova, A. I. Kravchenko, U.N.Kolesnik

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The results of measuring the emission spectra of colored LED light sources are presented. The spectral composition of the radiation and the magnitude of the pulsation level in various operating modes are considered.*

**Keywords:** radiation spectrum, pulsation, color light source.

Анализ спектров излучения светодиодных источников света имеет важное значение для исследований и разработок в области освещения. Спектры светодиодов могут иметь особенности, отличающиеся от спектров других источников света, таких как лампы накаливания, энергосберегающие или люминесцентные лампы.

Для измерения спектров излучения светодиодных источников света используются спектральные приборы, такие как спектрофотометры или спектрорадиометры.

Также существуют программные инструменты, позволяющие моделировать и анализировать спектры светодиодных источников света. Например, COMSOL Multiphysics обеспечивает возможность расчета спектров излучений различных источников света, включая светодиоды.

Анализ спектров излучений светодиодных источников света имеет решающее значение при определении их характеристик, таких как цветовая температура, цветопередача и мощность излучения. Эти параметры являются обязательными при выборе светодиодных источников света для частных приложений, таких как освещение помещений, автомобильные фары или дисплеи.

Излучение светодиодных источников света может оказать негативное воздействие на человека. Одной из основных причин этого является возможное наличие синего/голубого света в спектре светодиодов. Воздействие синего/голубого света на глаза может вызвать поражение сетчатки, вызывать напряжение и дискомфорт. Кроме того синий/голубой свет оказывает влияние на выработку мелатонина и влияет на регуляцию циркадных ритмов организма, что может привести к нарушению сна и снижению его качества, а также образованию избыточного количества свободных радикалов.

Целью работы являлось измерение и анализ спектров излучения цветных светодиодных ламп для обоснования эффективности их последующего применения.

Для измерения спектров излучения использовался лабораторный спектрофотометр, состоящий из ИС, монохроматора и системы регистрации – за выходной ще-

люю монохроматора устанавливался фотоумножитель, подключенный к электронной схеме измерения и обработки спектров. При создании спектрофотометра был использован ряд блоков спектрометрического комплекса КСВУ-6, который предназначен для измерения спектров поглощения прозрачных веществ: двойной монохроматор МДР-6 со сменными дифракционными решетками, блок питания, усилители постоянного тока и т. д. [1, 2]. Осветитель КСВУ-6 был переоборудован таким образом, что в фокусе осветительной системы мог помещаться исследуемый ИС.

В монохроматоре были установлены две дифракционные решетки с 1200 штрихами на миллиметр, что соответствует диапазону измерения излучения от 400 до 800 нм. Предусмотрен как ручной режим установления длины волны, так и ее установка с помощью шагового двигателя и ПК. За выходной щелью монохроматора помещался фотоумножитель ФЭУ-100. Далее фототок умножителя усиливался усилителем постоянного тока и направлялся на вход аналогоцифрового преобразователя микроконтроллера и далее – в персональный компьютер. Управление движением шагового двигателя осуществлялось микроконтроллером Arduino Uno R3 через транзисторные ключи, выполненные на мощных транзисторах КТ-818. Гальваническая развязка микроконтроллера и транзисторных ключей была осуществлена на оптронах HCPL-817.

Исследовались светодиодные цветные лампы LED RGB с дистанционным управлением цвета, где доступны 16 цветовых схем, созданных на основе 3 цветов, которые смешиваются, и дают суммарную яркость примерно на уровне совокупной яркости двух источников, когда их свет накладывается друг на друга. Яркость растет с увеличением степени смешивания. Спектры исследуемых цветных ламп LED RGB в режиме зеленого свечения приведены в диапазоне от 410 до 650 нм (рис. 1), имеют различные цветовые оттенки зеленого, голубого и синего цвета, определяемые соотношением интенсивностей наблюдаемых в спектре излучения двух максимумов. Один максимум, наиболее интенсивный, расположен в сине-голубой области видимого диапазона, второй в зелено-голубой (см. таблицу). В первом режиме лампы LED RGBW BUIB в спектре излучения преобладает максимум с длиной волны порядка 520 нм и практически отсутствуют пульсации.

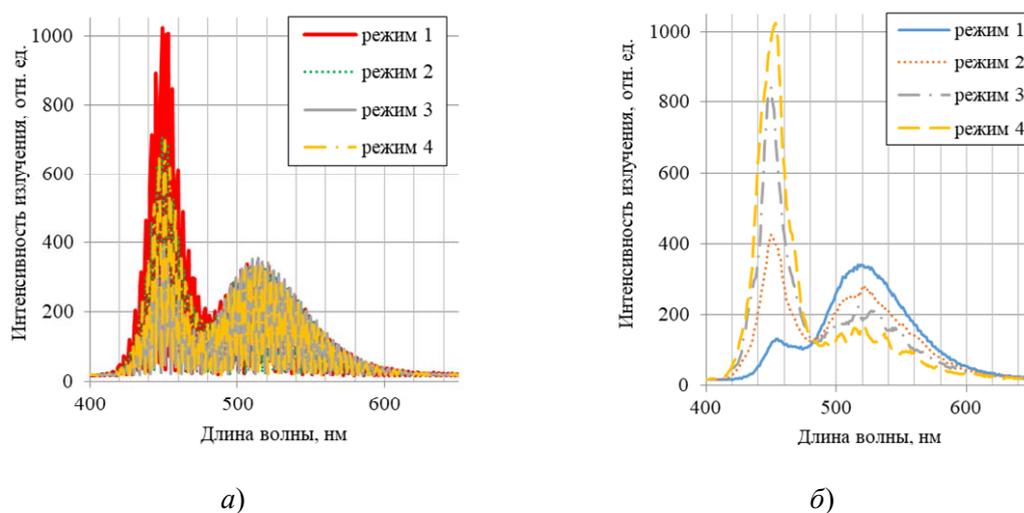


Рис. 1. Результаты измерений спектров излучения ламп в режимах зеленого цвета:  
*a* – led rgb bulb; *б* – led rgbw buib

Установлено, что излучение лампы LED RGBW BUIB имеет заметно более низкий уровень пульсаций светового потока, которые происходят с частотой 1 кГц – коэффициент пульсаций в пределах 10–15 %, в случае же LED RGB BULB он достигает 90 % практически во всех цветовых режимах работы лампы, а пульсации наблюдаются с частотами 100 Гц и 2,5 кГц; больше и световой поток в зависимости от выбранного режима.

**Параметры спектров излучения ламп LED RGB**

Тип лампы	Наличие пульсаций	Цветовой режим	Максимум спектральной линии, нм,	Световой поток, Лм	
LED RGBW BUIB	–	зеленый	1	520	800
	+		2	450 и 530	
	+		3	450 и 530	
	+		4	450 и 530	
LED RGB BULB	+	зеленый	1	455 и 525	70–470
	+		2	450 и 540	
	+		3	450 и 525	
	+		4	450 и 525	

Областью применения исследуемых ламп является архитектурная подсветка и системы освещения типа MoodLighting (освещение для настроения), в которых цвет излучаемого света должен меняться в режиме реального времени и нет требований к пульсации и качеству цветопередачи. Однако наличие интенсивного излучения в сине-голубой области видимого диапазона и высокий уровень пульсаций ставит под сомнение использование данных источников света в жилых помещениях и общественных местах.

#### Литература

1. Савкова, Т. Н. Экспериментальная спектроскопическая установка на базе монохроматора МДР-6 / Т. Н. Савкова, А. М. Яцино, А. И. Кравченко // Естественные науки – базис подготовки специалиста для органов и подразделений по ЧС : материалы III Респ. науч.-практ. конф., Гомель, 1 апр. 2015 г. / ГИИ МЧС РБ, Гомел. фил. Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: П. В. Астахов [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 50–56.
2. Получение и свойства люминофорных покрытий на основе наноструктурированного иттрий – алюминиевого граната и легкоплавкого стекла / О. В. Урецкая, Н. Е. Дробышевская, Е. Н. Подденежный [и др.] // Тонкие химические технологии. – 2015. – Т. 10, № 3. – С. 85–90.

УДК 621.3.018.3

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10 кВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ УРОВНЕЙ**

**В. М. Шакин, А. О. Добродей**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

*Моделирование в электроэнергетике позволяет заменить сложные, а иногда и невозможные эксперименты на реальных объектах экспериментированием на их моделях. Для*

исследования перенапряжений в электрических сетях необходимо провести ряд экспериментов, чтобы получить данные о перенапряжениях, которые могут возникнуть в исследуемых сетях. В данной работе проведено исследование перенапряжений в электрической сети 10 кВ. Поставленная задача решена при помощи программного комплекса NI Multisim 14.0.

**Ключевые слова:** моделирование в электроэнергетике, исследования перенапряжений в электрических сетях, программный пакет NI Multisim 14.0.

## MODELING OF OVERVOLTAGES IN A 10 KV ELECTRICAL NETWORK TO ASSESS THEIR LEVELS

V. M. Shakin, A. O. Dobrodey

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Modeling in the electric power industry makes it possible to replace complex and sometimes impossible experiments on real objects with experimentation on their models. To study overvoltages in electrical networks, it is necessary to conduct a number of experiments in order to obtain data on overvoltages that may occur in the studied networks. In this paper, a study of overvoltages in the 10 kV electrical network is carried out. The task was solved using the NI Multisim 14.0 software package.*

**Keywords:** modeling in the electric power industry, studies of overvoltages in electric networks, NI Multisim 14.0 software package.

Перенапряжения, возникающие в электрических системах, оказывают влияние на надежность электроустановок. Несмотря на кратковременность воздействия, они характеризуются высокой кратностью по отношению к длительному рабочему напряжению, воздействием на все электрически связанные элементы системы независимо от места возникновения и усилением процессов возникновения и развития дефектов [1, 2].

Аварийность электрических сетей 6–35 кВ из-за воздействия перенапряжений довольно высока. Поэтому исследование перенапряжений и разработка мероприятий и устройств защиты от них является актуальной задачей для повышения надежности работы и обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей.

В рамках данной работы проведено исследование перенапряжений в электрической сети 10 кВ (секция шин с отходящими кабельными линиями).

Составлена схема замещения исследуемой сети и рассчитаны ее параметры [1].

С помощью программного продукта *NI Multisim 14.0* проведено моделирование перенапряжения в электрической сети с изолированной нейтралью при замыкании фазы *C* на землю (рис. 1). Для моделирования замыкания в схему добавлен генератор импульсов со скважностью 50 % и ключ, который через равные промежутки времени замыкает фазу *C* на землю. Для фиксации переходного процесса в модель сети добавлен осциллограф. Красным цветом отображается поврежденная фаза, синим – «здоровая» (рис. 2).

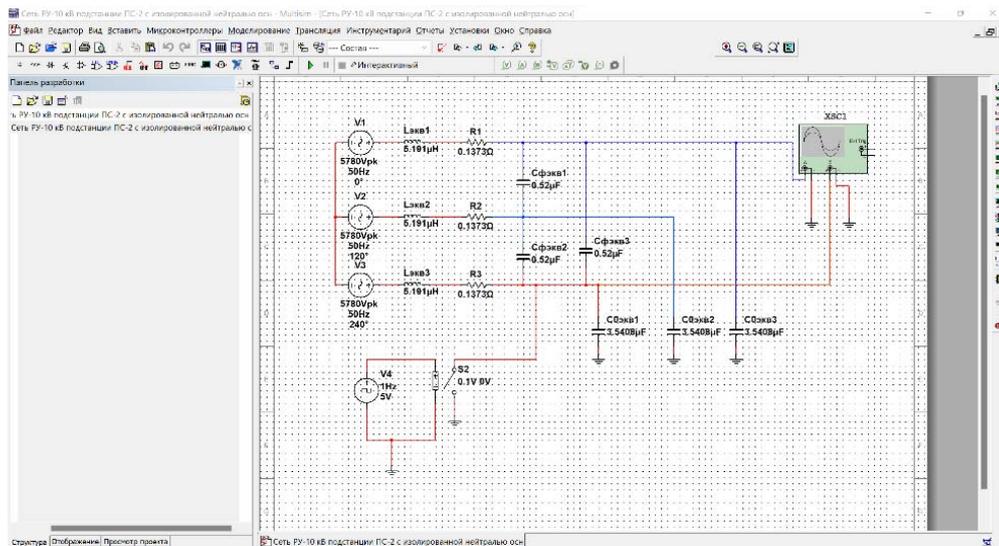


Рис. 1. Модель исследуемой сети при замыкании фазы *C* на землю в NI Multisim 14.0

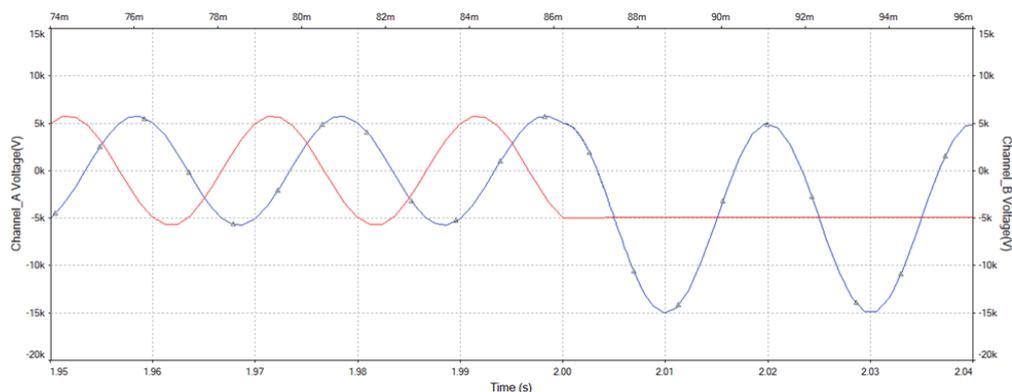


Рис. 2. Осциллограмма переходного процесса при замыкании фазы *C* на землю

По осциллограмме переходного процесса (рис. 2) при замыкании фазы *C* на землю в сети 10 кВ с изолированной нейтралью зафиксирована амплитуда максимального перенапряжения  $U_{\max} = 14,85$  кВ. При амплитуде наибольшего рабочего напряжения  $U_{\text{раб}} = 5,78$  кВ, кратность перенапряжения составляет:  $K_{\Pi} = U_{\max}/U_{\text{раб}} = 14,85/5,78 = 2,57$ . Длительность перенапряжения составляет 0,427 с.

В настоящее время происходит модернизация системы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ путем заземления ее через резистор [3]. При однофазном замыкании на землю в сетях с заземленной через резистор нейтралью во всех присоединениях протекают собственные емкостные токи, однако в поврежденном присоединении, кроме суммарного емкостного тока, протекает активный ток. Это позволяет определить поврежденное присоединение и использовать простую токовую защиту, действующую на сигнал, или на отключение поврежденного присоединения. Кроме того, заземление нейтрали через резистор позволяет снижать уровень дуговых, феррорезонансных и коммутационных перенапряжений [1, 2].

Для заземления нейтрали сети через резистор необходимо рассчитать величину сопротивления данного резистора. Заземляющий резистор выбирается, исходя из режима длительного протекания тока [2].

Модель сети и осциллограмма переходного процесса представлены на рис. 3 и 4.

Кратность перенапряжения при переходном процессе составляет:  $K_{\Pi} = 12,99/5,78 = 2,247$ . Длительность импульса составляет 0,364 с.

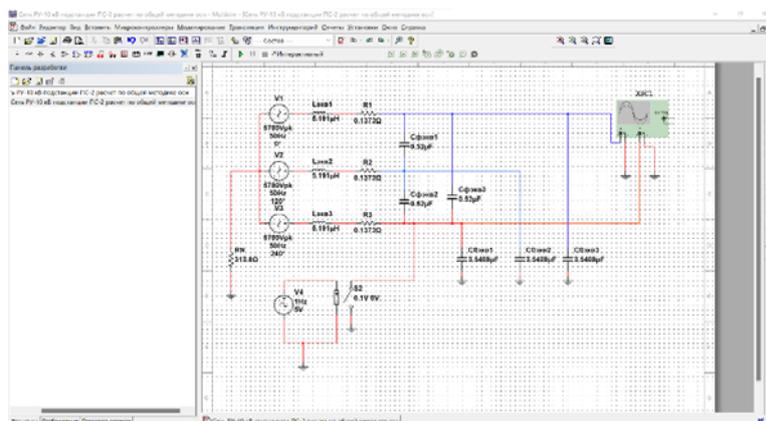


Рис. 3. Модель исследуемой сети с нейтралью заземленной через резистор

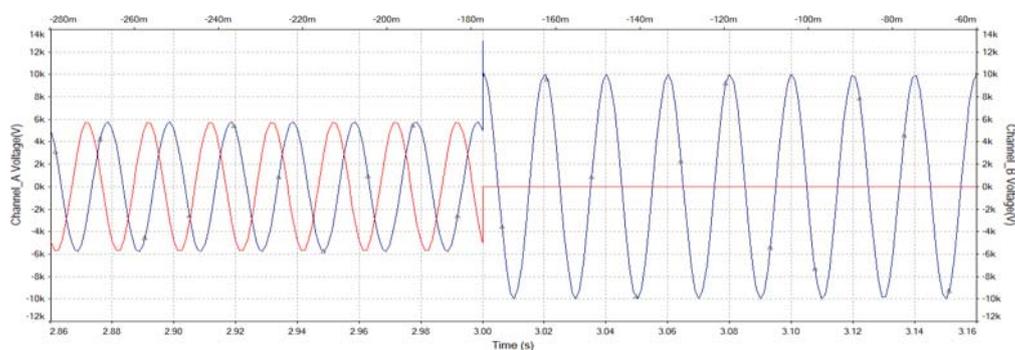


Рис. 4. Осциллограмма переходного процесса в сети с нейтралью, заземленной через резистор

Применение резистивного заземления нейтрали снизило величину перенапряжения в сети, а также уменьшило время его воздействия на изоляцию.

Для сетей напряжением 6–35 кВ возможно применение двух режимов резистивного заземления нейтрали: низкоомного и высокоомного. Расчет резистивного заземления нейтрали сети произведен согласно рекомендациям «Белэнерго» [3].

Кратность перенапряжения в момент коммутации при применении низкоомного резистора составила:  $K_{\Pi} = 13,19/5,78 = 2,282$ . Длительность протекания перенапряжения при применении низкоомного резистора заземлении нейтрали составляет 0,366 с.

Кратность перенапряжения в момент коммутации при применении высокоомного резистора составила:  $K_{\Pi} = 12,8/5,78 = 2,214$ . Длительность протекания перена-

пряжения при применении высокоомного резистора заземлении нейтрали составляет 0,354 с.

#### Значения кратности и длительности протекания перенапряжений

Вид сети	$K_{\Pi}$ , о. е.	$T_{\Pi}$ , с
Сеть с изолированной нейтралью	2,57	0,427
Сеть, заземленная через резистор, рассчитанный по общей методике	2,247	0,364
Сеть, заземленная через низкоомный резистор	2,282	0,366
Сеть, заземленная через высокоомный резистор	2,212	0,354

Таким образом, с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе NI Multisim 14.0 проведен ряд экспериментов, в ходе которых получены осциллограммы переходных процессов при замыкании фазы на землю в сети 10 кВ при различных режимах работы ее нейтрали. Наибольшие кратности перенапряжений наблюдались в сети с изолированной нейтралью  $K_{\Pi} = 2,57$ . Применение резистивного заземления нейтрали позволило снизить кратность перенапряжения до 2,247. Также уменьшилась и длительность протекания перенапряжения с 0,427 с до 0,364 с.

Применение низкоомного и высокоомного резистора также уменьшили величину перенапряжения и составили: при низкоомном резистивном заземлении нейтрали:  $K_{\Pi} = 2,282$ , при высокоомном:  $K_{\Pi} = 2,212$ .

Применение резистивного заземления нейтрали при однофазном замыкании на землю уменьшает уровень перенапряжения, тем самым уменьшая вероятность повреждения изоляции кабелей.

#### Литература

1. Титенков, С. С. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю / С. С. Титенков, А. А. Пугачев // Энергоэксперт. – 2010. – № 2. – С. 18–25.
2. Добродей, А.О. Дуговые и коммутационные перенапряжения в электрических сетях : пособие по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / А. О. Добродей. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 110 с.
3. Методические указания по заземлению нейтрали сетей 6–35 кВ через резистор: СТП 09110.20.187-09 Белэнерго, 2009. – 69 с.

УДК 621.317.353.018.3

#### ПОКАЗАТЕЛИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА SPO-6-36-4K-P

Т. В. Алферова, О. Г. Широков, И. Д. Костюченко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Рассмотрены показатели несинусоидальности тока и напряжения при работе светодиодного светильника SPO-6-36-4K-P. Дано определение коэффициента гармонических составляющих тока и напряжения.

**Ключевые слова:** светодиодные источники света, коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения.

## CURRENT AND VOLTAGE NON-SINUSOIDALITY INDICATORS DURING OPERATION OF LED LIGHT SOURCES

T. V. Alfyorova, O. G. Shirokov, I. D. Kostuchenko

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The indicators of non-sinusoidality of current and voltage during operation of LED light sources are considered; determination of the coefficient of harmonic components of current and voltage.*

**Keywords:** LED light sources, harmonic coefficient of current and voltage.

При разработке новых проектных решений по строительству и модернизации электроустановок, проектировщики не всегда учитывают показатели нелинейных характеристик драйверов светодиодных светильников, наличие в них гармонических составляющих тока и напряжения, генерации реактивной мощности в сеть, наличие импульсных токов в момент пуска и влияние данных факторов на электромагнитную совместимость. Известны случаи, когда при включении осветительной нагрузки возникали радио и электромагнитные помехи. Как правило, блоки питания светодиодных светильников не удовлетворяли требованиям нормативной технической документации. К сожалению, в настоящее время многие поставщики и начинающие разработчики пренебрегают требованиями к электромагнитной совместимости [1].

Экспериментальная часть выполнялась на базе «Комплекса регистрации параметров электрических сигналов» (КРПЭС). КРПЭС – прибор, построенный на основе персонального компьютера по модульному принципу, и предназначенный для регистрации мгновенных значений напряжений и токов в распределительных устройствах. Схема определения влияния осветительной нагрузки на качество электрической энергии, представлена на рис. 1, где ТТ – измерительный трансформатор тока; ИПТ – измерительный преобразователь тока; ИПН – измерительный преобразователь напряжения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

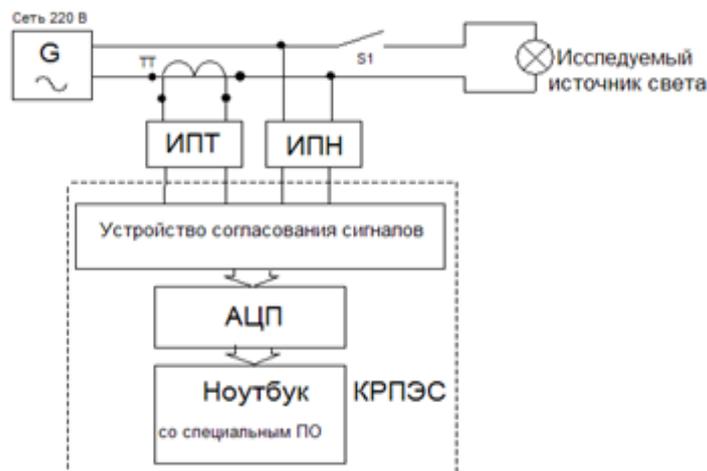


Рис. 1. Схема определения влияния осветительной нагрузки на качество электрической энергии

## 50 Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика

Рассмотрим уровень несинусоидальности светодиодного светильника SPO-6-36-4К, который предназначен для административных зданий.

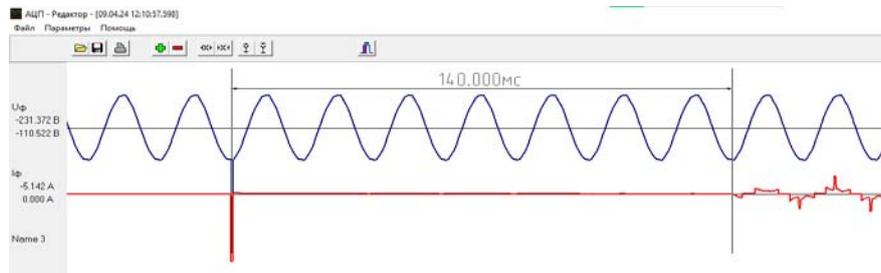


Рис. 2. Осциллограмма тока и напряжения при включении светодиодного светильника SPO-6-36-4К-Р

На рис. 2 при включении на осциллограмме виден импульс тока, а также длительная пауза в 140 мс из-за коммутационных воздействий, происходящих при включении устройства напрямую вилкой в сеть. Поэтому, в случае подключения светильника вилкой, одним из решений является применение сетевых фильтров, в которых есть кнопка-выключатель, позволяющая производить включение в сеть с минимальными коммутационными воздействиями.

На светодиодном светильнике SPO-6-36-4К-Р имеется 4 светодиодных полосы. Таким образом достигается форма с наименьшим искажением синусоидальности питающего тока. Длительность включения приведена на рис. 3. Работа светильника достаточно плавная: без искажений и без пульсаций, заметных глазу.

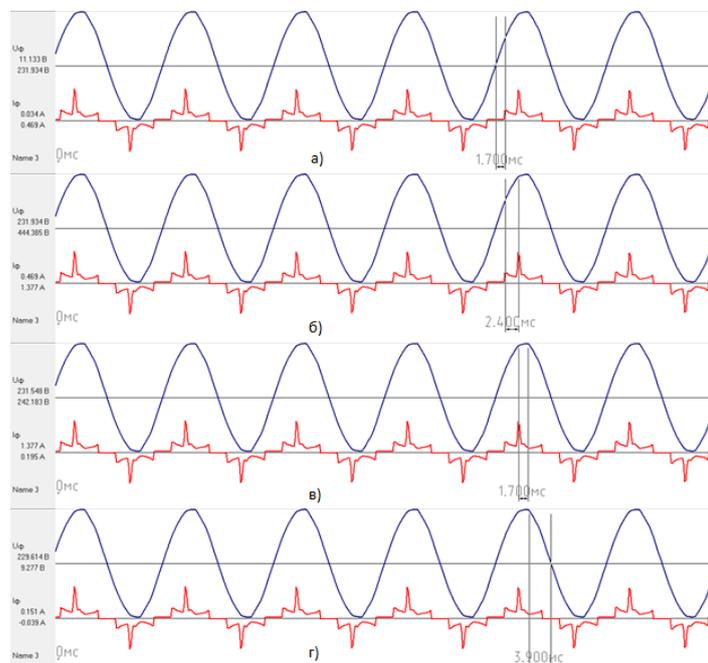


Рис. 3 Осциллограмма тока и напряжения при установившемся режиме работы светильника SPO-6:

а – включение 1-й полосы; б – включение 2-й полосы;  
в – включение 3-й полосы; г – включение 4-й полосы

Сравнение измеренных значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения и тока представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

**Сравнение измеренных значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения с нормируемыми**

Номер гармоник $n$	Измеренные значения, %	Нормируемые значения (ГОСТ32144-2013), %
Четные		
2	0,0141	2
4	0,0005	1
6,8,10	< 0,0005	0,5
12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40	< 0,0001	0,2
Нечетные		
3	0,0246	5
5	0,000579	6
7	0,000348	5
9	0,0067	1,5
11	0,002376	3,5
13	0,000471	3
15	0,000081	0,3
17	0,000102	2
19, 23, 25, 29, 31, 35, 37	< 0,00011	1,5
21, 27, 30, 33, 36, 39	< 0,000342	0,2

Таблица 2

**Сравнение измеренных значений коэффициентов гармонических составляющих тока с нормируемыми**

Порядок гармонической составляющей $n$	Измеренные значения, %	Нормируемые значения (ГОСТ 30804.3.2-2013), %
2	0,022	2
3	3,3	30λ*
5	2,39	10
7	5,7	7
9	3,4	5
11 < $n$ < 39 (только для нечетных гармонических составляющих)	для $n = 11-3,4$	3
	остальные – < 2,7	3

\*Коэффициент мощности цепи.

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения составляют 17,83 и 0,03 % соответственно.

Согласно ГОСТ 32144-2013 все коэффициенты гармонических составляющих напряжения не выходят за границы нормируемых значений. 11-я гармоника тока превышает установленное ГОСТ 30804.3.2-2013 максимально допустимое значение для этой гармонической составляющей. Эксперимент проводился при подключении в сеть одного светильника, поэтому искажения формы кривой напряжения незначительные. При подключении большего числа таких светильников искажения показателей качества электроэнергии будут более существенными, поэтому может возникнуть необходимость применить фильтры гармоник, чтобы улучшить качество электроэнергии.

#### Литература

1. Анализ влияния светодиодного освещения на показатели качества электрической сети / В. П. Кузьменко, С. В. Солёный, В. Ф. Шишлаков [и др.] // АгроЭкоИнженерия. – 2019. – № 2 (99). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-svetodiodnogo-osvescheni-ya-na-pokazateli-kachestva-elektricheskoi-seti> (дата обращения: 20.09.2024).

УДК 629.735-519:621.315.1(476.2)

### **ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИИ ГОМЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

**С. Г. Жуковец, А. А. Белаш**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*На примере Гомельских электрических сетей рассмотрим применение беспилотных летательных аппаратов для диагностирования оборудования подстанции.*

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, подстанция, компьютерный анализ.

### **THE USE OF UAVS FOR EQUIPMENT DIAGNOSTICS SUBSTATIONS OF GOMEL ELECTRIC NETWORKS**

**S. G. Zhukovets, A. A. Belash**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Using the example of Gomel electric networks, let's consider the use of UAVs for diagnosing substation equipment.*

**Keywords:** UAVs, substation, computer analysis.

Подстанции служат источником угрозы поражения высоким напряжением. При осмотре и диагностике оборудования риск поражения человека электрическим током возрастает в разы. Благодаря современным технологиям этот риск может быть уменьшен за счет использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

БПЛА могут обеспечить безопасные и эффективные проверки оборудования, а также качественный сбор данных для работников подстанций и предприятий, работающих не только в альтернативной, но и в традиционной энергетике.

В использовании БПЛА для визуального осмотра и наблюдения за оборудованием подстанции (ПС) выделяют следующие преимущества:

– *оперативность*. БПЛА позволяет проводить регулярные осмотры контролируемого оборудования подстанции с установленной скоростью или в режиме зависания на маршрутной точке. Это обеспечивает заметный выигрыш в скорости проведения осмотра в сравнении с традиционным способом обследования с земли;

– *качество осмотра*. Высокое разрешение получаемых материалов с камер БПЛА позволяет объективно распознать показатели контролируемых элементов и произвести осмотр общего технического состояния оборудования с детальной точностью;

– *безопасность*. Использование БПЛА вместо персонала снижает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) и несчастных случаев. К управлению промышленными дронами и созданию полетного задания в программном обеспечении допускаются обученные операторы ПС;

– *автоматизация маршрутов*. Созданное и сохраненное полетное задание в ПО с возможностью осуществления фото и тепловизионной съемки в контрольных точках с геопривязкой фактически исключает необходимость использования «полевого» персонала для проведения наземного обследования периметра ПС;

– *объективность*. Исключение роли человеческого фактора. За счет получаемых результатов осмотра в виде фото и видеоматериалов на электронном носителе снижается риск допущения ошибки, приводящей к технологическим нарушениям в работе;

– *инновационное решение*. Высокоточный БПЛА, работающий в автоматическом режиме с передовым программным обеспечением (ПО) анализа и мониторинга оборудования подстанции – это инновация в мире автоматизированных систем [1].

Технологии, внедряемые вместе с БПЛА, позволят получать максимально точные данные для принятия оперативных решений, направленные на снижение финансовых затрат, связанных с техническим обслуживанием, проверкой и ремонтом дорогостоящего оборудования.

Для работы БПЛА с целью регулярного мониторинга объекта без участия человека необходима полностью автоматизированная станция базирования беспилотного летательного аппарата на подстанции. Назначение данной станции:

- хранение БПЛА и поддержание необходимой температуры в зоне хранения;
- замена и зарядка аккумуляторов БПЛА;
- скачивания данных с БПЛА;
- загрузка нового/скорректированного полетного задания.

В Гомельских электрических сетях для осмотра оборудования подстанции при помощи БПЛА используются два основных метода: тепловой и компьютерный анализ.

Компьютерный анализ используется для:

– оцифровки показаний стрелочных либо цифровых измерительных приборов, индикаторов цвета, жидкостных уровней, состояния элементов оборудования по снимкам, сделанным видеокамерами (рис. 1);

– снимки циферблатов стрелочных и цифровых приборов преобразуют в показания приборов в соответствующих единицах измерения;

– снимки индикаторов уровня жидкости преобразуют в относительное значение показания уровня жидкости так, что диапазон цифровых значений находится в промежутке от 0 до 1;

– осмотра состояния элементов оборудования, на примере подстанции «Фестивальная» (рис. 2).



Рис. 1. Фотосъемка показаний стрелочного прибора



Рис. 2. Фотосъемка оборудования подстанции «Фестивальная»

Тепловой анализ используется для определения критических температур элементов оборудования ПС.

В ходе этого анализа снимаются термограммы либо всех элементов подстанции, либо отдельного оборудования (рис. 3). Это позволяет проанализировать температуру нужного оборудования и, исходя из этого, принимать решения по его обслуживанию.



Рис. 3. Тепловое сканирование трансформатора подстанции «Фестивальная»

Таким образом, технология БПЛА является перспективным и развивающимся направлением, позволяющим сетевым предприятиям в значительной степени повысить качество и эффективность планирования работ и надежность электроснабжения потребителей.

#### Литература

1. Программно-технический комплекс визуального осмотра оборудования подстанции с помощью дрона (БПЛА) – URL: <https://www.bo-energo.ru/equipment/ptk-vizualnogo-osmotra-i-nablyudeniya-za-sostoyaniem-oborudovaniya-podstantsii-/programmno-tekhnicheskiy-kompleks-vizualnogo-osmotra-oborudovaniya-podstantsii-s-pomoshchyu-bpla/> (дата обращения: 18.09.2024).

УДК 621.314.572

### ПАРАМЕТРЫ ВХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ И РАБОТЕ СВАРОЧНОГО ИНВЕРТОРА SOLARIS MMA-208

О. Г. Широков, Т. В. Алферова, М. А. Вегера

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

*Представлены длительности этапов включения сварочного инвертора Solaris MMA-208, а также показатели несинусоидальности входных напряжений и токов при его включении и работе от электрической сети напряжением 220 В.*

**Ключевые слова:** сварочный инвертор, показатели несинусоидальности электрической энергии, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

### ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF WELDING INVERTERS ON INDICATORS NON-SINUSOIDALITY OF SUPPLY VOLTAGE

O. G. Shirokov, T. V. Alfyorova, M. A. Vegera

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The results of a study of the influence of welding inverters on the non-sinusoidal characteristics of the supply voltage are presented. The values of non-sinusoidal voltage indicators when powering a separate welding inverter when operating from a 220 V electrical network were determined experimentally.*

**Keywords:** welding inverter, indicators of quality of electrical energy, total coefficient of harmonic components of voltage.

Современные сварочные инверторы обладают рядом преимуществ перед сварочными традиционными аппаратами: высокая эффективность, компактность, форсирование сварочной дуги, антизалипание электрода и т. д. Однако не смотря на применение входных помехоподавляющих фильтров, их использование может приводить к искажению синусоидальности напряжения питающей электрической сети. Поэтому оценка параметров входных напряжения и тока при включении и работе сварочных инверторов является актуальной.

Целью работы является оценка параметров входных напряжения и тока при включении и работе сварочного инвертора Solaris MMA-208.

Выполненная цифровая регистрация питающих напряжений и токов при различных режимах работы сварочного инвертора Solaris MMA-208 позволила визуализировать и определить некоторые их параметры.

- Включение сварочного аппарата марки Solaris MMA-208 происходит в 2 этапа:
- 1 этап включение вентилятора охлаждения;
  - 2 этап включение инвертора.

Полная длительность включения сварочного аппарата Solaris MMA-208 составила 880 мс. В момент включения вентилятора охлаждения появляется пусковой ток, длительность которого до установившегося режима составляет 280 мс. Через 840 мс от момента включения сварочного аппарата Solaris MMA-208 начинается пуск инвертора, который длится 40 мс. Пуск и работа двигателя вентилятора охлаждения приводит к искажению формы кривой тока, что представлено на рис. 1.

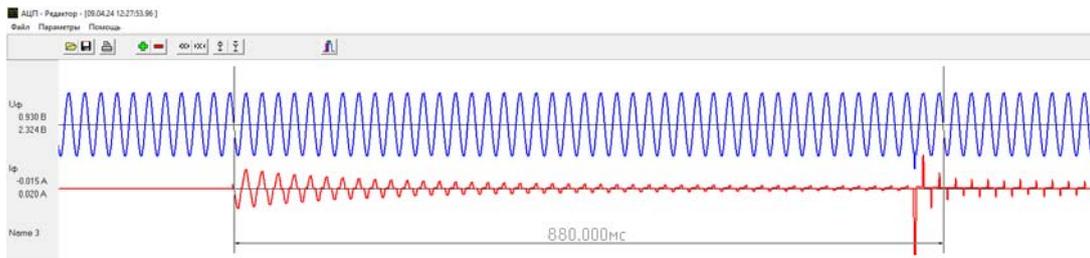


Рис. 1. Оциллограмма тока и напряжения при включении сварочного аппарата Solaris MMA-208

На рис. 2 представлены коэффициенты гармонических составляющих напряжения при включении сварочного аппарата Solaris MMA-208. Из рис. 2 видно, что имеются не характерные ранее четные гармонические составляющие напряжения, наибольшее значение имеет  $K_{2U} = 0,027 \%$ . Преобладающим является коэффициент третьей гармонической составляющей напряжения  $K_{3U} = 0,044 \%$ . При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения невелик  $K_U = 0,05 \%$ . Суммарный же коэффициент гармонических составляющих тока  $THD_I = 6,61 \%$ .

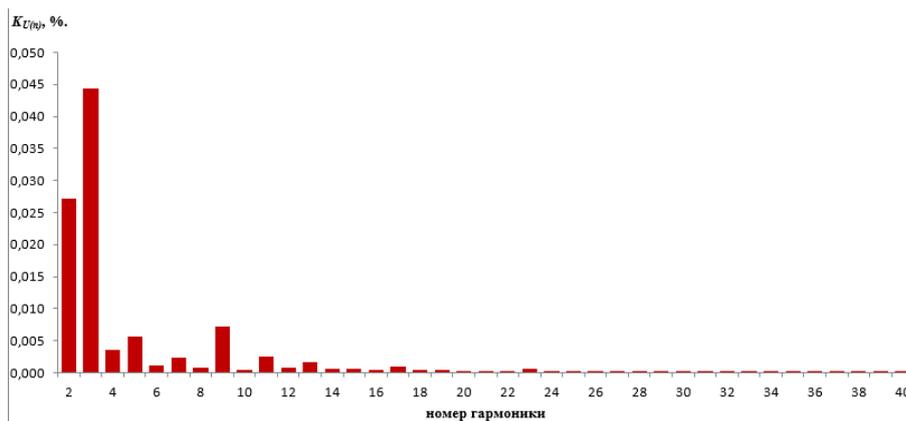


Рис. 2. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения при включении сварочного аппарата Solaris MMA-208

На рис. 3 представлена оциллограмма тока и напряжения при зажигании электрода сварочного аппарата Solaris MMA-208, время зажигания электрода составило примерно 60 мс. При зажигании электрода в аппарате выполняется функция «горячий старт».

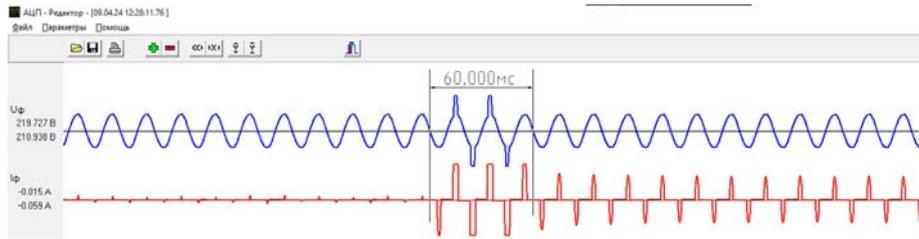


Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения при зажигании электрода сварочного аппарата Solaris MMA-208

На рис. 4 представлена осциллограмма тока и напряжения при реализации функции «форсирование сварочной дуги» сварочного аппарата Solaris MMA-208. Эта функция увеличивает значение тока по отношению к установленному на сварочном аппарате и поддерживает сварочную дугу. Работа «форсирование сварочной дуги» схожа с работой «горячего старта», отличие лишь в том, что функция «форсирование сварочной дуги» срабатывает, когда есть риск разрыва дуги, а «горячий старт» срабатывает в момент касания электродом металла.

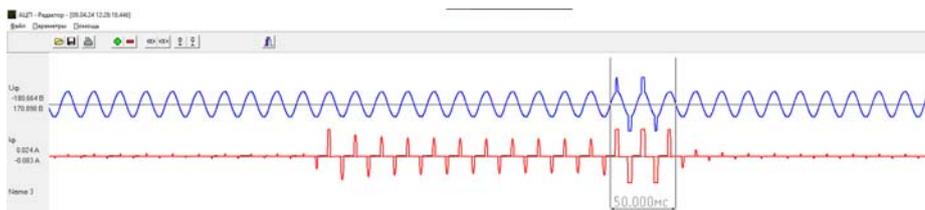


Рис. 4. Осциллограмма тока и напряжения при реализации функции «форсирование сварочной дуги» сварочного аппарата Solaris MMA-208

На рис. 5 представлены коэффициенты гармонических составляющих питающего напряжения при работе сварочного аппарата Solaris MMA-208. Наибольшее значение имеют коэффициенты третьей и пятой гармонической составляющей напряжения –  $K_{3U} = 2,19 \%$ ,  $K_{5U} = 1,126 \%$ . Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения составляет  $K_U = 2,48 \%$ , что не превышает 8 % нормируемых ГОСТ 32144-2013 для сетей с номинальным напряжением 380 В. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока в режиме работы сварочного аппарата Solaris MMA-208 составляет  $THD_I = 54,47 \%$ .

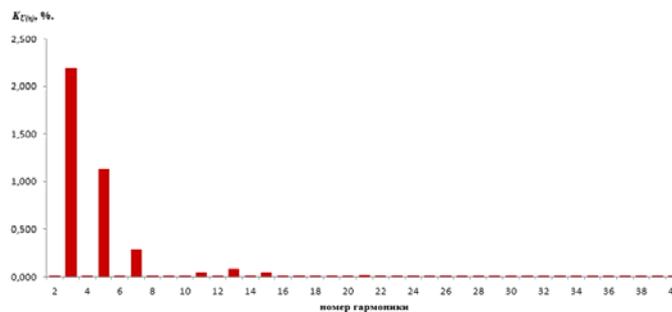


Рис. 5. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения при работе сварочного аппарата Solaris MMA-208

Обработка регистрограмм, питающих напряжений и токов при различных режимах работы сварочного инвертора Solaris MMA-208 показала, что процесс его включения и работа на холостом ходу оказывает незначительное влияние на форму кривой напряжения ( $K_U = 0,05 \%$ ), однако приводит к появлению не характерных ранее четных гармонических составляющих напряжения. Влияние рабочего режима сварочного аппарата Solaris MMA-208 на форму кривой напряжения более существенно, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения составляет  $K_U = 2,48 \%$ , и хоть не превышает  $8 \%$  нормируемых ГОСТ 32144-2013 для сетей с номинальным напряжением 380 В, но при увеличении количества подобных устройств в узле питания может привести к превышению установленной нормы.

#### Литература

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN\_50160:2010, NEQ) : ГОСТ 32144-2013. – Минск : Госстандарт, 2015. – 16 с.

УДК 536.24

### ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО РОДА

А. В. Овсянник

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрена задача гидродинамики и теплообмена ламинарно стекающей пленки жидкости по вертикальной теплоотводящей поверхности. При этом определяются поля скоростей и температур при граничных условиях первого рода на внешней границе слоя жидкости. Получены уравнения для расчета толщины ламинарно стекающего слоя под действием гравитационных сил и коэффициента теплоотдачи.*

**Ключевые слова:** конденсация, пленка конденсата, коэффициент теплоотдачи, гравитационное течение, ламинарный режим, температурное поле, поле скоростей.

### HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN FLOW OF A LIQUID FILM OVER A VERTICAL SURFACE UNDER BOUNDARY CONDITIONS OF THE FIRST KIND

A. V. Ovsyannik

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The problem of hydrodynamics and heat exchange of a laminarly flowing liquid film over a vertical heat-removing surface is considered. In this case, the velocity and temperature fields are determined under boundary conditions of the first kind on the outer boundary of the liquid layer. Equations are obtained for calculating the thickness of the laminarly flowing layer under the action of gravitational forces and the heat transfer coefficient.*

**Keywords:** condensation, condensate film, heat transfer coefficient, gravity flow, laminar regime, temperature field, velocity field.

Задача определения гидродинамики, теплообмена и параметров движущегося слоя жидкости по вертикальной поверхности ставилась исследователями давно и решалась относительно успешно в зависимости от различных факторов, влияющих на течение слоя жидкости.

Однако при расчете толщины гравитационно стекающего слоя жидкости по вертикальной поверхности при конденсации чистых хладагентов возможен иной подход к образованию и гидродинамике гравитационно стекающего слоя конденсата. Как отмечается в [1] систематизированные данные для маловязких жидкостей при их течении по поверхностям сложной геометрии и поверхностям, имеющих различную ориентацию в пространстве, отсутствуют, либо крайне ограничены. Знание закономерностей гидродинамикотечения пленок жидкостей и их теплообмена с поверхностью, знание влияния ориентации поверхности на формирование слоя жидкости и его толщину крайне необходимо для разработки методов повышения эффективности и улучшения технических характеристик оборудования современных холодильных установок, низкотемпературных тепловых насосов, тепловых труб и т. д.

В [1] отмечается, что для построения безразмерных комплексов, характеризующих гравитационное течение пленки на гладких поверхностях, в качестве масштабов толщины слоя жидкости и скорости используются, как правило, расчетные значения в соответствии с ламинарной теорией Нуссельта. Уравнение для определения толщины слоя служит для оценки средней толщины ламинарно текущей пленки, а уравнение для локальной скорости служит для определения зависимости скорости от координаты в поперечном сечении пленки жидкости.

Значительную роль при рассмотрении вопросов гидродинамики и теплообмена стекающей пленки жидкости по вертикальным поверхностям играет определение режимов течения [2–4]. Для коротких вертикальных поверхностей течение пленки жидкости будет ламинарным и ламинарно-волновое движение не успеет развиваться из-за короткой длины пробега, следовательно, режим течения пленки – число Рейнольдса – будет гораздо меньше критического, и гидродинамика и теплообмен в пленке будут определяться гравитационными силами и будут зависеть от числа Грасгофа и Прандтля.

**Решение поставленной задачи и полученные результаты.** На основании изложенного будем полагать, что на вертикальной или наклонной продольно ребренной трубе осуществляется конденсация неподвижного пара. Поверхность ребер составляет основную площадь поверхности теплообмена конденсирующегося пара, а межреберные каналы служат не только для конденсации пара, но и для отвода образующейся жидкой фазы. Движение пленки конденсата по поверхности продольных ребер ламинарное или ламинарно – волновое (рис. 1) и тогда температура в движущемся слое конденсата изменяется по уравнению [6]:

$$\vartheta = \vartheta_c \left(1 - \frac{y}{2\delta}\right)^2, \quad (1)$$

где

$$\vartheta = t - t_n, \quad \vartheta_c = t_c - t_n; \quad t_c = \text{const},$$

$$t_n = \text{const} \quad (1a)$$

Граничные условия:  $\vartheta = \vartheta_c$  при  $y = 0$  и  $\vartheta = 0$  при  $y = \delta$ .

Кривые температур и скоростей представлены на рис. 2.

Коэффициент теплоотдачи движущегося слоя конденсата определяется уравнением теплоотдачи

$$\alpha_{\text{конв}} = -\frac{\lambda}{\vartheta_c} \left( \frac{d\vartheta}{dy} \right)_{y=0}. \quad (2)$$

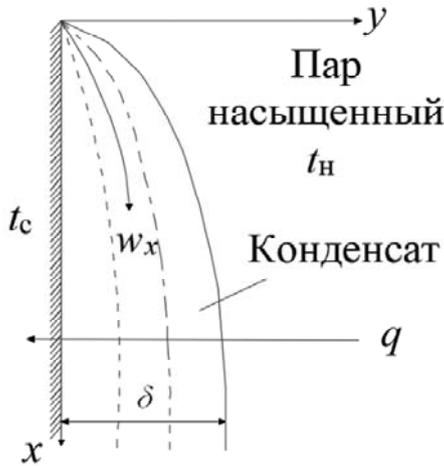


Рис. 1. Движение пленки конденсата на вертикальной поверхности

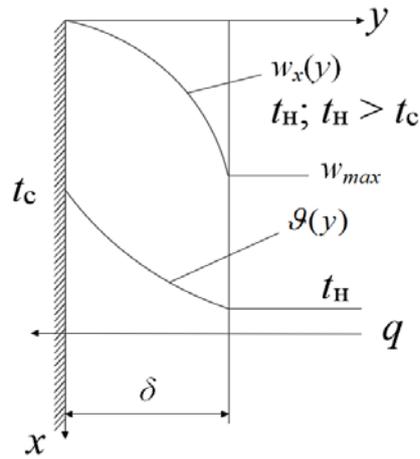


Рис. 2. Распределение температуры и скорости в пленке конденсата

$w_x, \vartheta(y)$

Из уравнения (1) следует, что

$$\frac{d\vartheta}{dy} = -\frac{2\vartheta_c}{2\delta} + \frac{2\vartheta_c}{2\delta^2} y = -\frac{2\vartheta_c}{2\delta} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)$$

$$\frac{d\vartheta}{dy}_{y=0} = -\frac{2\vartheta_c}{2\delta} = -\frac{\vartheta_c}{\delta}.$$

Подставив значение  $\left( \frac{d\vartheta_c}{dy} \right)_{y=0}$  в уравнение (2) получим [6]:

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{\lambda}{\delta}. \quad (3)$$

Толщина гравитационно движущегося слоя конденсата переменна по высоте и связана со скоростью движения для стационарного течения при условии, что движение пленки происходит только в направлении оси x и тогда уравнение движения запишется [6]:

$$\mu \left( \frac{d^2 w_x}{dy^2} \right) = -g(\rho_0 - \rho). \quad (4)$$

Так как  $\rho = \rho_0(1 - \beta\vartheta)$ , то при  $\beta = \text{const}$ :

$$\rho_0 - \rho = \rho_0 \beta \vartheta. \quad (4a)$$

Подставив значение  $\vartheta$  по формуле (1) в уравнение (4), учитывая соотношение (4a) для плотности, уравнение движения запишется [6]:

$$\left( \frac{d^2 w_x}{dy^2} \right) = - \frac{\rho_0 g \beta \vartheta_c}{\mu} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^2 \quad (46)$$

или

$$\frac{d^2 w_x}{dy^2} = -D \left( 1 - 2 \frac{y}{\delta} + \frac{y^2}{\delta^2} \right), \quad (4b)$$

где

$$D = \frac{\rho_0 g \beta \vartheta_c}{\mu}.$$

Распределение скоростей согласно уравнению (5) представлено на рис. 2. Максимум скорости соответствует значению

$$y = \delta; \quad w_x = w_{\max}. \quad (5)$$

В результате решения поставленной задачи толщина слоя конденсата, гравитационно стекающего по вертикальной поверхности при ламинарном или ламинарно-волновом течении будет:

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{40 \mu \lambda x}{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c}} = 2,5 \sqrt[4]{\frac{\mu \lambda x}{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c}}. \quad (6)$$

По уравнению (6) определяются локальные значения  $\delta$ . Средние значения толщины пленки могут быть определены при  $x = l$ .

Коэффициент теплоотдачи при конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности при ламинарном и ламинарно-волновом движении пленки конденсата будет:

$$\alpha_{\text{конв}} = 0,40 \sqrt[4]{\frac{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c \lambda^3}{\mu x}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) в безразмерной форме:

$$\text{Nu}_x = \frac{\alpha_{\text{конв}} x}{\lambda} = 0,40 \sqrt[4]{\frac{g \beta \vartheta_c x^3 \mu c_p}{(\mu^2 / \rho^2) \lambda}} = 0,40 (\text{Gr}_x \text{Pr})^{0,25}, \quad (8)$$

где

$$\text{Gr}_x = \frac{g \beta \vartheta_c x^3}{\nu^2} \text{ и } \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}.$$

Средний коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{4}{3} \alpha_{x=l} = \frac{4}{3} 0,40 \sqrt[4]{\frac{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c \lambda^3}{\mu l}} = 0,533 \sqrt[4]{\frac{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c \lambda^3}{\mu l}}, \quad (9)$$

где  $\alpha_{x=l}$  – местный коэффициент теплоотдачи в точке, определяемой координатой  $x = l$ .

Средняя теплоотдача вертикальной стенки для  $t_c = \text{const}$  при ламинарном и ламинарно волновом гравитационном течении пленки конденсата в критериальной форме будет:

$$\text{Nu}_l = 0,533 (\text{Gr}_l \text{Pr})^{0,25}. \quad (10)$$

В результате решения задачи гидродинамики и теплообмена гравитационно стекающей пленки конденсата по вертикальной поверхности при ламинарном и ламинарно волновом режиме течения при конденсации неподвижного пара получены уравнения для определения локальных и средних по высоте стенки толщины пленки конденсата и конвективных коэффициентов теплоотдачи.

#### Литература

1. Павленко, А. Н. Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении / А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, О. А. Володин. – Изд-во Сибир. отделения Российской академии наук. – Новосибирск, 2016. – 190 с.
2. Гогонин, И. И. Теплообмен при кипении жидкости в пленке, движущейся под действием силы тяжести / И. И. Гогонин // ИФЖ. – 2010. – № 4. – С. 821–826.
3. Гимбутис, Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости / Г. Гимбутис. – Вильнюс : Москлас, 1988. – 232 с.
4. Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films / S. Ishigai, S. Nakanisi, T. Koizumi, Z. Oyabi // Bull. JSME. – 1972. – Vol. 15, N 83. – P. 594.
5. Ягов, В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях / В. В. Ягов. – Москва : МЭИ, 2014. – 542 с.
6. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел – Москва : Энергоиздат, 1981. – 415 с.
7. Лабунцов, Д. А. Механика двухфазных систем / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов – Москва : МЭИ, 2007. – 384 с.

УДК 658.261:620.97

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИГЕНЕРАЦИОННЫХ ТУРБОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛ

А. В. Овсянник, В. П. Ключинский

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Представлена классификация агрегатов для синтеза полигенерационных установок, структура математической модели их расчета, а также технико-экономические показатели полигенерационных установок (установок, позволяющих получать элеткрическую энергию, теплоту, холод и диоксид углерода).*

**Ключевые слова:** полигенерация, производство диоксида углерода, утилизация низкопотенциальной теплоты.

## MODELING AND OPTIMIZATION OF MULTIGENERATIONAL TURBINE INSTALLATIONS BASED ON LOW-BOILING WORKING FLUIDS

A. V. Ovsyannik, V. P. Klyuchinsky

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The paper presents the classification of aggregates for the synthesis of polygeneration plants, the structure of the mathematical model of their calculation, as well as the technical and economic indicators of polygeneration plants (installations allowing to obtain electric energy, heat, cold and carbon dioxide).*

**Keywords:** polygeneration, carbon dioxide production, utilization of low-potential heat.

В последнее время учеными уделяется большое внимание полигенерации [1–3]. Такого рода установки имеют как энергетические, так и экономические преимущества. Одной из разновидностей полигенерационных установок могут служить установки, которые позволяют одновременно получать электрическую, тепловую энергию, холод и диоксид углерода. Таким образом, целью работы является создание, расчет и анализ полигенерационных установок. Создание таких схем полигенерации производилось путем синтеза агрегатов представленных в табл. 1.

*Таблица 1*

### Классификация агрегатов для синтеза схем полигенерации

Ресурсы		
Природный газ	Тепловые ВЭР	Топлива с низкой теплотворной способностью
Установка для преобразования энергетических ресурсов		
Газотурбинная установка	Котел-утилизатор	Котлоагрегат
Установка с низкопотенциальным подводом теплоты для получения электрической энергии (турбоустановка)		
На насыщенном паре	На перегретом паре	С промежуточным перегревом
Установка для преобразования материальных потоков/ получения холода		
Парокомпрессионная холодильная установка	Установка по производству углекислоты и холода	

Для проведения термодинамического анализа разработана математическая модель полигенерационных турбоустановок [3]. Структура математической модели полигенерационной установки представлена на рис. 1.

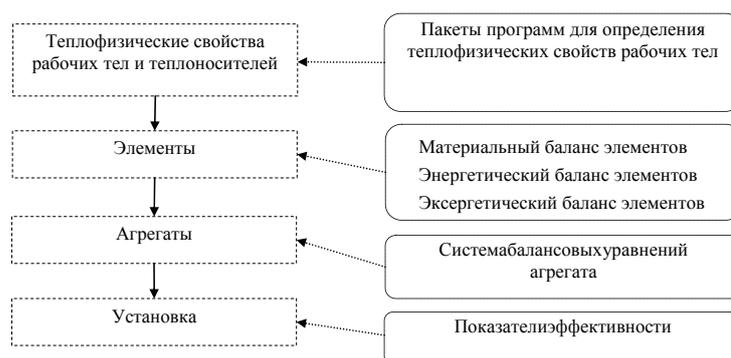


Рис. 1. Структура математической модели полигенерационной установки

Таблица 2

## Результаты расчета полигенерационных установок

Показатель	Рабочее тело									
	R744			R410A			R600A		R718	
	Сбк	Свк	С пп	Сбк	Свк	С пп	Сбк	Свк	С пп	Сбк
Отпуск электрической энергии, ГВт · ч/год	1,0	10,4	11,8	8,6	12,3	13,7	12,2	14,1	15,1	11,3
Отпуск тепловой энергии МВт · ч/год	7372	7372	7372	7372	7372	7372	7372	7372	7372	7372
Отпуск холод (+4 °С) МВт · ч/год	1489	1489	1489	1489	1489	1489	1489	1489	1489	1489
Отпуск холод (–18 °С) МВт · ч/год	2234	2234	2234	2234	2234	2234	2234	2234	2234	2234
Отпуск жидкой CO <sub>2</sub> , т/год	1415	1415	1415	1415	1415	1415	1415	1415	1415	1415
Отпуск газообр. CO <sub>2</sub> , т/год	2830	2830	2830	2830	2830	2830	2830	2830	2830	2830
Экономия, тыс. руб./год	2491	5202	5607	4668	5735	6141	5735	6247	6546	5458
Стоимость полигенерационной установки, руб.	2370	7765	8617	6162	6888	7553	7900	8253	8787	7236
Эксплуатационные расходы, тыс. руб./год	213	699	776	555	620	680	711	743	791	651
Затраты на топливо, тыс. руб./год	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625
Простой (статический) срок окупаемости, лет	3,6	2,7	2,7	2,5	2,0	2,0	2,3	2,1	2,1	2,3
Внутренняя норма доходности, %	27,3	37,0	37,1	40,3	50,7	50,8	43,0	47,0	47,1	43,9
Динамический срок окупаемости, лет	5,7	3,7	3,7	3,3	2,5	2,5	3,1	2,8	2,8	3,0
Чистый дисконтированный доход, млн руб.	1,72	10,2	11,5	9,4	14,9	16,5	13,4	16,0	17,1	12,7

На основании разработанной математической модели произведен эксергетический и технико-экономический анализ полигенерационных установок с котлоагрегатом. В качестве рабочих тел рассматривались углекислота (R744), изобутан (R600A), R410A и вода. (R718). В табл. 2 представлены результаты расчета наиболее привлекательных из синтезированных схем полигенерации со следующими сокращения: Сбк – ТУ с субкритическими параметрами НКРТ; Свк – ТУ со сверхкритическими термодинамически оптимальными параметрами НКРТ; Спп – ТУ с промежуточным перегревом рабочего тела.

Предложенные в работе полигенерационные установки позволяют одновременно получать электрическую энергию, теплоту, холод и диоксид углерода в жидком и газообразном виде, что влечет следующие преимущества:

1. Универсальность и эффективность за счет возможности утилизации низкопотенциальных энергетических ресурсов.

2. Снижение выбросов диоксида углерода, за счет его абсорбции из продуктов сгорания и использования для технологических (на промышленных предприятиях) или коммерческих нужд.

3. Хорошие технико-экономические показатели (статический срок окупаемости не превышает 4 лет, внутренняя норма доходности варьируется от 27,3 до 50,8 % и др.).

#### Литература

1. Клименко, А. В. Особенности комбинированного производства электроэнергии тепла и холода на базе парогазовой установки / А. В. Клименко [ и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 11–15.
2. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.
3. Патент 2530971 RU, МПК F01K 23/06. Тригенерационная установка с использованием парогазового цикла для производства электроэнергии и пароконпрессорного теплонасосного цикла для производства тепла и холода / Агабабов В. С [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт». – № 2013137038/06 ; заявлено 08.08.2013 ; опубл. 20.10.2014.
4. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.

УДК 628.1

### **СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОДОИСТОЧНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА ГОМЕЛЯ**

**Е. Н. Макеева, К. А. Агунович**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Изучен химический состав воды артезианских скважин из межпластовых водных слоев, используемых для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Гомеля. Проведена оценка качества проб воды из скважин глубиной 100, 140 и 290 м. Выявлена зависимость показателей качества воды от глубины водоносного пласта. Определено повышенное содержание общего железа и величины мутности в двух пробах воды подземных*

горизонтов на территории г. Гомеля. Дана сравнительная характеристика качества воды подземных водоисточников по основным показателям для анализа возможного использования воды из скважин в качестве тела цикла ТЭЦ.

**Ключевые слова:** артезианская скважина, подземный водоисточник, показатель качества, анализ воды, водоподготовительная установка, хозяйственно-питьевое водоснабжение.

## COMPOSITION OF UNDERGROUND WATER SOURCES USED FOR CENTRALIZED DOMESTIC DRINKING WATER SUPPLY GOMEL

E. N. Makeeva, K. A. Agunovich

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*This work is devoted to the study of the chemical composition of water from artesian wells from interstratal water layers used for centralized domestic and drinking water supply in Gomel. The quality of water samples from wells 100, 140 and 290 m deep was assessed. The dependence of water quality indicators on the depth of the aquifer was revealed. The increased content of total iron and turbidity values in two samples of groundwater in the territory of Gomel were determined. A comparative characteristic of the quality of water from underground water sources is given by the main indicators for the analysis of the possible use of water from wells as a body of the HPC cycle.*

**Keywords:** artesian well, underground water source, quality indicator, water analysis, water treatment plant, domestic and drinking water supply.

Подземные воды – это расположенные под земной поверхностью в верхней части земной коры водяные ресурсы, занимающие пустоты в геологических пластах и почвах.

Классификация подземных вод по условиям залегания:

- зоны аэрации;
- грунтовые воды;
- межпластовые (артезианские) воды.

В состав первой зоны залегания подземных вод входят почвенные, капиллярные воды и верховодка. В состав второй зоны входят грунтовые воды. Межпластовые воды находятся в водоносных горизонтах перекрытых и подстилаемых водупорными пластами и в свою очередь деляться на напорные (артезианские) и безнапорные [1, 2].

Целью работы являлась оценка состава подземных водоисточников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Гомеля в зависимости от глубины водоносного пласта.

Для достижения данной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- провести лабораторные исследования по санитарно-химическим показателям отобранных проб воды из водозаборов системы централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Гомеля;
- сравнить полученные результаты с нормами СанПиН 2.1.4.12-23-2006 (требования систем питьевого водоснабжения к качеству воды) и нормами качества воды для теплосилового цикла ТЭЦ;
- определить зависимость состава подземных водоисточников и показателей качества воды от глубины водоносного пласта.

Подземные источники г. Гомеля представляют собой огромную сеть, включающую 108 артезианских скважин. Они расположены в разных районах города, обеспечивая равномерное водоснабжение. Из артезианских скважин вода поступает на 5 водозаборов, где ее очищают от примесей и подготавливают к подаче в городскую систему: Центральный, Корневский, Юго-Западный, Сож, Ипуть. Вода, добытая из подземных источников, может содержать избыточное количество железа. Чтобы сделать ее безопасной для питья, на водозаборах работают станции обезжелезивания, которые удаляют лишнее железо. Чтобы обеспечить бесперебойное водоснабжение города даже в случае аварий или пиковых нагрузок, используются запасно-регулирующие резервуары, обеспечивающие стратегический запас воды для города. Чтобы вода дошла до каждого дома, ее необходимо поднять на определенную высоту. В этом помогают станции 2-го подъема, которые перекачивают воду из резервуаров в городскую сеть [3].

Из системы централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения отобрано 3 пробы непосредственно из водозабора глубиной 100, 140 и 290 м. Были определены следующие показатели: pH, щелочность, жесткость, общее железо, общее солесодержание, хлориды, мутность (см. таблицу).

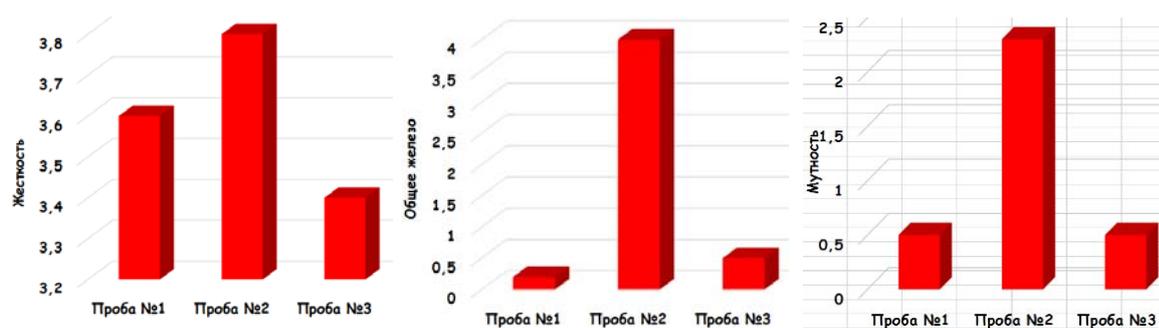


Рис. 1. Основные химические показатели отобранных проб воды

Установлены факты несоответствия 2 отобранных проб по химическим показателям, одна из которых не соответствовала по содержанию железа, а вторая – железа и мутности при требованиях по содержанию железа не более 0,3 мг/дм<sup>3</sup> и мутности не более 1,5 мг/дм<sup>3</sup> (см. таблицу).

#### Сравнение полученных результатов с нормами СанПиН

Показатель	Проба № 1	Проба № 2	Проба № 3	СанПиН 2.1.4.12-23-2006
РН	7	7	7	6–9
Железо общее (мг/л)	0,2	4	0,5	0,3
Щелочность (мг-экв/л)	6,1	5,6	5	6,5
Содержание хлоридов (мг/л)	1,2	3,8	1,2	350
Общее солесодержание (мг/л)	5,57	5,58	5,56	1000–1500
Жесткость (мг-экв/л)	3,6	3,8	3,4	7
Мутность (мг/л)	0,2	2,3	0,2	1,5

Несоответствие воды в точках водозабора может быть обусловлено состоянием сетей водоснабжения, требуется промывка водопроводных сетей, кроме того, в данный горизонт попадает вода из верховодки.

Проведена оценка качества проб воды из артезианских скважин глубиной 100, 140 и 290 м. Определено повышенное содержание общего железа и величины мутности в двух пробах воды подземных горизонтов на территории г. Гомеля. Дана сравнительная характеристика качества воды подземных водоисточников по основным показателям для анализа возможного использования воды из скважин в качестве тела цикла ТЭЦ.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ищук, А. В. Характеристика подземных вод / А. В. Ищук, А. Н. Садиров // Научное сообщество студентов : материалы VII Междунар. студен. науч.-практ. конф. – Чебоксары : ЧГУ. – 2016. – С. 15–18.
2. Корнев, А. Н. Проблемы загрязнения подземных вод Российской Федерацией / А. Н. Корнев, Л. А. Морозова // Естественные науки: актуальные вопросы и социальные вызовы : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Астрахань : АГУ, 2020. – С. 197–199.
3. Макеева, Е. Н. Анализ показателей качества артезианской воды в зависимости от глубины водоносного пласта / Е. Н. Макеева, К. А. Агунович // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 3. – С. 45–52.

УДК 536.24

### **ВЫБОР ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ЗАМКНУТЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ СИСТЕМ**

**Н. М. Кидун, Т. Н. Никулина, П. С. Колмачева, А. В. Таран**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Произведен расчет показателя качества FOM, для выбранных R134a, R410a и R407c. Экспериментально определена зависимость термического сопротивления от подводимой тепловой нагрузки термосифона для выбранных теплоносителей. Выявлены наиболее значимые свойства теплоносителей, влияющие на процесс теплообмена в замкнутых двухфазных теплопередающих системах.*

**Ключевые слова:** теплоноситель, теплофизические свойства, показатель качества FOM, термосифон.

### **CHOICE OF COOLANT FOR CLOSED TWO-PHASE HEAT TRANSFER SYSTEMS**

**N. M. Kidun, T. N. Nikulina, P. S. Kolmacheva, A. V. Taran**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The calculation of the FOM quality index was performed for the selected R134a, R410a and R407c. The dependence of the thermal resistance on the supplied thermal load of the thermosiphon for the selected heat carriers has been experimentally determined. The most significant properties of heat carriers affecting the heat transfer process in closed two-phase heat transfer systems have been identified.*

**Keywords:** coolant, thermophysical properties, figure of merit, thermosyphon.

Применение замкнутых двухфазных теплопередающих систем в системах охлаждения теплонапряженного оборудования [1–3] является актуальным направлением, так как двухфазные термосифоны достаточно просты по своей конструкции, надежны и автономны.

Предметом исследования является модель термосифона, разработанная на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология».

Объектом исследования является процесс теплообмена в термосифоне.

Целью работы является выбор наилучшего теплоносителя для двухфазных теплопередающих устройств расчетным методом и экспериментальное исследование процесса теплообмена в термосифоне, заправленном различными теплоносителями.

В качестве низкотемпературных теплоносителей можно использовать спирты, эфиры, фреоны. На сегодняшний день насчитываются десятки видов фреонов, но в промышленности используют несколько – R134a, R404a, R410a и R407c.

Теплопередающая способность термосифона зависит от теплопроводности, теплоемкости, скрытой теплоты парообразования, вязкости, поверхностного натяжения теплоносителя.

Расчет показателя качества FOM (figure of merit) авторами [1, 4] предлагается для выбора оптимального теплоносителя для различных установок:

$$FOM = (r\lambda_1^3\rho_1^2\mu_1^{-1})^{0.25}, \quad (1)$$

где  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $\rho_1$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_1$  – динамический коэффициент вязкости, Па · с.

Расчет, произведенный по (1) на основании данных, представленных в табл. 1 показал, что оптимальным теплоносителем является фреон R410a (рис. 1).

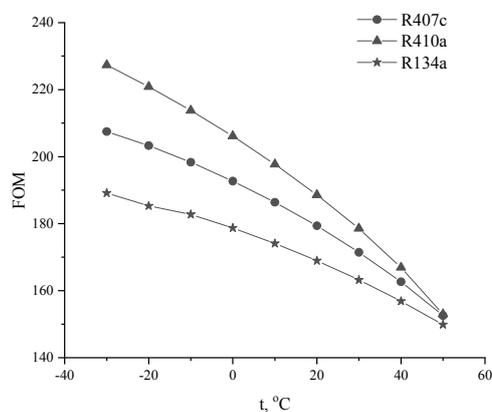


Рис. 1. Расчет FOM для выбранных теплоносителей

**Экспериментальное исследование процесса теплообмена.** Работа замкнутого двухфазного теплопередающего устройства подразумевает наличие фазовых переходов – испарение и конденсация. При определении FOM учитываются только теплофизические свойства теплоносителя в состоянии жидкости, что в полной мере не учитывает особенностей работы термосифона.

Для подтверждения результатов (рис. 1) и возможности их применения на практике, в рамках данной работы было проведено экспериментальное исследование работы термосифона, заправленного различными теплоносителями.

Методика проведения экспериментов изложена в [5, 6]. Условия проводимых экспериментов: теплоноситель – R134a, R410a, R407c; объем заправки – 500 мл; угол наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости – 0°, 90°; подводимая тепловая нагрузка к испарителю: 0–128 Вт;

Следует отметить, что наиболее значимой характеристикой работы термосифона является его термическое сопротивление. Термическое сопротивление  $R$ , Вт/°С·м<sup>2</sup> определяется по формуле

$$R = \frac{t_n - t_k}{q}, \frac{^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2}{\text{Вт}}, \quad (2)$$

где  $q$  – тепловый поток, отнесенный к единице площади поверхности, Вт/°С·м<sup>2</sup>;  $t_n$  – температура в начале исследуемого участка термосифона, °С;  $t_k$  – температура в конце исследуемого участка термосифона, °С.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

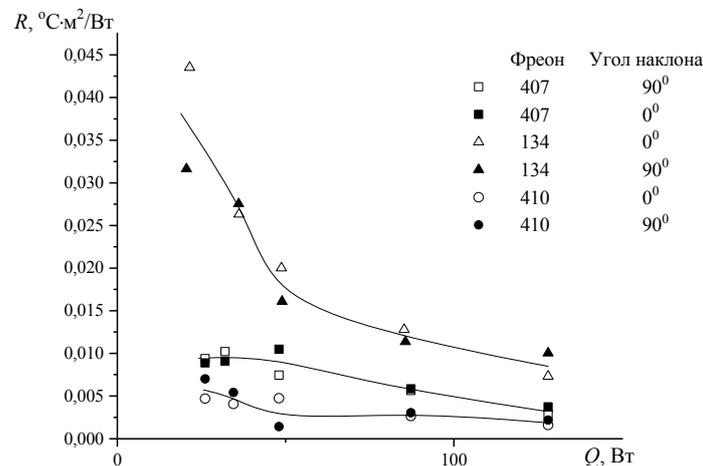


Рис. 2. Зависимость термического сопротивления от подводимого теплового потока

Результаты расчета и экспериментальные данные совпадают, что позволяет сделать заключение о возможности использования показателя качества FOM для выбора теплоносителя для замкнутых двухфазных теплопередающих систем.

Установлено, что при выборе теплоносителя для замкнутых двухфазных теплопередающих систем необходимо отдавать предпочтение теплоносителям с большей теплотой парообразования и теплоемкостью и меньшей плотностью и динамической вязкостью. Рабочий интервал температур должен соответствовать средней части указанного диапазона.

По результатам данной работы в качестве низкотемпературного теплоносителя для экспериментальных исследований выбран озонобезопасный фреон R410a.

#### Литература

1. Heat Pipes: Theory, Design and Applications / Н. Jouhara, D. Reay, R. McGlen [et al.]. – Butterworth Heinemann, Oxford, 7th Edition, 2023, 352 p.
2. Автономные устройства с испарительно-конденсационным циклом для терморегулирования теплонагруженной аппаратуры / Л. Л. Васильев, А. С. Журавлев, М. А. Кузьмич

[и др.]. – Elektronnaya Obrabotka Materialov, EOM. – 2024. – Vol. 60, N 1. – P. 89–97. –DOI 10.52577/eom.2024.60.1.089

3. Chilbule, P. V. Heat pipe integrated solar thermal systems and applications: A review / P. V. Chilbule, L. P. Dhole // *Materials Today: Proceedings*. – Vol. 60, N 3. – 2022, P. 1491–1496.
4. Faghri, A. *Heat Pipe Science and Technology* / A. Faghri. – Global Digital Press, Second Edition, 2016. – 1056 p.
5. Шаповалов, А. В. Результаты экспериментального исследования пародинамического термосифона / А. В. Шаповалов, А. В. Родин, Р. Н. Жихарев // *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого*. – 2015. – № 3. – С. 58–64.
6. Результаты экспериментального исследования теплообмена в термосифонном элементе с оребренной поверхностью конденсатора при изменении условий расположения элемента в пространстве / А. В. Шаповалов, Т. Н. Никулина, Н. М. Кидун, В. В. Чернявская // *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого*. – 2022. – № 4. – С. 73–77.

## СЕКЦИЯ 6. ГЕОЛОГИЯ И РАЗРАБОТКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

---

УДК 551.24,551.243,550.342

### ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОРАЗРАБОТКИ

**О. К. Абрамович**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Раскрыто, что геодинамические исследования территорий со значительными техногенными нагрузками позволяют выделить пространственно-временную структуру блочного строения земной коры, выявить активные разломы и тектонически напряженные зоны и определить параметры деформационных процессов. Отмечено, что расчет индуцированных напряжений, возникающих под воздействием техногенного воздействия на земную кору дает возможность разработать профилактические меры для обеспечения безопасности и эффективности освоения и эксплуатации недр и земной поверхности одновременно.*

**Ключевые слова:** недрa, геодинамика, супердеформационные процессы, активные разломы, аномальная активность, нефтяные месторождения, напряженное состояние, порода.

### GEODYNAMIC STUDIES OF OIL AND GAS DEVELOPMENT SITES

**O. K. Abramovich**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Geodynamic studies of areas with significant technogenic loads make it possible to identify the spatio-temporal structure of the block structure of the earth's crust, identify active faults and tectonically stressed zones and determine the parameters of deformation processes. The calculation of induced stresses arising under the influence of technogenic impact on the earth's crust makes it possible to develop preventive measures to ensure the safety and efficiency of the development and operation of the subsoil and the earth's surface simultaneously.*

**Keywords:** subsoil, geodynamics, super-deformation processes, active faults, anomalous activity, oil fields, stress state, rock.

В недрах Земли происходит постоянное силовое и химическое взаимодействие пород под воздействием ряда внутренних и внешних факторов. Сложность строения земной коры и многообразие литологических разностей пород не позволяют выработать строгую теорию происходящих изменений, поскольку невозможно учесть энергообмен пород, газа и воды, находящихся в активной блочной структуре земной коры. В массиве горных пород есть особо опасные зоны, которые обладают определенными свойствами, отличными от свойств соседних зон, – это зоны повышенного напряжения, в которых реализуются геодинамические процессы. В районах объектов нефтегазозаботки повышается интенсивность техногенного воздействия на горный массив, зависящая от отношения глубины распространения зоны предельно напряженного состояния к толщине литосферы. Наличие фактического материала о состоянии недр до начала разработки нефтяного месторождения не позволяет спрогнозировать процесс формирования тектонически напряженных зон. Необходимый набор информации по-

является лишь в процессе разработки нефтяных месторождений при получении комплексной информации, например, изменения пластового давления. Однако и в этом случае возможен только обобщенный подход, который должен базироваться на раскрытии закономерностей распределения напряженного состояния в земной коре с учетом усредненных физико-механических и химико-биологических свойств массива горных пород и его температуры при условии, что массив рассматривается в качестве сплошной среды. Нефтяные месторождения территориально приурочены к разломным зонам в фундаменте, являющимся зонами повышенной геодинамической опасности, перерастающей в геодинамический риск при значительной внешней нагрузке и внутренней неустойчивости. Возможно возникновение супердеформационных процессов со скоростями более  $10^{-5}$  в год.

Инструментальные геодезические как наземные, так и спутниковые и дистанционные наблюдения позволяют получить надежные количественные характеристики современных короткопериодических деформаций на активно эксплуатируемых территориях и установить локализацию разломных зон. Периоды аномальной активности разломов чередуются с периодами их стабилизации, поэтому при определении длительности безопасного функционирования объекта необходимо учитывать это обстоятельство. Выбор интервала инструментальных наблюдений возможен опытным путем, но в любом случае он должен быть в пределах года. Припятский прогиб и сопредельные территории разработки нефтяных месторождений в течение 20 лет представляли собой геодинамический полигон с плотной сетью и обширной программой наблюдений. За это время собран большой объем информации, позволяющей получить уверенную статистику по количественной оценке вертикальных движений земной коры, которую возможно пополнять и в настоящее время. Если сопоставить графики, полученные по результатам повторного высокоточного нивелирования, выполненного на территории нефтяных месторождений Припятского прогиба, со структурными картами на ту же территорию, то можно отметить четкую закономерность морфологии аномалий в зонах над разрывными нарушениями.

На Речицком месторождении были выделены три типа аномалий с высокой степенью корреляции с тектоническими нарушениями:

–  $\gamma$ -аномалии, устойчиво характеризующиеся пикообразным опусканием земной поверхности в очень узкой по ширине зоне, до 1,5 км, с амплитудой в интервале 10–40 мм. Время формирования таких аномалий – около нескольких месяцев. Устойчивость морфологических параметров свидетельствует о едином механизме процессов, формирующем эти аномалии в зонах разломов;

–  $\beta$ -аномалии, для которых характерен изгиб земной поверхности. Наиболее устойчивой характеристикой этого типа аномалий является амплитуда движений в осевой части аномалии – 10–18 мм. Ширина аномалий варьирует более значительно (6–20 км). Время формирования этого типа аномалий примерно соответствует времени формирования  $\gamma$ -аномалий;

–  $S$ -аномалии, что характеризуются градиентным изменением значений движений. Он также формируется в разломных зонах. Наиболее устойчивой характеристикой является ширина аномалии – около 5 км, амплитуда аномалии меняется в пределах 5–20 мм. Может возникнуть конфигурация, сочетающая два или все три типа описанных аномалий (рис. 1), что свидетельствует о сложном характере аномального изменения современных вертикальных движений земной поверхности. Интерпретация такого варианта требует обязательного учета структурного плана.

Конфигурации сетей на геодинамических полигонах, приуроченных к нефтяным месторождениям, зависят от задач, поставленных при их проектировании. Для создания деформационной сети выполняется закладка реперов, можно также прикрепить марку к неработающей скважине. Точность наблюдений независимо от методов должна соответствовать точности I, II класса геометрического нивелирования.

При проектировании нивелирных сетей на техногенных полигонах расстояние между границей месторождения и реперами, считаемыми неподвижными, следует принимать равным 8-кратной глубине нижнего эксплуатируемого горизонта, но во всех случаях не менее 6 км.

При построении графиков по результатам инструментальных наблюдений за деформациями земной коры на горизонтальной оси отмечается местоположение реперов исследуемого участка, а по вертикальной – величины анализируемых параметров деформации. Если работают с параметром  $V_i$  – вертикальной скоростью, то вычисленные значения приписывают реперу ( $i$ ); если с параметром  $\text{grad}V_{i,i+1}$  – участку трассы между реперами ( $i$ ) и ( $i + 1$ ). Основным фактором, определяющим уровень формирования обширных просадок земной поверхности территории месторождения, является величина деформации порового объема пласта-коллектора. Для оценки максимальной, предельно возможной величины вертикальных смещений земной поверхности можно предположить, что все изменения порового объема происходят за счет деформации породы в вертикальном направлении.

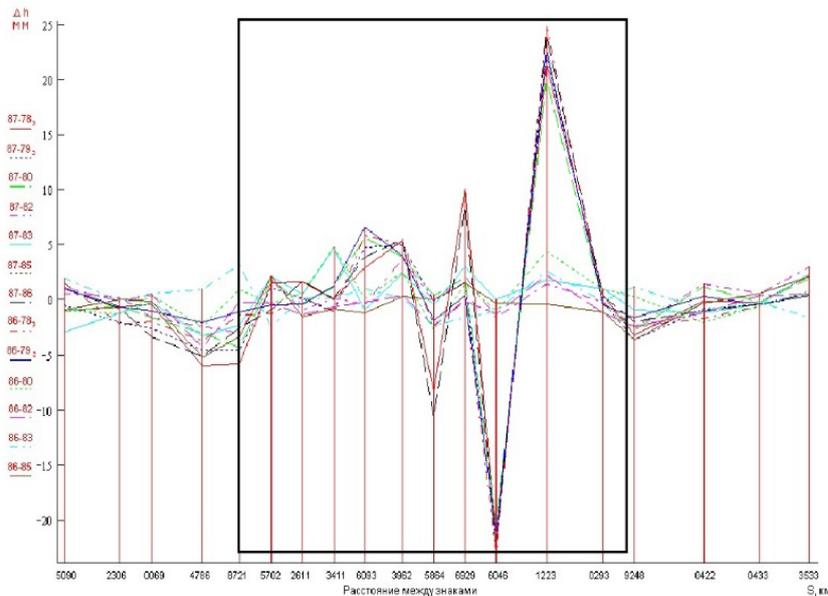


Рис. 1. Речицкое месторождение. Аномальная зона по линии Тишковка – Волчья Гора

В этом случае будет справедлива следующая формула:

$$\Delta h = mH\beta_{\text{пор}}\Delta P,$$

где  $m$  – пористость;  $H$  – эффективная толщина нефтенасыщенности;  $\beta_{\text{пор}}$  – коэффициент сжимаемости порового пространства;  $\Delta P$  – изменение пластового давления в процессе разработки.

В качестве исходного материала для оценки деформаций земной поверхности возможно использовать вертикальные геологические разрезы и структурные карты по каждому продуктивному пласту, сводный геолого-геофизический разрез, стратиграфическую колонку, данные о физико-механических свойствах горных пород, данные геодинамических исследований. Основным методом интерпретации геодинамических наблюдений является решение обратных задач – установление глубинного источника аномальных движений по данным измерений на земной поверхности.

В результате интерпретации динамических исследований зоны Речицкого разлома установлено, что по морфологии построенные по полевым данным кривые похожи и представляют собой локальные изгибы вниз земной поверхности. Максимумы кривых соответствуют проекции разломов на земную поверхность. Сложность кривой вертикальных смещений соответствует сложности тектонического строения локальной зоны.

Аномалии выявляются только в разломных зонах широтной и квазиширотной ориентации, в зонах разломов квазимеридиональной ориентировки они отсутствуют [1].

Определение деформаций земной поверхности при добыче нефти вызвано необходимостью предотвращения риска функционирования технических сооружений государственного значения.

#### Литература

1. Кузьмин, Ю. О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике / Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 51–64.

УДК 662.276

## **ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОФИЛЕЙ СКВАЖИН С ПРОТЯЖЕННЫМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ОКОНЧАНИЕМ**

**Д. И. Байковский**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**А. М. Жуковский, Р. Е. Гутман**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

*Учитывая значительное увеличение объемов горизонтального бурения и существенную стоимость строительства скважин с протяженным горизонтальным окончанием, а также текущую технико-технологическую оснащенность и экономически эффективные методы и технологии освоения, необходима разработка нового подхода к проектированию профилей таких скважин для каждого конкретного месторождения и поставленных задач. Это позволит выбрать наиболее оптимальные параметры траектории и как следствие – обеспечить наиболее эффективную геометрию ствола скважины. Выделено, что такая геометрия в отличие от типовых траекторий дает возможность уменьшить силы сопротивления, оптимизирует процесс бурения, сократит риски возникновения технологических проблем, улучшит показатели разработки горизонтальных скважин и в целом создаст положительный экономический эффект.*

**Ключевые слова:** трудноизвлекаемые запасы, горизонтальное бурение, новый подход, проектирование профилей, траектория.

## OPTIMIZED APPROACH TO DESIGNING WELL PROFILES WITH AN EXTENDED HORIZONTAL END

D. I. Baikovsky

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

A. M. Zhukovsky, R. E. Gutman

*BelNIPIneft RUF "Production Association "Belorusneft", Gomel*

*Considering the significant increase in horizontal drilling volumes and the significant cost of constructing such wells, as well as the current technical and technological equipment and cost-effective methods and technologies for development, it is necessary to develop a new approach to designing well profiles with an extended horizontal end, for each specific field and the tasks set, allowing you to select the most optimal trajectory parameters and, as a result, ensure the most effective wellbore geometry. Such geometry, in contrast to typical trajectories, will reduce resistance forces, optimize the drilling process, reduce the risks of technological problems, improve the development indicators of horizontal wells and, in general, provide a positive economic effect.*

**Keywords:** hard-to-recover reserves, horizontal drilling, design of profiles, trajectory.

К траекториям скважин с протяженным горизонтальным окончанием (ПГО) предъявляются определенные требования и ограничения. Как считают авторы, конфигурация плановой траектории скважин с ПГО должна не только удовлетворять всем этим требованиям и ограничениям, но и обеспечивать наикратчайший путь в первую проектную точку. К основным параметрам, определяющим конфигурацию траектории, можно отнести: глубину отклонения от вертикали, интенсивность набора и значение предельных зенитных углов (ЗУ) ствола скважины в интервале установки и работы внутрискважинного оборудования. Авторами выделены два параметра в траектории, где изменение установленных пределов и ограничений позволит оптимизировать типовой профиль скважин с ПГО и, как следствие, увеличит эффективность таких скважин, – это глубина отклонения от вертикали и предельные ЗУ по надсолевым отложениям. На текущий момент времени в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» при проектировании профилей горизонтальных скважин отклонение от вертикали по надсолевой толще используется в исключительных случаях, а предел ЗУ по этим отложениям установлен в 15°.

Цель работы – оптимизация плановой траектории скважин с ПГО для повышения рентабельности разработки трудноизвлекаемых запасов (ТриЗ) елецко-петриковского возраста на месторождениях Припятского прогиба.

**Методология.** Для определения граничной глубины отклонения от вертикали и предельного ЗУ по надсолевым отложениям проведен ряд методологических и аналитических исследований на основе реализации следующих основных этапов:

- геомеханическое моделирование;
- анализ результатов бурения скважин Речицкого месторождения нефти;
- анализ сил сопротивления возникающий при движении гибкой насосно-компрессорной трубы (ГНКТ) и компоновки низа буровой колонны (КНБК) с винтовым забойным двигателем (ВЗД) в скважине при помощи специализированного программного обеспечения;
- влияние параметров траектории на динамику изменения осевой нагрузки;
- разработка проектных профилей скважин с протяженным горизонтальным окончанием и оптимальными параметрами траектории, обеспечивающих уменьшение сил сопротивления движению КНБК и ГНКТ.

**Критерии новизны.** По результатам выполнения работы для Речицкого нефтяного месторождения были определены:

1. Новые предельные ЗУ при направленном бурении по надсолевым отложениям с учетом азимута бурения и установившихся параметров бурового раствора, применяемого при бурении надсолевой толщи. Предел в  $30^\circ$  может быть достигнут в I–III четверти (по направлению минимального горизонтального напряжения), а  $20^\circ$  – II–IV четверти;

2. Граничная глубина отклонения от вертикали – в 400 м.

С учетом соляно-купольной тектоники Речицкого месторождения и в зависимости от технологической и экономической эффективности включения набора зенитного угла по надсолевым отложениям, а также на основании новых ограничений предложен комплексный подход для проектирования профилей скважин с протяженным горизонтальным окончанием. Такой подход позволяет определять эффективность отклонения от вертикали в надсолевых отложениях и производить выбор наиболее оптимальных параметров траектории для этих отложений.

**Практическая ценность.** В отличие от текущего подхода к проектированию профилей скважин с ПГО при оптимизированном подходе (с учетом обновленных требований и ограничений по предельному зенитному углу для надсолевых отложений и граничной глубины отклонения от вертикали) мы получим ряд положительных эффектов, которые позволят увеличить рентабельность разработки ТриЗ, сосредоточенных в нетрадиционных низкопроницаемых коллекторах елецко-петриковского возраста:

1. Меньшую силу сопротивления, что, в свою очередь, обеспечит увеличение глубины бурения КНБК с ВЗД нагрузкой 120 кН и увеличение глубины продвижений ГНКТ.

2. Сокращение общей протяженности скважины при такой же эффективной длине, либо увеличение эффективной длины при такой же общей протяженности.

3. В частных случаях – сокращение интервальности траектории.

4. Предпочтительный азимут бурения для надсолевых отложений с точки зрения стабильности и устойчивости стенок скважины.

5. Более уверенное разведение стволов на малых глубинах при эшелонном бурении.

6. Четкие критерии включения набора угловых параметров по надсолевой толще.

7. Алгоритм определения наиболее эффективного зенитного угла для надсолевых отложений.

В настоящее время предлагаемый подход использовался при проектировании проектных профилей скважин с ПГО на I–III пачках Речицкого месторождения (скважины № 477, 478, 479, 711).

*Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела строительства скважин (ОСС) БелНИПИнефть за выполнение расчетов по оценке возможности строительства скважины, а также сотрудникам цеха по повышению нефтеотдачи пластов (ПНП) Управления по повышению нефтеотдачи пластов и ремонту скважин (УПНПиРС) за выполнение расчетов по доведению необходимой осевой нагрузки на разрушающий инструмент ГНКТ  $\varnothing 50,8 \times 4$  мм в 3 кН для фрезерования последней композитной пакер-пробки, спускаемой в скважину при освоении МГРП по технологии Plug&Perf в обсадную колонну  $\varnothing 140$  мм.*

УДК 550.8.028

**ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ  
СЕМИЛУКСКОЙ КАРБОНАТНОЙ ЗАЛЕЖИ  
РЕЧИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**А. С. Емельяничков, И. В. Лымарь, Е. Н. Ходьков, А. А. Цагельник**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Посвящена изучению петрофизических свойств сложнопостроенных карбонатных пород-коллекторов по материалам комплексных лабораторных исследований в атмосферных условиях на цилиндрических образцах керна разного геометрического объема – стандартных и полноразмерных. Представлены методика отбора образцов и анализ полученных результатов, предложены наиболее подходящие методы исследования сложнопостроенных пород-коллекторов.*

**Ключевые слова:** петрофизические свойства, горные породы, лабораторные исследования, пористость, абсолютная проницаемость.

**PECULIARITIES OF THE STUDY OF PETROPHYSICAL  
PROPERTIES OF COMPLEXLY BUILT RESERVOIR ROCKS  
OF THE SEMILUK CARBONATE DEPOSIT  
OF THE RECHITSA FIELD**

**A. S. Emelyanchikov, I. V. Lyamar, E. N. Khodkov, A. A. Cagelnik**

*BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*The work is dedicated to the study of petrophysical properties of complexly structured carbonate reservoir rocks based on materials from comprehensive laboratory investigations conducted under atmospheric conditions on cylindrical core samples of varying geometric volumes – standard and full-sized. The methodology for sample selection and analysis of the obtained results are presented, along with the proposed most suitable methods for investigating complexly structured reservoir rocks.*

**Keywords:** petrophysical properties, rocks, laboratory studies, porosity, absolute permeability.

Комплексные лабораторные исследования на керновом материале – единственный прямой способ получения достоверной информации о емкостных свойствах вмещающих пород коллекторов. При проведении лабораторных испытаний на керне, отобранном из сложнопостроенных карбонатных отложений, особенно важной является оценка коллекторских свойств как в матричной, так и в каверново-трещиноватой части породы [1, 2].

При выбуривании стандартных цилиндрических образцов (30 × 40 мм) из неоднородных (каверново-порово-трещинных) участков керна часто происходит их разрушение или отбраковка из-за нарушения геометрии. В результате часть стандартных образцов отражают лишь относительно плотные участки отложений без учета всех типов неоднородностей (крупные поры, каверны, трещины), участвующих в формировании емкостного пространства сложнопостроенного коллектора. Кроме того, часто элементы емкостного пространства сложнопостроенного карбонатного коллектора могут быть сопоставимы по размеру с самими образцами, поэтому также не могут быть охарактеризованы стандартным цилиндрическим образцом. Все указанные выше факторы приводят к занижению фильтрационно-емкостных свойств пород и запасов

углеводородов. Решением указанной выше проблемы является выполнение комплекса лабораторных исследований на полноразмерных образцах керна исходного при отборе керна диаметра (но не менее 60 мм), позволяющих значительно снизить влияние масштабного фактора применительно к сложнопостроенным породам-коллекторам [3–5].

Целью работы является изучение сложнопостроенных карбонатных пород-коллекторов с применением полноразмерного керна (диаметр 80 мм) для повышения точности и достоверности петрофизических свойств на примере семилукских отложений Речицкого месторождения (скважины № 601, 337, 385).

В рамках данной тематики была разработана программа работ, включающая методику отбора разноразмерных образцов, последовательность и методы исследований. Для полного охвата и равномерности распределения петрофизических данных по разрезу из отобранного керна материала изготавливалось максимально возможное количество полноразмерных образцов диаметром 80 мм и длиной 80 мм. Их количество определялось консолидированностью и кондиционностью керна. Разметка точек выбуривания стандартных образцов проводилась непосредственно рядом с полноразмерными. Кроме того, из части изученных полноразмерных образцов выбуривалось по два стандартных образца керна параллельно напластованию. Всего было исследовано 166 полноразмерных и 205 стандартных образцов керна.

Комплексные базовые лабораторные исследования включали в себя определение литолого-минералогического состава, пористости (методами жидкостенасыщения и газоволюметрии) и абсолютной проницаемости по газу.

По данным определения минерального состава методом XRD (230 обр.) породы являются мономинеральными – содержание доломита в среднем составляет 97–99 %. Преобладающие некарбонатные минералы: ангидрит (0,5–1 %), кварц (0,5–0,7 %), галит (0,2–0,3 %). В единичных случаях (пятнистых включениях, участках кристаллизации, тонких прослоях) имеют высокое их содержание.

Выполнено сопоставление петрофизических параметров стандартных (30 мм) и полноразмерных (80 мм) образцов, по результатам проведенных экспериментальных исследований в атмосферных условиях, а также методик их определения:

1. Средняя открытая пористость, определенная газоволюметрическим методом, для стандартных образцов составляет 9,5 %, полноразмерных – 11,4 %, разница – 1,9 % (на 20 %) (см. таблицу).

#### Результаты определения пористости различными методами

Тип образцов	Метод исследования	Скважина 601	Скважина 337	Скважина 385	Среднее значение
Стандартные образцы	Жидкостенасыщение	5,45	9,67	7,37	7,32
	Газоволюметрический	7,0	11,56	10,44	9,51
Полноразмерные образцы	Жидкостенасыщение	6,55	11,23	8,82	9,0
	Газоволюметрический	8,09	12,83	12,63	11,37

2. Открытая пористость, определенная газоволюметрическим методом, отличается большими значениями по сравнению с методом жидкостенасыщения и эта разница увеличивается с ростом пористости и кавернозности образцов (рис. 1). Данные отличия объясняются методологическими особенностями определения – при исследовании кавернозных пород методом жидкостенасыщения флюид еще до взвешивания вытекает из керна под действием собственного веса, тем самым занижая порис-

тость. Кроме того, результаты определения пористости газоволюметрическим методом, полученные на полноразмерных образцах, в сравнении со стандартными образцами обладают большей корреляционной связью с данными ГИС [5].

3. Результаты по определению абсолютной проницаемости представлены на рис. 2 в виде гистограмм распределения частотности. По скважинам 337 и 385 можно выделить следующие закономерности: 1) в диапазоне от 1 до 100 мД – значения абсолютной проницаемости полноразмерных образцов относительно стандартных смещены вправо, в сторону большего значения данного показателя; 2) стандартные образцы в диапазоне низкой проницаемости (0–1 мД) и относительно высокой (более 100 мД) встречаются чаще чем полноразмерные, что объясняется методикой отбора стандартных образцов и масштабными эффектами.

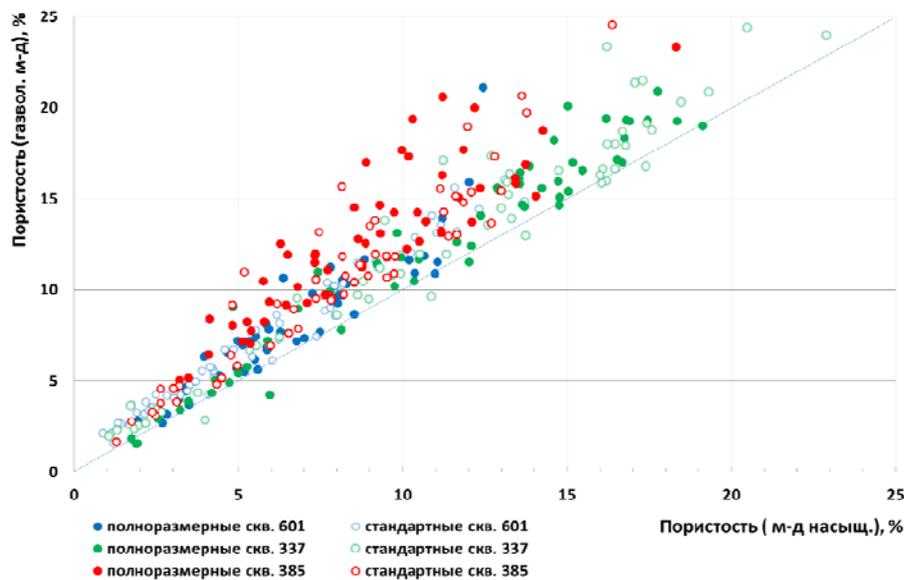


Рис. 1. Зависимость открытой пористости, определенной газоволюметрическим методом и методом жидкостенасыщения

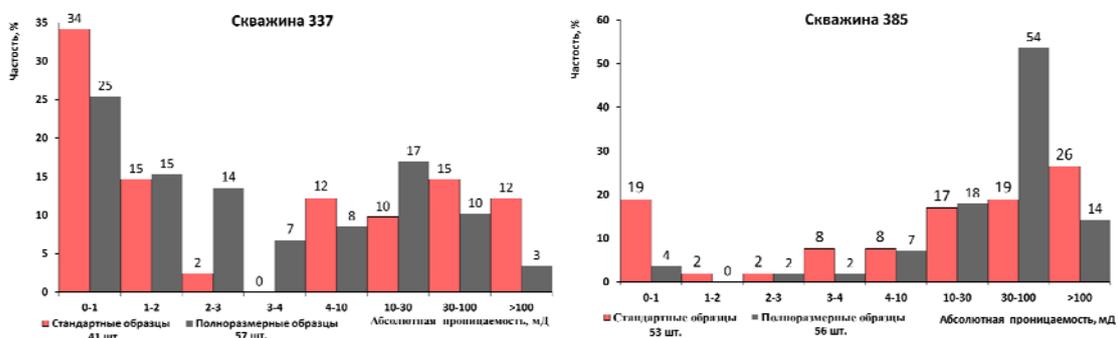


Рис. 2. Статистический ряд распределения по абсолютной проницаемости образцов ядерного материала из скважин Речицкого месторождения

4. Сопоставление значений пористости и проницаемости указывает на отсутствие зависимостей, но значения по полноразмерным образцам сгруппированы пре-

имущественно в относительно ограниченном поле, тогда как стандартные образцы имеют существенный разброс значений ФЕС (рис. 3).

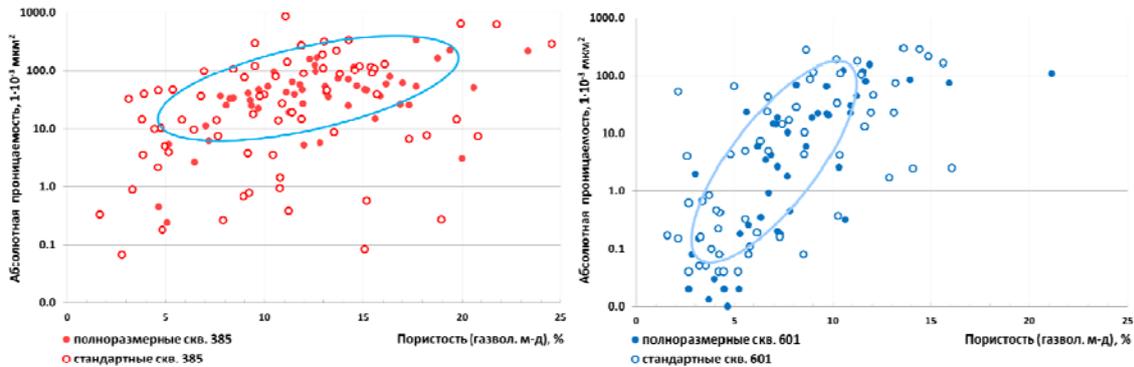


Рис. 3. Зависимость абсолютной проницаемости от пористости стандартных и полноразмерных образцов

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что для наиболее полного и качественного изучения залежей с каверново-порово-трещинным типом коллектора необходимо проводить стандартные петрофизические исследования на полноразмерных цилиндрических образцах.

Разработанные и опробованные методики комплексных лабораторных исследований на стандартных и полноразмерных образцах керна успешно реализованы и в дальнейшем могут применяться на подобных отложениях других месторождений.

#### Л и т е р а т у р а

1. Гурбатова, И. П. Особенности изучения петрофизических и упругих свойств керна в сложнопостроенных коллекторах нефти и газа при моделировании термобарических пластовых условий / И. П. Гурбатова, С. В. Мелехин, А. В. Юрьев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 5. – С. 67–72.
2. Костин, Н. Г. Влияние размеров исследуемых образцов керна на величину коэффициента пористости карбонатных и терригенных коллекторов / Н. Г. Костин, М. Г. Губайдуллин // Геологические опасности : материалы XV Всерос. конф. с междунар. участием / РАН, УрО, Арханг. науч. центр, Ин-т экол. проблем Севера [и др.]. – Архангельск, 2009. – С. 248–250.
3. Путилов, И. С. Эпоха полноразмерного керна при лабораторных исследованиях технологий повышения нефтеотдачи пластов / И. С. Путилов, П. Н. Рехачев, И. П. Гурбатова [и др.] // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 19, № 19. – С. 155–164.
4. Гурбатова, И. П. Влияние структуры порового пространства на масштабный эффект при изучении фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов / И. П. Гурбатова, В. А. Кузьмин, Н. Н. Михайлов // Геология нефти и газа. – 2011. – № 2. – С. 74–82.
5. Изучение фильтрационно-емкостных свойств сложнопостроенных пород-коллекторов семилукской карбонатной залежи на полноразмерном керне Речицкого месторождения / А. С. Емельяничков, И. В. Лымарь, Е. Н. Ходьков, А. А. Цагельник // Тенденции и проблемы развития наук о земле в современном мире : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 25–26 апр. 2024 г. / Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2024. – С. 62–67.

УДК 622.276.6

## ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ВЫНОСА ПРОППАНТА ИЗ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА, ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ПЛАСТОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТОВ

А. В. Минаков, А. Ю. Кравченко, Я. А. Майлат, С. Н. Воробьева

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

*Рассмотрена методика расчета оптимального дебита скважины после проведения гидроразрыва пластов для учета негативного влияния выноса проппанта из трещин гидроразрыва. Проведена оценка достоверности предложенной методики, а также промоделировано влияние расклинивающих агентов различной проницаемости на эффективность освоения скважины.*

**Ключевые слова:** ГРП, вынос проппанта, гидродинамическая модель, трещина ГРП, расклинивающий агент, критический дебит.

## ASSESSMENT OF PROPPANT REMOVAL CONDITIONS FROM HYDRAULIC FRACTURING CRACKS, ITS IMPACT ON FORMATION PRODUCTIVITY AND FRACTURING EFFICIENCY

A. Minakov, A. Kravchenko, Y. Majlat, S. Vorobyova

*BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*The paper examines a method for calculating the optimal flow rate of a well after hydraulic fracturing to take into account the negative impact of proppant removal from hydraulic fractures, assesses the reliability of the proposed method, and models the impact of proppant agents of varying permeability on the efficiency of well development.*

**Keywords:** hydraulic fracturing, proppant removal, hydrodynamic model, hydraulic fracturing crack, proppant, critical flow rate.

Среди факторов, снижающих эффективность гидроразрыва пластов (ГРП), наибольшей проблемой, приводящей к снижению их продуктивности, является вынос проппанта из трещины [1]. После выноса проппанта трещина теряет способность поддерживать необходимую проводимость, что приводит к уменьшению продуктивности пласта. Помимо этого незакрепленные частицы расклинивающего материала, поступая с добываемым флюидом в скважину, могут привести к повреждению насосного оборудования. На текущий момент не существует принятой рабочей методики, которая бы позволила описать процесс взаимодействия частиц расклинивающего агента с трещиной в пластовых условиях, а состояние агента в пласте за пределами ствола скважины имеет неопределенности, которые невозможно определить при лабораторных испытаниях. Ежегодно РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» увеличивает количество проводимых ГРП и их стадийность, что указывает на необходимость создания аналитической модели выноса проппанта.

На первом этапе наших исследований были проанализированы зарубежные работы по анализу и расчету выноса проппанта в эксплуатирующихся после ГРП скважинах. Были выделены 3 основные методики: модель Уэджа, модель Кэнона [2] и модель В. А. Васильева [3], однако в связи с высокой неопределенностью закладываемых параметров модели Кэнона и Уэджа после апробирования далее не использовались. Модель В. А. Васильева основывается на теории псевдосжижения сыпучих материалов и используется для описания процесса пескования скважин, эксплуатирующих слабосцементированные пласты [3].

Условие выноса проппанта из трещины гидроразрыва определяется критическим дебитом пластовой жидкости при ее фильтрации. Когда фактический дебит жидкости превышает критическое значение, начинается вынос проппанта из трещины.

Критический дебит рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{крит}} = \frac{K_{\alpha} g (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ф}}) K_{\text{проп}} G_{\text{пр}} n_{\text{тр}}}{\mu_{\text{ж}} l_{\text{тр}} \rho_{\text{нас}}}, \quad (1)$$

$K_{\alpha}$  – коэффициент упаковки проппанта;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность зерна проппанта;  $\rho_{\text{ф}}$  – плотность флюида;  $K_{\text{проп}}$  – проницаемость проппанта;  $G_{\text{пр}}$  – вес закачанного проппанта;  $n_{\text{тр}}$  – число трещин;  $\mu_{\text{ж}}$  – вязкость жидкости;  $l_{\text{тр}}$  – длина трещины;  $\rho_{\text{нас}}$  – насыпная плотность проппанта.

В результате расчетов по аналитической модели В. А. Васильева для условий месторождений Припятского прогиба построен график, описывающий закономерности изменения критического дебита скважины от изменения входных параметров (рис. 1).

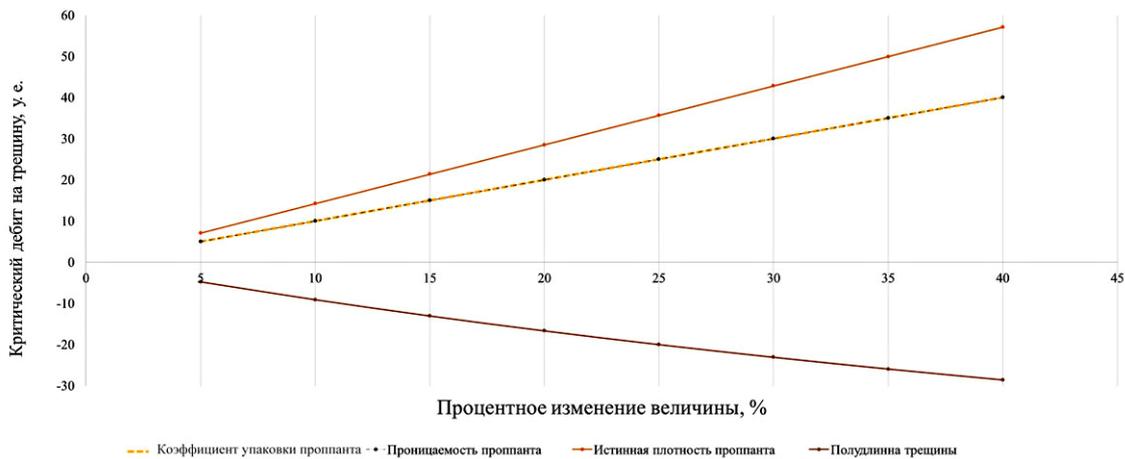


Рис. 1. График изменения критического дебита в зависимости от контролируемых параметров

К увеличению критического дебита приводят истинная плотность проппанта, коэффициент упаковки проппанта и его проницаемость (рост данных параметров ведет практически к линейному росту критического дебита). Наибольшее влияние на критический дебит скважины оказывает истинная плотность проппанта.

Методика В. А. Васильева позволяет наиболее точно рассчитать критический дебит скважины. При этом ожидаемый дебит после проведения многостадийного ГРП разделяется равными долями между всеми трещинами. Для учета геометрической неоднородности трещин используется методика предельного потенциала, на основе которой рассчитывается проводимость системы «матрица – трещина», и это позволяет рассчитать долю участия каждой трещины в добыче пластового флюида. Сравнение фактического и критического дебита жидкости происходит по каждой трещине отдельно.

Пример практического применения методики Васильева для освоения скважины 445g Речицкая методом 27-стадийного МГРП по технологии Plug & Perf представлен на рис. 2. В соответствии с дизайн-проектом вынос проппанта следует ожидать по 1 кластеру 26 стадии (рис. 2) при превышении расчетного дебита по скважине свыше 35 м<sup>3</sup>/сут (31 т/сут) и нулевой обводненности



Рис. 2. Критический дебит жидкости по стадиям для скважины 445g Речицкая, при котором вероятен вынос проппанта

На основе проведенных расчетов по 36 скважинам, в которых проводилось ГРП в 2023–24 гг., было установлено, что модель с большой долей вероятности дает возможность предсказать вынос проппанта из скважины (рис. 3). Из рис. 3 можно заметить, что имеется большое количество скважин, по которым произошел фактический вынос проппанта. Один из возможных процессов, который привел к данному явлению, – это разрядка скважины, проводимая после ГРП [4]. Данный эффект обуславлен большой разницей значений проницаемости между пластом и проппантом, который и приводит к большому перепаду давлений «пласт – трещина».

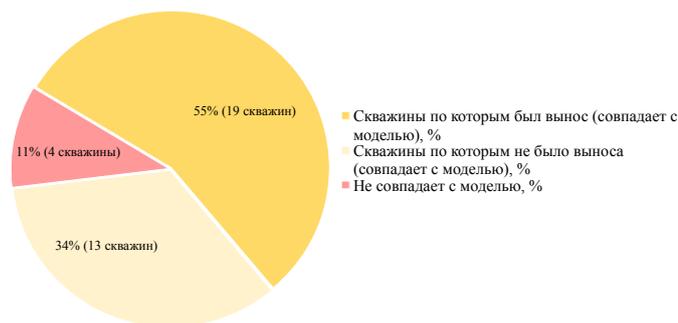


Рис. 3. Анализ совпадения модельных и фактических данных по выносу расклинивающего агента

В мировой практике при проведении ГРП в качестве замены керамического проппанта применяются природные материалы с целью снижения затрат при проведении операции. В связи с этим были проведены исследования по влиянию проницаемости различных материалов на продуктивность скважины. Для оценки этого влияния была осуществлена серия расчетов на гидродинамических моделях в симуляторе tNavigator посредством создания виртуальной трещины. За основу была принята секторная модель по скважине 57g Северо-Домановичской, в которой прово-

дился ГРП. На гидродинамической модели рассчитаны 9 вариантов с различной проницаемостью расклинивающих агентов [5], проницаемость которых составляет от 4 Д (песок ГОК Западно-Хотиславского месторождения 40/70 со степенью разрушения 70 %) до 2200 Д (пропант Carbo Pro 12/18).

По результатам расчета разница в накопленной добыче нефти за два года при использовании для ГРП расклинивающего агента с минимальной и максимальной проницаемостями составит 23 % (рис. 4). При замене керамического пропанта на песок экономическая эффективность при проведении ГРП на одну стадию составит 6000 BYN только за счет разницы стоимости материалов. Экономия на одну стадию при сравнении песка фракции 40/70 с пропанта фракции 40/70 равна 4200 BYN. Таким образом, замена расклинивающих агентов снизит накопленную добычу нефти, но с учетом заметной разницы в стоимости применение песка экономически целесообразнее.

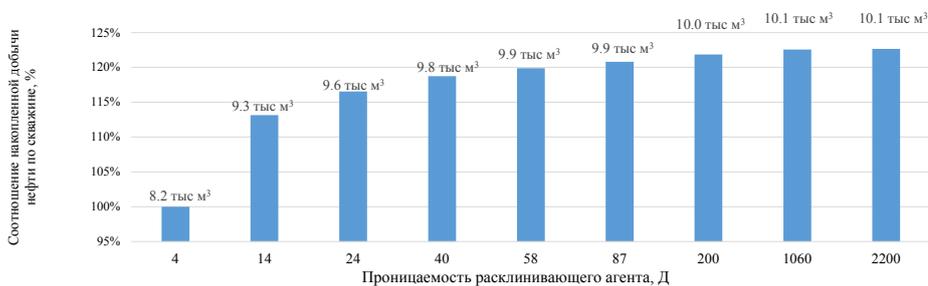


Рис. 4. Сравнение накопленной добычи нефти после гидроразрыва пластов для различных значений проницаемости пропанта

Разница в продуктивности скважины отражена на рис. 5, где представлен дебит за первый месяц эксплуатации скважин после ГРП при использовании наиболее часто применяемых расклинивающих агентов. Как видно из графика, увеличение проницаемости после значений в 30 Д приводит к росту начального дебита не более, чем на 10 %.

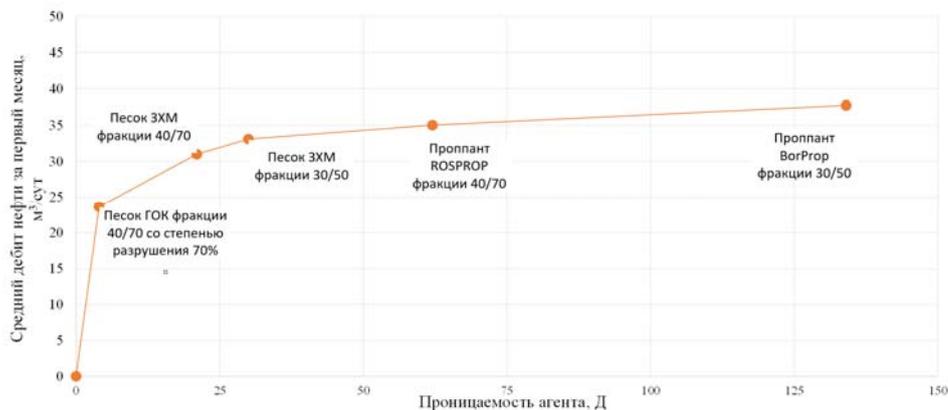


Рис. 5. Начальный дебит скважины при различной проницаемости агента

Одним из преимуществ замены пропанта на песок является значительное снижение выноса агента. Эффект достигается за счет естественного снижения проницаемости, что приводит к снижению пиковых значений дебита.

Литература

1. Бобков, Д. О. Проблемы, возникающие при проведении ГРП, и возможности их решения / Д. О. Бобков // Современные научные исследования и инновации. – 2017. – № 7. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2017/07/84111> (дата обращения: 05.10.2024).
2. Avoiding Proppant Flowback in Tight-Gas Completions with Improved Fracture Design / Javier M. Canon, Diego J. Romero, Tai T. Pham, Peter P. Valko // SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, USA, 5–8 Oct. 2003. – SPE 84310.
3. Васильев, В. А. Оценка устойчивости заполнителя трещины при гидроразрыве пласта / В. А. Васильев // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (25).
4. Верисокин, А. Е. Сокращение сроков освоения скважины после проведения гидроразрыва пласта / А. Е. Верисокин // Наука. Инновации. Технологии. – 2018. – № 3. – URL: <https://scienceit.elpub.ru/jour/article/view/184> (дата обращения: 05.10.2024).
5. Оценка возможности применения карьерных песков Республики Беларусь в качестве расклинивающих агентов ГРП / А. Л. Богданов [и др.] // Поиск и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь : сб. науч. тр. : в 2 т. / Концерн «Белнефтехим», Произв. об-ние «Белоруснефть», Белорус. науч.-исслед. и проект. ун-т нефти ; под. ред. В. Д. Порошин. – Минск, 2022. – Т. 2, вып. 10. – С. 48–57.

УДК 622.276.66

**ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН  
С ГИДРОРАЗРЫВОМ ПЛАСТА НА ДОБЫЧУ НЕФТИ**

**А. М. Жуковский, Р. Е. Гутман**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Раскрыто, что истощение традиционных залежей углеводородов и длительная эксплуатация месторождений приводит к необходимости применения новых способов разработки месторождений нефти. Представлено, что один из таких способов – использование скважин с горизонтальным окончанием и последующим их освоением методом многостадийного гидроразрыва пласта. Это позволяет увеличить объем добычи нефти, а на объектах с трудноизвлекаемыми запасами является единственным рентабельным способом их разработки. Значительное влияние на объем добычи нефти оказывает вектор направления распространения трещин относительно ствола скважины. И как следствие – объем стимулированной породы. Подтверждена взаимосвязь накопленной добычи нефти с направлением бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин относительно векторов максимального горизонтального напряжения.*

**Ключевые слова:** геомеханическое моделирование, гидравлический разрыв пласта, наклонно-направленное бурение, горизонтальное бурение, вектор главных горизонтальных напряжений.

**THE INFLUENCE OF WELLS DRILLING DIRECTION  
WITH HYDROFRACTURING COMPLETION  
ON THE WELL CUMULATIVE OIL PRODUCTION**

**A. M. Zhukouski, R. E. Gutman**

*BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*Depletion of traditional hydrocarbon deposits and long-term exploitation of fields leads to the use of new methods for developing oil fields. One of such methods is horizontal wells drilling and their subsequent multi-stage hydraulic fracturing completion. This approach allows increasing*

*the volume of oil production, and it is the only cost-effective method of development of hard-to-recover oil reserves. The vector of the direction of crack propagation relative to the wellbore and, as a consequence, the volume of stimulated rock have a significant impact on the production rate. In this paper, the authors showed the relationship between the cumulative oil production and the direction of drilling sub-horizontal and horizontal wells relative to the vectors of maximum principal stress.*

**Keywords:** geomechanical modeling, fracturing, J-shape wells drilling, directional drilling, principal stress direction.

В РУП «ПО «Белоруснефть» 47 % скважин, пробуренных за 2023 г., приходится на горизонтальное бурение (за 2023 г. пробурено 66 скважин, из которых 31 скважина – с протяженным горизонтальным окончанием). Количество скважин с горизонтальным окончанием в 2023 г. выросло на 24 % по сравнению с 2022 г. Все горизонтальные скважины вводятся в освоение многостадийным гидроразрывом пласта (МГРП). Объем произведенных операций гидроразрыва пласта (ГРП) в РУП «ПО «Белоруснефть» в 2023 г. вырос на 30 % по сравнению с 2022 г. (2022 г. – 339 операция, 2023 г. – 441 операция).

Увеличение числа скважин с горизонтальным окончанием и рост операций ГРП показывают актуальность вопроса о рациональном выборе направления бурения горизонтальных скважин относительно векторов главных пластовых напряжений. В зависимости от этого выбора при проведении ГРП будет генерироваться различная система трещин – перпендикулярная или параллельная стволу скважины. Вопросы оценки влияния направления распространения трещин ГРП на показатели разработки с различной степенью детальности рассмотрены в ряде работ [1–3].

Важным инструментом при разработке объектов с трудноизвлекаемыми запасами становится комплексное (геологическое, гидродинамическое, геомеханическое) моделирование. В своей работе [4] мы описали процесс определения векторов главных горизонтальных напряжений по результатам 3D геомеханического моделирования с использованием геологической модели и пластового давления из гидродинамической модели на примере ланско-староосколькой залежи Барсуковского месторождения нефти.

По результатам 3D геомеханического моделирования был рассчитан угол между азимутом бурения скважины и направлением максимального горизонтального напряжения – угол  $\alpha_{SHmax}$ . Для оценки влияния направления бурения скважин на добычу нефти был введен комплексный показатель «индекс добычи на единицу проппанта», выраженный как отношение накопленной добычи нефти к массе закачанного проппанта, – это позволило учесть различия в освоении скважин методом ГРП. В данной работе показатель накопленной добычи приведен за первые 365 сут эксплуатации. На рис. 1 представлена зависимость индекса добычи на единицу проппанта за первые 365 сут эксплуатации скважин от угла  $\alpha_{SHmax}$ .

Установлена зависимость между накопленной добычей нефти и направлением бурения: скважины с большим углом  $\alpha_{SHmax}$  показывают более высокие показатели эксплуатации в пересчете на тонну закачиваемого проппанта. У скважин, пробуренных под углом  $50^\circ$  к направлению максимального горизонтального напряжения, накопленная добыча на одну тонну проппанта в два раза выше чем у скважин, пробуренных под углом  $20^\circ$ .

Также был выполнен анализ по оценке влияния на накопленную добычу нефти таких показателей, как проницаемость, длина наклонно-направленного участка, вертикальная мощность вскрываемых отложений, мощность интервалов коллектора,

пластовое давление залежи, а также пористость пласта. В результате анализа не было получено зависимостей между перечисленными показателями и накопленной добычей нефти, а также индексом добычи на единицу проппанта.

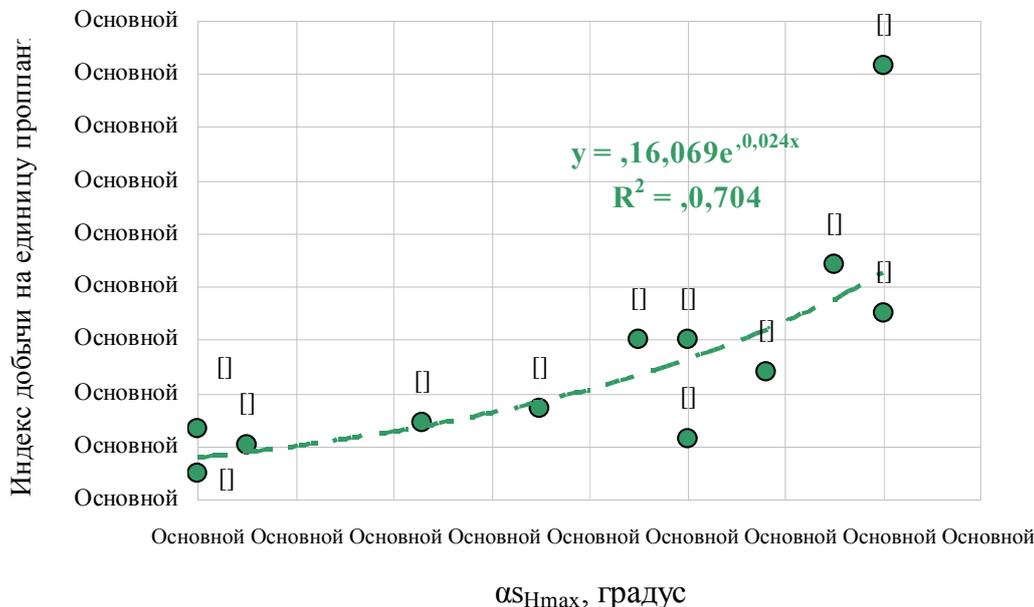


Рис. 1. Зависимость индекса добычи на единицу проппанта за 365 сут от угла  $\alpha_{Smax}$

В результате проведенных исследований подтверждено влияние на накопленную добычу нефти агрессивности проведения гидроразрыва пласта, оцениваемой по массе закачанного проппанта, и направления бурения скважин: увеличение массы проппанта приводит к росту геометрических и фильтрационных параметров трещин, а бурение по направлению минимального горизонтального напряжения позволяет увеличивать площадь дренирования скважин за счет формирования системы поперечных трещин.

#### Л и т е р а т у р а

1. Применение результатов трехмерного гидро-геомеханического моделирования для определения азимутов трещин гидроразрыва пласта / Г. Н. Воробьева, С. С. Остапчук, Р. А. Рыбаков, М. С. Космачева // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2023. – № 4 (43). – С. 58–71.
2. Янин, А. Н. Влияние направления трещин гидроразрыва пласта на показатели эксплуатации скважин / А. Н. Янин, С. А. Черевко // Территория Нефтегаз. – 2016. – № 12. – С. 76–81.
3. Влияние направления трещин многостадийного гидравлического разрыва пласта на коэффициент извлечения нефти / П. Н. Зятиков, К. В. Синебрюхов, Ю. С. Березовский, А. С. Трушко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 58. – С. 84–98. – DOI 10.17223/19988621/58/7
4. Жуковский, А. М. Геомеханическое обоснование выбора направления бурения скважин с гидроразрывом пласта для увеличения объемов добычи нефти на месторождениях Беларуси / А. М. Жуковский, Р. Е. Гутман // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2024. – № 3 (141). – С. 16–22.

УДК 553.982.234

**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ  
НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ОТЛОЖЕНИЙ КЕПРОКА  
ВЕРХНЕСОЛЕННОЙ ТОЛЩИ СЕВЕРНОЙ  
СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ  
ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА**

**А. А. Кравцова**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Отмечено, что в настоящее время, когда основные крупные залежи углеводородов на месторождениях Припятского прогиба находятся на поздних стадиях разработки, расширяется геологический интерес по выявлению новых залежей углеводородов в слабоизученных нефтеперспективных отложениях. С целью восполнения ресурсно-сырьевой базы наряду с поиском новых залежей углеводорода структурного и неструктурного типа, доразведкой ранее открытых месторождений весьма актуальным становится исследование слабоизученных литолого-стратиграфических подразделений, нефтеперспективность которых ранее считалась низкой. Одним из таких объектов исследований является кепрок.*

**Ключевые слова:** кепрок, нефтеперспективность, генезис, скважина, акцессорные минералы.

**CONDITIONS FOR THE FORMATION AND PROSPECTS  
OF OIL-GAS CAPROCK DEPOSITS OF THE UPPER SALINE  
THICKNESS OF THE NORTHERN STRUCTURAL TECTONIC ZONE  
(PRIPYAT TROUGH)**

**H. Krautsova**

*BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*Currently, while the main large hydrocarbon deposits in the Pripyat Trough fields are in the late development stages, geological interest is broadening by new hydrocarbon deposits in poorly studied oil-promised regions deposits. In order to replenish the resource base, the search for new hydrocarbon deposits of structural and non-structural types, and furthermore additional exploration of previously discovered fields. Researching poorly studied lithological and stratigraphic units, the oil potential of which was previously considered low, is highly relevant. One of the such research objects is caprock.*

**Keywords:** caprock, oil prospectivity, genesis, well, accessory minerals.

Кепрок применительно к условиям Припятской впадины (от англ. *cap* – шапка, *rock* – порода) – это пласт слабопроницаемых пород, покрывающих своды соляных куполов. Литологически в наиболее типичных случаях кепрок представлен ангидритом и гипсом в нижней части, кверху переходящим в пористый известняк и доломит, иногда пропитанный нефтяным битумом.

Доказанной гипотезы происхождения данных отложений нет. Одни авторы считают, что кепрок – это остаток накопившихся после растворения соли пород и минералов, первоначально залегавших в толще соли [1], а другие, что кепрок имеет первичное осадочное происхождение и представляет собой толщу, встреченную соляным ядром, вынесенную наверх в процессе внедрения в вышележащие породы [2].

## 90 Секция 6. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений

В мировой практике с точки зрения поиска и добычи полезных ископаемых отложения кепрока представляют большой интерес. Залежи углеводорода (УВ), приуроченные к отложениям кепрока, широко распространены по всему миру, и в некоторых странах успешно ведется их промышленная разработка. Так, в США существует несколько месторождений нефти в данных отложениях (Батсон, Соур-Лейк, Спиндлтоп, Хамбл), а в Германии из отложений кепрока были получено значительные количества нефти.

Также в кепроке могут быть сконцентрированы акцессорные минералы. Например, в Казахстане ранее эксплуатировалось несколько месторождений боратов, а в США отдельные покрывки соляных куполов (Салфер в Луизиане, Паланган в Техасе, Гранд-Айл в Мексиканском заливе) содержат в промышленных количествах серу.

В пределах Северной структурно-тектонической зоны (СТЗ) Припятского прогиба кепрок преимущественно приурочен к наиболее массивным соляным куполам (рис. 1), образованным вследствие проявления соляного тектогенеза и линейно ориентированным в субширотном направлении вдоль осей региональных разломов.

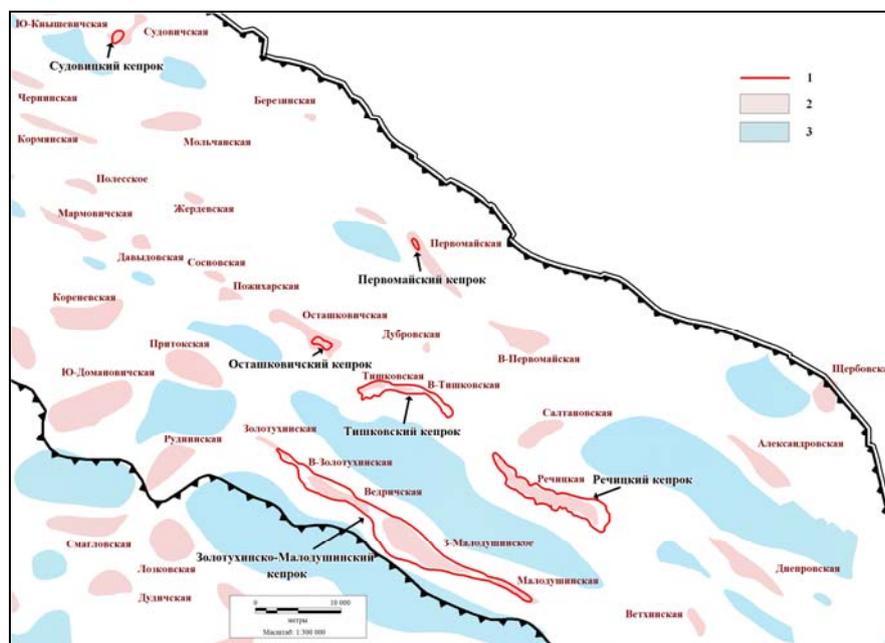


Рис. 1. Северная СТЗ Припятского прогиба. Схема распространения структурных форм галитовой подтолщи верхнесоленосных отложений [3]:

1 – условная граница кепрока; 2 – антиклинали (соляные купола);

3 – синклинали

В ходе выполнения работы по данным геофизических материалов отложения кепрока были выделены более чем в 350 скважинах. Проведены структурные построения поверхности галитовой и глинисто-галитовой подтолщ с выделением тел кепрока и их условной локализацией. В настоящее время кепрок выделен на шести площадях (Речицкая, Тишковская, Осташковичская, Золотухинско-Малодушинская, Судовицкая и Первомайская) (рис. 2, 3). Также данные отложения можно выделить в единичных скважинах в пределах южной и центральной структурно-тектонических зон, но из-за слабой разбуренности и небольшого количества геолого-геофизической



Исходя из имеющегося фактического материала, кепрок частично пропитан нефтяными битумами, что подтверждает отобранный керн в скважинах 1 Перомайская, 1 Тишковская, 5 Ельская, 4 Шестовичская (в керне отмечены налеты, примазки, включения и запах нефти). Также следует отметить, что в пределах данных отложений не проводились испытания, и лишь в скважине 10 Савичская при испытании в открытом стволе предположительно из отложений кепрока был получен приток пластовой воды дебитом 100,8 м<sup>3</sup>/сут. Проба, отобранная при испытании, представлена пластовым рассолом, химический состав которого характерен для надсолевых отложений. Имеющиеся критерии оценки нефтеперспективности пластовых рассолов по химическому составу не позволяют применять их к пластовым рассолам надсолевых отложений ввиду того, что они выведены только для отложений межсолевой и подсолевой толщ.

Учитывая значительные мощности отложений кепрока, небольшие глубины залегания, наличие признаков углеводородов в керне, а также недостаточную изученность отложений по геофизическим методам, данным лабораторных исследований керна и испытаний пластов, автор считает актуальным дальнейшее более детальное изучение отложений кепрока для установления его генезиса и возможной нефтеперспективности.

#### Литература

1. Ржанников, В. Е. Два основных литологических типа кепрока верхнесолевой девонской толщи припятской впадины / В. Е. Ржанников // Доклады академии наук БССР. – 1975. – № 12 (XIX). – С. 1116–1119.
2. Большая российская энциклопедия / гл. ред. С. Л. Кравец. – Москва : БРЭ. – 2004–2017. – URL: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_geolog](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog) (дата обращения: 02.10.2024).
3. Сводная структурная карта поверхности галитовой подтолщи верхнесоленосных отложений : отчет № 14 / Я. Г. Грибик, Н. К. Карташ, В. Н. Бескопыльный [и др.]. – Минск : РУП «Белгеология», 2011.

УДК 622.276.66

### **ПОВТОРНЫЙ МНОГОСТАДИЙНЫЙ ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАНИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**А. В. Денисенко, К. В. Мироненко, О. Л. Войтехин,  
В. А. Климович, Д. А. Дубина**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Отмечено, что в настоящее время в РУП «ПО «Белоруснефть» большое внимание уделяется разработке нефтяных залежей с ультранизкопроницаемыми коллекторами. Их освоение и дальнейшая эксплуатация возможны только с использованием прогрессивных технологий, таких как бурение скважин с протяженным горизонтальным стволом и последующим проведением в них многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП). Однако и после освоения таких скважин отмечается резкое снижение дебита. Вследствие этого стоит задача повторной стимуляции пластов, которая может быть решена путем проведения повторных МГРП с дивертированием потока жидкости.*

**Ключевые слова:** МГРП, ГРП, реМГРП, трудноизвлекаемые запасы (ТриЗ), ультранизкопроницаемые коллектора, дивертирование.

## MULTISTAGE REFRACKING IN ULTRA-LOW-PERMEABLE RESERVOIRS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

A. V. Denisenko, K. V. Mironenko, O. L. Voitekhin,  
V. A. Klimovich, D. A. Dubina

*BelNIPIneft RUF "Production Association "Belorusneft", Gomel*

*Currently, the greatest attention is paid to the development of ultra-low-permeability reservoirs. Their development and further exploitation is possible only with the use of advanced technologies, such as drilling wells with an extended horizontal trunk and subsequent multi-stage hydraulic fracturing. However, after the development of such wells, a sharp decrease in flow rate is noted, as a result of which the task of repeated stimulation of the formations is faced.*

**Keywords:** multistage hydraulic fracturing, hydraulic fracturing, re-multistage hydraulic fracturing, tight oil, ultra-low-permeability reservoirs, diversion.

Учитывая необходимость повторной интенсификации на скважинах, где вторичное вскрытие целевых отложений выполнено многочисленными разобщенными интервалами, в РУП «ПО «Белоруснефть» осуществлена оценка имеющихся в мировой практике технологий стимуляции подобных скважин. Как возможные варианты повторной стимуляции рассмотрены технологии спуска малогабаритного хвостовика в интервал проведения работ, технология химического отклонения фильтрационных потоков, технология с использованием пакерного оборудования для временной изоляции и направленной обработки и технология гидроразрыва пласта (ГРП) с физическим дивертированием потока жидкости.

Технологии с использованием дополнительных технических решений (малогабаритный хвостовик или двухпакерная компоновка) не в полной мере могут обеспечить адресность и безаварийность работ, а также закачку в пласт необходимой массы расклинивающего агента за небольшой временной отрезок (без дополнительных промежуточных спуско-подъемных операций (СПО) компоновки). При этом в случае получения внештатных ситуаций (получение давления СТОП) риск длительной ликвидации их последствий крайне высок. В РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» имеется опыт выполнения многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) с использованием химических отклонителей. Данные работы выполнялись совместно с одной из зарубежных нефтесервисных компаний за пределами Республики Беларусь. Однако техническая (подтверждение дивертирования потока и качественной обработки всех необходимых зон) и экономическая эффективность данных работ оказалась неоднозначной.

Оценив преимущества и недостатки вышеуказанных технологий, для внедрения выбрана технология «слепого» ГРП с дивертированием потока жидкости как наиболее простая и не требующая специфических технических средств и химических реагентов. Основные принципы технологии дивертирования потока жидкости основаны на теории локального повышения пластового давления в подвергаемых разрыву зонах коллектора путем нагнетания жидкости разрыва (ЖР) и проппанта в пласт, что приводит к отклонению последующей стадии ГРП в следующую зону коллектора. Дополнительным инструментом, повышающим шансы дивертирования потока жидкости, выступает механическое блокирование подвергнутого ГРП зон крупными фракциями проппанта, размещаемыми в прискважинной зоне трещины. Учитывая, что при проведении ГРП с дивертированием потока жидкости на несколько открытых интервалов перфорации отсутствует возможность управлять местоположением и очередностью создаваемых трещин, данная технология относится

к «слепым» технологиям ГРП. При проведении ГРП с дивертированием потока жидкости в качестве повторной технологии стимуляции местоположение создаваемых трещин по стволу скважины происходит от наиболее «выработанных» в процессе эксплуатации скважины участков к менее «выработанным» участкам. При этом теоретически определить интервалы, где будет происходить формирование трещин на начальных этапах закачки, можно путем проведения промыслово-геофизических исследований (ПГИ) на скважине-кандидате до выполнения работ по ГРП (выше приемистость – выше шанс формирования трещины в данной зоне). В случае, если по стволу скважины происходила равномерная выработка запасов, на начальных стадиях проведения МГРП трещины будут образовываться в ближайших к устью скважины зонах вторичного вскрытия (при отсутствии существенных различий по механическим свойствам целевых зон). Для подтверждения процесса дивертирования могут быть использованы различные исследования, проводимые до, при и после проведения ГРП. В качестве подобных исследований могут выступать данные ПГИ, картирование NRT-проппанта, микросейсмические исследования при проведении ГРП и технологии анализа осцилляций давления при мгновенной остановке насосов ГРП. На основании опыта РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» наиболее полную картину о выполненных работах по ГРП с дивертированием дает комплексный анализ нескольких методов геофизических исследований, так как каждая из вышеперечисленных технологий не может дать однозначного ответа по количеству и местоположению создаваемых трещин.

При проведении МГРП с дивертированием потока жидкости на скважинах, где ранее уже выполнялся МГРП, и существует необходимость создания трещин ГРП в зонах, в которых до этого адресная интенсификация не проводилась (например, в зонах между муфтой МГРП и заколонным пакером, либо в интервале муфты МГРП, где при выполнении освоения не удалось создать закрепленную трещину ГРП), дивертирующие проппантные пакеты используются до проведения основного ГРП.

Исходя из фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) и геологического описания пород-коллекторов, в качестве рабочей жидкости используются жидкости разрыва на биополимерной и синтетических основах. В качестве расклинивающих агентов – фрак-пески и проппанты различных фракций. Выбор используемой жидкости разрыва, а также типа расклинивающего агента зависит от необходимой геометрии создаваемой трещины и ФЕС пород-коллекторов с учетом потенциальной выработанности зоны воздействия:

– для ультранизкопроницаемых коллекторов Республики Беларусь, где матричная проницаемость коллектора составляет менее 0,01 мД, эффективная пористость коллектора составляет до 4–8 %, и требуется создание сверхдлинных трещин, используются гибридные технологии закачки, применяя жидкости разрыва на биополимерной и синтетической основах;

– для низкопроницаемых коллекторов Республики Беларусь, где матричная проницаемость коллектора составляет от 0,1 до 10 мД, применяются жидкости разрыва на биополимерной основе, в том числе жидкости разрыва пониженной вязкости.

Использование синтетических жидкостей разрыва и расклинивающих агентов мелких фракций на нетрадиционных коллекторах также обусловлено необходимостью создания благоприятных условий для инициации разветвленной сети трещин eSRV (магистральная трещина и трещины-сателлиты) при проведении reМГРП с самодивертированием потока жидкости. Подобный подход к проведению ГРП на нетрадиционных коллекторах, так называемых «tight oil», используется и при освоении скважин.

В зависимости от количества необходимых к повторной стимуляции зон коллектора, выполненной технологии освоения скважины (объем закачанной жидкости разрыва и проппанта, объем закачанных кислотных составов) и ФЕС пород-коллекторов, а также технических особенностей скважин (наличие приемной воронки в составе э/к и стингера для установки в приемную воронку) при проведении МГРП с дивертированием потока жидкости может выполняться различное количество стадий. Тогда в случае наличия предпосылок для азимутального изменения направления трещин ГРП при повторной стимуляции используется специфический «двойной» график закачки. Процесс азимутального изменения направления создаваемых трещин может быть связан с локальным изменением напряженного состояния пород-коллекторов в призабойной зоне пласта по причине снижения пластового давления в зоне форсированных отборов. Данный процесс наблюдается при низких значениях латеральной анизотропии пород, свойственной карбонатным породам-коллекторам нетрадиционных залежей Республики Беларусь.

В период 2020–2022 гг. в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» работы по внедрению технологии МГРП с дивертированием потока жидкости выполнены на 4 объектах действующего фонда. При освоении скважин-кандидатов применялись технологии поинтервальных обработок. На момент проведения работ по ГРП на скважинах-кандидатах дебит продукции кратно снизился по сравнению с запускными параметрами.

С целью анализа выполняемых работ по ряду объектов проводились геофизические исследования до, при и после проведения ГРП. Полученная информация позволяет судить о состоятельности предположений о возможности эффективно дивертировать поток жидкости при проведении ГРП на несколько интервалов.

При выполнении работ опробованы различные подходы к дизайну ГРП, направленные на создание дополнительных предпосылок для дивертирования потока жидкости. По причине недостаточности данных для анализа влияния технологических параметров на процесс дивертирования определить успешность и механизм дивертирования потока жидкости в настоящий момент не представилось возможным.

Таким образом, при проведении МГРП с дивертированием потока жидкости на скважинах Припятского прогиба получена 100%-я технологическая эффективность: опробованы различные дизайны ГРП, гибридные технологии закачки и использование синтетических жидкостей разрыва, при этом отсутствовали ранние переходы на стадию продавки и получения давлений СТОП. По большинству объектов получен положительный экономический эффект, выраженный в приросте добычных характеристик. На основании полученного опыта планируется дальнейшее внедрение технологии многостадийного ГРП с дивертированием потока жидкости на месторождениях Республики Беларусь.

УДК 550.8:553.98(476)

## **ПРИМЕНЕНИЕ РЕТРОКЕРНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЕЛЕЦКО-ПЕТРИКОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮЖНОГО СТРУКТУРНОГО РАЙОНА ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА**

**В. В. Даниленко**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Приведены результаты комплексных исследований ретрокерна из скважин, пробуренных в Южной структурно-тектонической зоне и определены перспективы нефтегазоносности*

*сти различных типов пород-коллекторов (терригенные, карбонатные, смешанные, нетрадиционные) и установлены границы их распространения в разрезе отложений. Отмечено, что ключевым результатом работы является выделение и локализация новых потенциально-перспективных объектов для поиска углеводородов в пределах рассматриваемого региона.*

**Ключевые слова:** Припятский прогиб, елецко-петриковские отложения, породы-коллекторы.

## **APPLICATION OF RETROCORE TO ASSESS PROSPECTS OIL AND GAS OF THE YELETS-PETRIKOV DEPOSITS SOUTHERN STRUCTURAL REGION OF THE PRIPYAT TROUGH**

**V. V. Danilenko**

*BelNIPIneft RUE "Production Association "Belorusneft", Gomel*

*The article presents the results of comprehensive studies of retrocore from wells drilled in the Southern structural-tectonic zone and determines the prospects for oil and gas content of various types of reservoir rocks (terrigenous, carbonate, mixed, unconventional) and establishes the boundaries of their distribution in the context of sediments. The key result of the work is the identification and localization of new potentially promising objects for the search for hydrocarbons within the region under consideration.*

**Keywords:** Pripyat Trough, Yelets-Petrikov deposits, reservoirs.

Целью данных исследований является оценка перспектив нефтегазоносности елецко-петриковских отложений Южного структурного района Припятского прогиба на основании результатов комплексных исследований ретрокерн, имеющегося на долговременном хранении в Центре обработки, исследования и хранения керн БелНИПИнефть.

**Результаты исследований.** Южный структурный район Припятского нефтегазоносного региона характеризуется наименьшей степенью геологической изученности. В его пределах открыто единственное месторождение в межселевых отложениях (для сравнения – в пределах Центральной и Северной зон открыто более 90 месторождений углеводородного сырья). Основная причина низкой успешности поисковых работ в данном регионе связывается со сложным геологическим строением продуктивных толщ. В настоящее время практический интерес к этому региону существенно возрос на фоне необходимости восполнения минерально-сырьевой базы путем поиска новых зон, благоприятных для постановки геологоразведочных работ. В рамках данной работы впервые были проведены комплексные исследования находящегося на долгосрочном хранении кернового материала из скважин, пробуренных в пределах рассматриваемой территории.

Проведенные литолого-фациальные исследования свидетельствуют, что на протяжении елецко-петриковского времени южная часть Припятского прогиба являлась частью эпиконтинентального моря. Большая часть терригенного материала поступала в палеобассейн преимущественно с территории Украинского кристаллического щита на юге. Это обусловило формирование на значительной части территории крупных дельтовых комплексов фаций. Преимущественное распространение получили зоны повышенного скопления песчаных пород. На изучение подобных зон до недавнего времени были направлены основные объемы поисково-разведочных работ. Однако полученные современные результаты комплексных исследований ретрокерн свидетельствуют о достаточно высоких перспективах смешанных квар-

цево-карбонатных разностей, сформированных в зонах ограниченного поступления обломочного материала.

В основу оценки перспектив нефтеносности елецко-петриковских отложений положены результаты литолого-геохимических исследований ретрокерна. Они включают в себя пиролитические исследования методом Rock-Eval и минералогические определения методом рентгеновской дифракции (XRD) и флуоресценции (XRF). Всего было изучено около 1000 проб ретро- и современного керна, отобранного в 2024 г. в скважине 5 Валавская.

Исходя из полученных данных наибольший нефтепоисковый интерес представляют кварцево-карбонатные породы, сформированные в областях преимущественно шельфовых фаций. Такие породы на отдельных участках характеризуются хорошим нефтегенерационным потенциалом (отношение ТОС (общий органический углерод) к S2 (остаточные (тяжелые) углеводороды)) (см. таблицу, рис. 1).

**Нефтеперспективные литотипы**

Основной литотип	S0 + S1, мг УВ/г породы, среднее значение (пределы)	S2, мг УВ/г породы, среднее значение (пределы)	ТОС, вес. %, среднее значение (пределы)
Доломит кварцевый	0,8 (0,1–4,9)	12,5 (3,5–62,1)	2,5 (1,1–8,1)
Известняк кварцевый	1,1 (0,2–2,6)	19,5 (3,7–47,2)	3,4 (1,4–6,9)

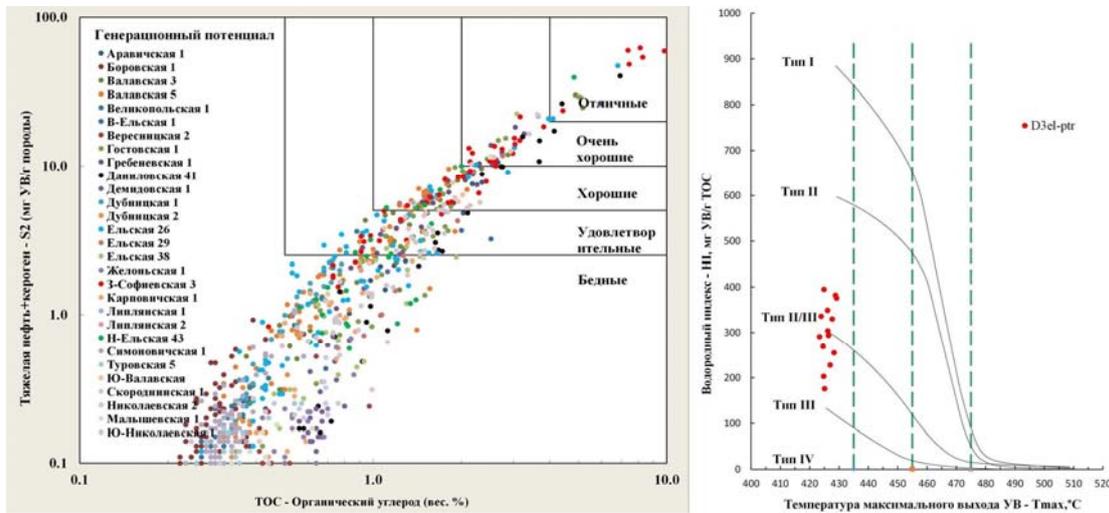


Рис. 1. Генерационный потенциал – отношение ТОС к S2 и тип органического вещества (график зависимости HI от T<sub>max</sub>) для елецко-петриковских отложений Южной структурно-тектонической зоны Припятского прогиба

Несмотря на длительное хранение ретрокерна (в течение 40–50 лет), а также вторичную его преобразованность, в таких породах отмечается повышенное содержание как тяжелых УВ (S2 – до 30–40 мг УВ/г породы и более), так и легких УВ (S0 + S1 – до 2–4 мг УВ/г породы и более). Это позволяет интерпретировать характеризующие литотипы как нефтеперспективные, представляющие первоочередной поисковый интерес. Тип органического вещества по результатам пиролиза керна – преимущественно смешанный (морской + континентальный) (рис. 1).

Анализируя полученные данные, в елецко-петриковских отложениях выделяют две основные зоны аккумуляции УВ, представляющие основной интерес с позиции дальнейшего доизучения. Приурочены они к шельфовым фациям, развитым на территории Западно-Софиевского и Ельского участков (рис. 2). Содержание органического углерода здесь достигает значений 2–2,4 % и более при точечных пробах – до 6–9 %.

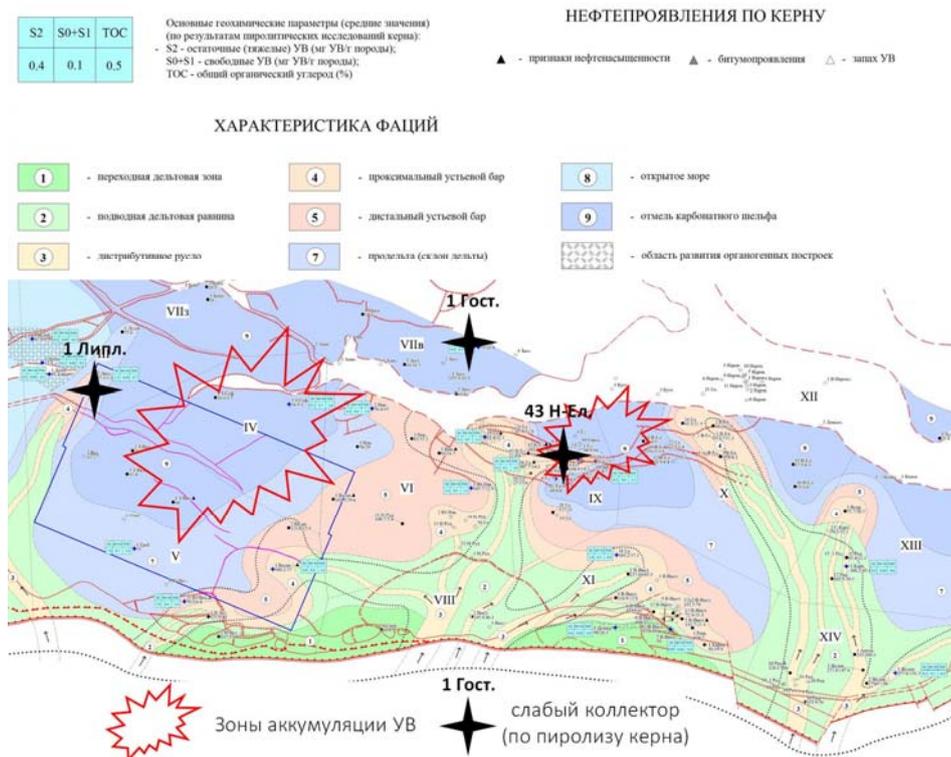


Рис. 2. Выкопировка участка литолого-фациальной карты елецко-петриковских отложений Южной структурно-тектонической зоны Припятского прогиба с локализованными зонами аккумуляции углеводорода

На основании приведенных исследований можно представить следующие выводы и рекомендации:

1. Впервые получены результаты комплексных исследований ретрокерна елецко-петриковских отложениях слаборазбуренной территории Южного структурного района Припятского прогиба, которые положены в основу создания седиментологической и геохимической моделей, а также прогноза перспективных объектов для постановки поискового бурения.

2. Выполненный комплекс работ позволил сформировать принципиально новые методические подходы эффективного применения «ретро» материалов для успешного выполнения задач геологоразведочных работ.

3. Наряду с использованием ретроданных для прогноза перспективных объектов рекомендуется сплошной отбор керны в планируемых к бурению поисково-разведочных скважинах с проведением полного цикла лабораторных исследований.

УДК 556.314:662.276(476)

**СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
НАПРАВЛЕНИЙ И СКОРОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ  
ПОТОКОВ В РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НЕФТЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ  
ПО ТРАССЕРНЫМ И ГИДРОХИМИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ**

**В. Д. Порошин**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрено изучение материалов по подсолевым залежам нефти Золотухинского месторождения, свидетельствующее о том, что в большинстве случаев направления и объемы вод, движущихся от нагнетательных скважин к добывающим по высокоскоростным фильтрационным каналам, определенные по результатам трассерных исследований, не совпадают с направлениями перемещения фронта (прорывов) нагнетаемых вод, установленным по сведениям о плотностях и составе попутных вод. Отмечено, что для более объективной оценки информативности результатов трассирования фильтрационных потоков по выяснению взаимосвязи нагнетательных и добывающих скважин в пределах нефтяных залежей необходимо проведение синхронных работ с использованием мониторинговых гидрохимических данных и результатов более длительных трассерных исследований.*

**Ключевые слова:** залежь нефти, трассерные исследования, гидрохимические данные, фильтрационные потоки, закачиваемые воды, высокоскоростные каналы.

**COMPARISON OF THE RESULTS OF DETERMINING  
THE DIRECTIONS AND VELOCITIES OF FILTRATION FLOWS  
IN THE DEVELOPED OIL DEPOSITS BASED ON TRACER  
AND HYDROCHEMICAL STUDIES**

**V. D. Poroshin**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The study of materials related to subsurface subsalt oil deposits at the Zolotukhinskoye field indicates that, in most cases, the directions and volumes of water moving from injection wells to production wells through high-speed filtration channels determined by tracer studies do not coincide with the directions of movement of the injected waters fronts (breakthroughs), determined by information on the density and composition of associated water. For a more objective assessment of the informational value of the results of filtration flows tracing in order to clarify the relationship between injection and production wells in an oil field, it is necessary to conduct simultaneous work using monitoring hydrochemical data and the long-term tracer studies results.*

**Keywords:** oil deposit, tracer studies, hydrochemical data, filtration flows, injected water, high-speed channels.

Результаты обработки материалов трассерных исследований по определению направлений и скоростей фильтрационных потоков достаточно широко используются при рассмотрении вопросов регулирования разработки нефтяных залежей. Имеющиеся данные о химическом составе и плотностях пластовых, закачиваемых и попутных вод при этом учитываются крайне редко. Наличие материалов краткосрочных (несколько месяцев) периодически проводимых трассерных исследований и мониторинговых гидрогеохимических данных по ряду нефтяных месторождений Припятского прогиба позволяют сопоставить получаемые результаты при решении стоящей задачи. В связи с существенным отличием состава закачиваемых в продук-

тивные пласты вод от законтурных пластовых рассолов закачиваемые воды могут рассматриваться как своеобразный трассер, а огромные объемы и большая продолжительность их закачки позволяют надеяться на получение при его использовании более надежной информации. Данный вопрос рассмотрим на примере подсолевых залежей нефти Золотухинского месторождения нефти.

Анализ материалов по трассерным исследованиям, выполненным в 2007–2014 гг. на скважинах воронежского и семилукско-саргаевского объектов разработки Золотухинского месторождения, свидетельствует о том, что по ним изучаются высокоскоростные фильтрационные потоки (преимущественно сотни и тысячи метров в сутки). С такими скоростями, как показывают результаты интерпретации этих материалов авторами проводимых работ, от нагнетательных к добывающим скважинам перемещаются доли, реже единицы процентов от объема закачиваемых вод. Объемы фильтрационных каналов, по которым движутся флюиды с такими высокими скоростями, составляют единицы, несколько десятков, иногда несколько сотен метров кубических, что несопоставимо мало по сравнению с объемами порового пространства, по которым движется в продуктивных пластах основная масса закачанных вод. Так как объемы вод, проходящих по этим высокопроницаемым каналам незначительны, заметного влияния на процесс вытеснения нефти, поддержание энергетики в отдельных участках залежей и обводнение скважин они, по нашему мнению, оказывать не могут.

Гидрохимические исследования, как показывает накопленный автором опыт их практического применения, позволяют изучать скорости и направления перемещения фронта вытеснения и прорывов вод, т. е. основной их массы, поступающих к добывающим скважинам. На возможность перемещения небольших объемов пластовых или закачиваемых вод по высокоскоростным каналам, казалось бы, может указывать резкое повышение содержания хлоридных солей в нефтях за несколько месяцев до обводнения скважин [1]. Однако этот вопрос до настоящего времени остается практически не изученным и на нем в данной работе мы останавливаться не будем. Скорости продвижения основных объемов закачиваемых вод, уверенно определенные по результатам гидрохимических исследований, обычно составляют от долей единицы до первых десятков метров в сутки [2]. Таким образом, однозначно оценить реальность существования весьма высоких скоростей фильтрационных потоков с помощью гидрохимических данных не представляется возможным.

Для оценки целесообразности широкого использования для контроля разработки нефтяных месторождений результатов трассерных исследований следует рассмотреть эти материалы со следующих позиций. Если направления и относительное распределение (в процентном или долевым отношении) объемов вод, перемещающихся по высокоскоростным каналам фильтрации (определенным трассерными методами), полностью отражают направления перемещения основных объемов и локальных прорывов вод, поступающих от нагнетательных к добывающим скважинам, определенных, допустим, с помощью гидрохимических данных, тогда трассерные исследования должны рассматриваться как наиболее эффективный метод получения информации, необходимой для регулирования разработки залежей нефти, а также составления их гидродинамических моделей. Последнее вытекает из того, что трассерные методы могут быть использованы практически на всех нагнетательных и обводненных добывающих скважинах. К тому же следует отметить оперативность их проведения (один–три месяца в анализируемом варианте технологии) и относительно небольшую стоимость.

Гидрохимические методы обычно показывают наиболее достоверные результаты в случае резкого различия составов пластовых и закачиваемых вод, а также при заметной дифференциации объемов закачиваемой воды в процессе эксплуатации скважин. Как правило, результаты по этим методам могут быть получены при анализе более длительного периода эксплуатации скважин (от нескольких месяцев до 1–3 лет), чем результаты трассерных исследований. Поэтому для надежного сопоставления материалов гидрохимических и трассерных исследований желательно было бы иметь данные по продолжительному сроку проведения последних (1–2 года), которые по нефтяным месторождениям Припятского прогиба отсутствуют. С другой стороны, на месторождениях постоянно проводится гидрохимический мониторинг и в сформированном банке данных накоплено огромное количество сведений по плотностям и химическому составу пластовых, закачиваемых и попутных вод, которые для рассматриваемой цели используются редко. Камеральная обработка таких данных с целью решения рассматриваемых задач существенных затрат не предполагает, а у специалистов, имеющих определенный опыт и серьезно занимающихся этим вопросом, особых сложностей не вызывает. Поэтому сопоставление направлений фильтрационных потоков и объемов закачиваемых вод, поступающих от нагнетательных скважин к добывающим, определенным по трассерным и гидрохимическим исследованиям, будет способствовать решению рассматриваемой в данной работе задачи, что мы и попытались сделать на примере подсолевых залежей неги Золотухинского месторождения [3]. Для этого использовались как сделанные по гидрохимическим данным заключения о нагнетательных скважинах, оказывающих заметное влияние на состав попутно добываемых вод в различных добывающих скважинах, так и результаты оценки возможного влияния на состав попутных вод конкретных скважин объемов закачиваемой воды, определенных по результатам трассерных исследований. При этом сравнение проводилось не с процентным распределением объемов закачиваемых вод по реагирующим добывающим скважинам, установленным в результате трассерных исследований, а с объемами вод, которые должны в таком случае поступить от нагнетательных скважин к конкретной добывающей скважине.

Обобщение изученных автором материалов, касающиеся сопоставления распределений фильтрационных потоков от нагнетательных скважин Золотухинского месторождения к добывающим скважинам за 2007–2014 гг., позволило отметить, что в большинстве случаев направления и объемы вод, движущихся от нагнетательных скважин, согласно трассерным исследованиям по высокоскоростным фильтрационным каналам не совпадают с направлениями перемещения основной массы (потоков) нагнетаемых вод, определенным по результатам проведенных гидрохимических исследований. Однако для скважин восточной части воронежской залежи нефти доля таких совпадений относительно высока, что не распространяется на установленное трассерными исследованиями движение закачиваемых пресных вод от нагнетательных скважин восточной части залежи к добывающим скважинам, расположенным в западной и центральной ее частях. Для залежи семилукско-саргаевского объекта разработки подтверждаемость результатов трассерных исследований гидрохимическими данными очень низкая. Установить истинную причину такого различия по рассмотренным материалам нет возможности. Очевидно, для более объективной оценки информативности результатов трассирования при выяснении характера влияния конкретных нагнетательных скважин на добывающие в пределах разных залежей или их участков необходимо выполнение более масштабных комплексных работ с использованием массовых гидрохимических данных и результатов проведения более длительных трассерных исследований.

Литература

1. Муляк, В. В. Геотехнологические основы анализа и контроля разработки нефтяных месторождений по промысловым гидрохимическим данным : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 26.00.17 / Владимир Витальевич Муляк ; Ин-т проблем нефти и газа РАН. – Москва, 2008. – 34 с.
2. Порошин, В. Д. Методы обработки и интерпретации гидрохимических данных при контроле разработки нефтяных месторождений / В. Д. Порошин, В. В. Муляк. – Москва : Недра, 2004. – 220 с.
3. Научно-методическое сопровождение гидрохимического мониторинга разработки Золотухинского месторождения нефти : отчет о НИР (заключ.) / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; рук. В. Д. Порошин ; исполн. С. Л. Порошина. – Гомель, 2020. – 265 с. – № ГР 20201195.

УДК 556.314:662.276(476)

**К ВОПРОСУ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА**

**С. Л. Порошина**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрена существующая система гидрохимического мониторинга разработки нефтяных месторождений Припятского прогиба. На основе проведенных гидрохимических исследований по анализу и контролю эксплуатации нагнетательных и добывающих скважин межсолевых залежей нефти Северо-Домановичского и Березинского месторождений и подсолевых залежей Золотухинского разработаны рекомендации, направленные на совершенствование проводимого мониторинга.*

**Ключевые слова:** залежь нефти, скважина, гидрохимический мониторинг, методы исследований, попутные воды, химический состав, плотность вод.

**ON THE ISSUE OF IMPROVING THE HYDROCHEMICAL  
MONITORING OF THE DEVELOPMENT OF OIL FIELDS  
IN THE PRIPYAT TROUGH**

**S. L. Poroshina**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The existing system of hydrochemical monitoring of oil field development in the Pripyat trench is considered. Based on hydrochemical studies conducted on the analysis and control of operation of injection and production wells of inter-salt oil deposits of the Severo-Domanovichsky and Berezinsky fields and subsalt deposits of Zolotukhinsky, recommendations have been developed aimed at improving the monitoring.*

**Keywords:** oil deposit, well, hydrochemical monitoring, research methods, associated waters, chemical composition, water density.

Проводимый в настоящее время гидрохимический мониторинг разработки на нефтяных месторождениях Припятского прогиба заключается преимущественно в отборе и изучении химического состава нефтепромысловых вод, пополнении существующего банка данных, выдачи заключений по природе отбираемых флюидов, построении ежемесячных карт плотностей попутных вод по отдельным залежам нефти, изучении степени насыщенности этих вод по карбонатным, сульфатным и хлоридным минералам. Обобщающих работ по анализу и контролю разработки конкретных зале-

жей нефти по промысловым гидрохимическим данным в последние годы практически не проводится, либо они проводятся в сокращенном варианте. Сложившееся состояние дел, а также результаты проведенных автором исследований по Березинскому, Северо-Домановичскому и Золотухинскому месторождениям указывают на необходимость совершенствования гидрохимического мониторинга и подготовки регламента его проведения. Этот регламент, прежде всего, должен предусматривать очередность отбора проб пластовых, попутных, технологических и закачиваемых вод, определение их химического состава, оценку качества химических анализов и оперативного их внесения в постоянно формирующийся банк данных.

Несмотря на, казалось бы, очевидную простоту, рассматриваемая задача остается не в полной мере решенной до настоящего времени, чем объясняется неравномерность распределения фактических данных по отдельным скважинам и залежам нефти в целом, что более ярко проявляется в последние полтора–два десятилетия. Так, при оценке распределения фактических данных по конкретным объектам разработки четко видна их недостаточность для решения многих нефтепромысловых задач методами нефтепромысловой гидрогеологии, что четко продемонстрировано нами на примере подсолевых залежей Золотухинского месторождения нефти [1]. Анализ количества и качества гидрохимических данных по плотностям и составу этих вод позволяет, прежде всего, констатировать разную степень освещенности этими данными различных этапов эксплуатации скважин. Так, для одних этапов отмечается немотивированный резкий рост количества таких исследований, на других – полное отсутствие гидрохимических данных, несмотря на высокую степень обводненности добываемой продукции и отмечающееся существенное изменение плотности и химического состава вод, указывающее на значительное изменение проявляющихся в залежи флюидодинамических процессов. К примеру, перевод скважин 56,73, 111, 115, 116 восточной части воронежской залежи Золотухинского месторождения на периодический режим работы существенным образом отразился на составе попутно добываемых вод. Однако имеющихся сведений оказалось недостаточно для установления четких закономерностей изменения плотности попутных вод после периодических вводов скважин в добычу, а сведения о составе этих вод отсутствовали за последние пять и более лет. А вот по скважине 58, по которой в последние годы не отмечается заметного изменения плотностей и химического состава попутных вод, имеется большое количество данных, не несущих дополнительной гидрохимической информации.

Особые трудности в ряде случаев вызывает выяснение состава закачиваемых вод по отдельным залежам или их частям и изменения содержания в них конкретных водорастворенных компонентов во времени. Поэтому в таких случаях часто приходится использовать скорректированные данные по БКНС. Сведения же о составе технологических вод, используемых при проведении различного рода геологотехнических мероприятий в скважинах, зачастую вовсе отсутствуют. Все это затрудняет проведение ретроспективных гидрохимических исследований по ряду залежей. Однако, рассматривая вопрос необходимого количества отбираемых проб, нужно учитывать и экономическую составляющую. Иначе говоря, конкретная программа (или регламент) отбора проб и проведения их химических анализов может быть сформирована только после сбора уже имеющихся фактических данных, их обработки и попытки решить с их помощью назревшие нефтепромысловые задачи. В рассматриваемом случае именно перечень нерешенных нефтепромысловых задач, для решения которых могут использоваться гидрохимические данные и их практическая важность с учетом экономических интересов добывающего предприятия, долж-

ны ставиться во главу угла при определении рационального количества необходимых фактических данных.

Второй блок рекомендаций по усовершенствованию гидрохимического мониторинга состоит в необходимости постоянного совершенствования существующих, выработке и применения новых методов использования сведений о составе нефтепромысловых вод при решении геолого-промысловых задач по конкретным объектам разработки.

Первые методические подходы к анализу и контролю разработки нефтяных месторождений Беларуси по гидрохимическим данным были разработаны в БелНИПИнефть еще в середине девяностых годов прошлого столетия [2]. В дальнейшем были предложены еще несколько методик. Три из них можно считать основными для изучения процессов рассоления пород-коллекторов в ходе разработки нефтяных залежей с заводнением пластов водами более низкой минерализации, чем пластовые рассолы. На их основании были разработаны алгоритмы и составлены программы GALIT, KANAL и EXPRESS, реализованные на языке программирования FoxPro. Результаты расчетов по данным программам нашли свое отражение в ряде отчетов БелНИПИнефть и открытой печати. Начиная со второй половины 2017 г. на кафедре «Разработка, эксплуатация нефтяных месторождений и транспорт нефти» ГГТУ им. П. О. Сухого были начаты работы по научно-исследовательской теме «Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений на основе детального изучения засоленных коллекторов и особенностей их изменения в процессе эксплуатации глубоких скважин». В рамках этой темы проводились исследования по подготовке более простых и более эффективных методов обработки и интерпретации нефтепромысловых гидрохимических данных с целью изучения вопросов изменения ФЕС продуктивных засоленных коллекторов в процессе эксплуатации добывающих скважин. При этом были рассмотрены новые подходы к решению поставленных задач и разработаны компьютерные программы «Галит-1» и «Галит-М», реализованные в формате Excel. Используя эти наработки, автором были предложены новые подходы к определению коэффициента долевого участия закачиваемых вод в рассолах, обводняющих добывающие скважины, а также к оценке избыточных концентраций в них хлоридов натрия, сформировавшихся за счет растворения вторичного галита в продуктивных пластах. Отметим, что предложенный способ «Галит-1т» позволяет использовать для вышерассмотренных целей многочисленные ранее невостребованные сведения о химическом составе попутных рассолов, разбавленных подливаемыми в скважины пресными водами. Кроме того, доведен до несложных инженерных решений методический подход по оценке степени влияния конкретных нагнетательных скважин на обводнение близлежащих добывающих скважин путем сопоставления объемов закачки и плотностей закачиваемых вод с графиками изменения плотностей попутных вод соответствующих добывающих скважин. Однако в настоящее время это – еще достаточно трудоемкий процесс, связанный с «ручной» подгонкой разномасштабных осей времени строящихся при этом графиков и экспертном их сопоставлении, поэтому следовало бы на основе предложенного подхода разработать специальную компьютерную программу по оценке взаимосвязи нагнетательных и добывающих скважин, а также определению направлений и скоростей фильтрационных потоков. Проведение вышеобозначенных научно-методических работ и решение поставленных задач может позволить широкому кругу специалистов БелНИПИнефть или НГДУ «Речицанефть» без особых затруднений проводить необходимые расчеты и исследования.

Третий блок рекомендаций связан с целесообразностью проведения планомерных работ по охвату всех разрабатываемых с применением ППД залежей нефти обобщающими гидрохимическими исследованиями с целью использования полученных материалов для анализа, контроля и регулирования разработки конкретных залежей или их отдельных участков. Как показывают проведенные автором гидрохимические исследования по Березинскому, Северо-Домановичскому и Золотухинскому месторождениям нефти, реализация данного предложения может способствовать получению новой, достаточно важной информации, которая позволит повысить достоверность существующих постоянно действующих гидродинамических моделей отдельных залежей нефти и качество подготовки новых проектных документов на их разработку. После того как по залежам будут выполнены обобщающие гидрохимические исследования, рекомендуется проведение в рамках гидрохимического мониторинга периодической их актуализации, что не потребует существенных временных и материальных затрат.

#### Л и т е р а т у р а

1. Научно-методическое сопровождение гидрохимического мониторинга разработки Золотухинского месторождения нефти : отчет о НИР (заключ.) / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; рук. В. Д. Порошин ; исполн. С. Л. Порошина. – Гомель, 2020. – 265 с. – № ГР 20201195.
2. Порошин, В. Д. Методы обработки и интерпретации гидрохимических данных при контроле разработки нефтяных месторождений / В. Д. Порошин, В. В. Муляк. – Москва : Недра, 2004. – 220 с.

УДК 546.284:502.37

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФОСФОГИПСА И ДИОКСИДА КРЕМНИЯ**

**В. Ю. Писарев, Т. В. Атвиновская, И. И. Злотников**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Отмечено, что нефтегазовая промышленность и связанные с ней техногенные аварии несут опасность утечек и разливов нефти и нефтепродуктов. Выделено, что для их ликвидации наиболее эффективно применение сорбентов различной природы, а особенно – кремний-содержащих минеральных материалов, таких как силикагели. Однако использование сорбентов на основе силикагелей ограничено их достаточно высокой стоимостью. В связи с этим целью работы являются сравнительное изучение сорбционных свойств фосфогипса и диоксида кремния (силикагеля) по отношению к нефти, а также рассмотрение перспектив применения фосфогипса в качестве сорбента нефтяных загрязнений. Проведены эксперименты по определению физико-механических свойств полученных сорбентов. Представлены основные преимущества и недостатки фосфогипса как сорбента нефти.*

**Ключевые слова:** нефть, загрязнение окружающей среды, сорбенты, диоксид кремния, фосфогипс.

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF SORPTION PROPERTIES PHOSPHOGYPSUM AND SILICON DIOXIDE**

**V. Yu. Pisarev, T. V. Atvinovskaya, I. I. Zlotnikov**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The oil industry and related man-made accidents carry the risk of oil spills. To eliminate them, the use of various sorbents, especially such as silica gels, is effective. However, the use of silica*

*gel-based sorbents is limited by their high cost. The purpose of the work is a comparative study of the sorption properties of phosphogypsum and silicon dioxide (silica gel) in relation to oil, as well as consideration of the prospects of using phosphogypsum to eliminate oil pollution. Experiments were conducted to determine the physico-mechanical properties of the obtained sorbents. The main advantages and disadvantages of phosphogypsum as an oil sorbent are considered.*

**Keywords:** oil, environmental pollution, sorbents, silicon dioxide, phosphogypsum.

Нефтяная промышленность является одной из наиболее опасных отраслей хозяйственной деятельности человека по отрицательному влиянию на окружающую среду. Техногенное влияние нефтедобывающей отрасли на объекты природной среды присуще всем этапам освоения месторождений – от бурения до введения в эксплуатацию и разработки месторождений. Огромную экологическую опасность представляют собой аварийные разливы нефти, так как они приводят к наиболее масштабным загрязнениям территорий и водных поверхностей. Для ликвидации нефтяных загрязнений почвы и водной поверхности наиболее эффективны сорбционные способы. В настоящее время разработано и успешно используется много различных сорбентов с необходимыми свойствами для решения конкретных задач по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Наиболее эффективными являются кремнийсодержащие сорбционные материалы: силикагели, алюмосиликаты, цеолиты, вермикулит, бентонитовые глины, кремнеземы, в том числе и модифицированные органическими и неорганическими реагентами [1–3]. Однако применение многих из указанных сорбентов ограничено их высокой стоимостью.

Цель данных исследований – сравнительное изучение сорбционных свойств фосфогипса и диоксида кремния (силикагеля) по отношению к нефти, а также поиск путей повышения их сорбционной активности.

В качестве объектов для исследования были выбраны: фосфогипс – отход производства фосфорной кислоты на ОАО «Гомельский химический завод», содержащий около 97 % дигидрата сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) и промышленно выпускаемый диоксид кремния («белая сажа» марки БС-100). Исходные порошки сушили в сушильном шкафу при температуре  $125 \pm 5$  °С и просеивали через лабораторные сита (максимальный размер частиц – не более 100 мкм).

Кроме высокой сорбирующей способности по отношению к нефти и нефтепродуктам сорбент должен обладать высокой гидрофобностью и плавучестью, чтобы не смачиваться водой и не тонуть длительное время, если его применяют для очистки водной поверхности. Основываясь на литературных данных [4] и ранее проведенных исследованиях [5], для повышения гидрофобности порошки обрабатывали этилсиликонатом натрия марки ГКЖ-11. Гидрофобизацию порошков диоксида кремния и фосфогипса проводили следующим образом. В отмеренное количество высушенного порошка вводили 4 мас. % этилсиликоната натрия и перемешивали в лабораторном миксере в течение около 1 мин.

Гидрофобность порошков оценивали по ГОСТ 32704-2014. Для этого навеску порошка (2 г) сыпали на поверхность дистиллированной воды в стакане и оставляли на 24 ч, после чего оценивали количество порошка, погрузившегося на дно стакана. Порошок считали полностью гидрофобным, если через 24 ч он весь оставался на поверхности воды. Маслосмачиваемость порошков определяли по ГОСТ 21119.8-75 с помощью стеклянной палочки. Для установления истинной плотности измеряли массу навески фосфогипса и диоксида кремния и его истинный объем по объему вытесненной дистиллированной воды. Насыпную плотность оценивали по объему навески

порошков при их свободной засыпке в мерный цилиндр через воронку. Сорбционную способность по отношению к нефти определяли ускоренным методом по ГОСТ 33627-2015 для адсорбента II типа. Нефтеемкость  $k$  рассчитывали по формуле

$$k = (m - m_0) / m_0,$$

где  $m_0$  – масса сорбента до испытания;  $m$  – масса сорбента после обработки нефтью.

Сравнительные свойства полученных порошков приведены в таблице.

### Свойства сорбентов

Показатель	Сорбент			
	БС-100	БС-100 гидрофобизированный	Фосфогипс	Фосфогипс гидрофобизированный
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2150	2210	2860	2850
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	115	120	630	640
Маслоемкость, г/г	2,2	2,7	1,12	1,18
Нефтеемкость, г/г	2,4	3,2	1,25	1,38
Степень гидрофобности, %	0	99	0	около 95

Из таблицы следует, что диоксид кремния обладает нефтеемкостью примерно в два раза большей чем фосфогипс. Кроме того, гидрофобизация поверхности диоксида кремния этилсиликатом натрия повышает его нефтеемкость еще примерно на 33 %, а фосфогипса – только на 10 %, однако после гидрофобизации фосфогипс, как и диоксид кремния, приобретает плавучесть до 24 ч. Учитывая, что диоксид кремния является достаточно дорогим (стоимость – около 4 бел. руб. за 1 кг), а фосфогипс – это отход производства, по результатам проведенных исследований можно утверждать, что фосфогипс является перспективным сорбентом для сбора нефти и нефтепродуктов как с почвы, так и с водной поверхности.

Таким образом, на основе фосфогипса может быть получен эффективный неорганический сорбент для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов с твердой, в том числе обводненной поверхности. Рассмотренный технологический процесс увеличения сорбционных свойств фосфогипса достаточно прост и может быть успешно реализован в промышленных условиях.

### Литература

1. Васильева, Ж. В. Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории / Ж. В. Васильева, М. В. Васеха, В. С. Тюляев // Записки Горного института. – 2023. – Т. 264. – С. 856–864. – DOI 10.31897/PMI.2023.14
2. Силикагель – сорбент и носитель катализаторов: совершенствование технологий и поиск альтернативных путей производства / Г. В. Мамонтов, Е. В. Евдокимова, А. С. Савельева [и др.] // Катализ в промышленности. – 2022 – Т. 22, № 6. – С. 6–15. – DOI 10.18412/1816-0387-2022-6-6-15
3. Пожидаев, Ю. Н. Кремнийсодержащие сорбционные материалы: синтез, свойства, применение / Ю. Н. Пожидаев // Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. – 2014. – № 4 (9). – С. 7–37.
4. Губкина, Т. Г. Способы получения гидрофобных сорбентов нефти модификацией поверхности вермикулита органосилоксанами / Т. Г. Губкина, А. Т. Беляевский, В. А. Маслобоев // Вестник МГТУ. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 767–773.

5. Аткинговская, Т. В. Изучение сорбционной способности модифицированного диоксида кремния по отношению к нефти / Т. В. Аткинговская, И. И. Злотников, В. Ю. Писарев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 3. – С. 13–20. – DOI 10.62595/1819-5245-2024-3-13-20

УДК 534.614

**ОЦЕНКА СКОРОСТИ ЗВУКА В ЗАТРУБНОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОЙ ЗАЛЕЖИ РЕЧИЦКОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ**

**У. В. Ключко, Н. В. Бочаров, И. С. Шепелева**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**А. В. Шелюто, А. А. Тишков**

*РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

*Рассмотрены проблемы определения скорости звука и динамического уровня, влияющего на эффективность работы погружного оборудования, на примере нефтяных скважин воронежской залежи Речицкого месторождения при помощи эхометрии. В результате исследований установлено: фактическая скорость звука в скважинных условиях изменяется в широком диапазоне – от 230 до 372 м/с, что относительно стандартной скорости составляет от –28 до +16,3 %, а погрешность измерения уровня при этом может достигать 300 м.*

**Ключевые слова:** скорость звука, эхометрия, динамический уровень, контроль эксплуатации скважин, гидродинамические исследования скважин.

**ESTIMATION OF THE SPEED OF SOUND IN THE ANNULAR SPACE  
ON THE EXAMPLE OF THE VORONEZH DEPOSIT  
OF THE RECHITSKY OIL FIELD**

**U. V. Klochko, N. V. Bocharov, I. S. Shepeleva**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

**A. V. Sheluto, A. A. Tishkov**

*RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*The paper considers the problems of determining the speed of sound and the dynamic level that affect the efficiency of submersible equipment, using the example of oil wells in the Voronezh Rechitskoe deposit using echometry. As a result of the research, it was revealed that the actual speed of sound varies in a wide range – from 230 to 372 m/s, which is relative to the standard speed –28...+16,3 %, and the level measurement error can reach 300 m.*

**Keywords:** sound velocity, echometry, dynamic level, well operation control, well hydrodynamic studies.

Большинство нефтедобывающих скважин эксплуатируются механизированным способом. Для стабильной работы насосного оборудования оно должно находиться ниже динамического уровня жидкости при заданных параметрах эксплуатации. Этим руководствуются при выборе производительности и глубины спуска насоса [1].

Достоверное определение динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве скважины является одним из важных факторов, влияющих на правильную оценку потенциала скважины и адекватности решений, направленных на повышение эффективности работы нефтедобывающего оборудования [2].

Применяемые в нефтяной промышленности приборы контроля уровня жидкости в затрубном пространстве скважины основаны на регистрации времени прихода отраженной волны от поверхности динамического либо статического уровней [3].

Точность замера уровней в значительной степени зависит от учета скорости звука в скважинах. Расчет глубины положения уровня жидкости обычно производится на стандартную скорость звука – 320 м/с вне зависимости от каких-либо геолого-технических условий объектов исследования. Реальные скорости звука будут отличны от 320 м/с ввиду того, что они зависят от параметров среды, в которой производится замер [4].

Оценка величины скорости звука в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» была проведена несколькими способами:

1. Методом эхолокаций муфт комплексом «Сиам Мастер 2С».
2. Методом эхолокаций реперов: переходы эксплуатационных колонн, переходы колонн насосно-компрессорных труб.

Сравнение скорости звука по двум методам для трех скважин показало хорошую сходимость результатов, погрешность отклонения относительно уровня, замеренного манометром, не превышает 3 %. По результатам расчетов была построена зависимость скорости звука от затрубного давления (рис. 1).

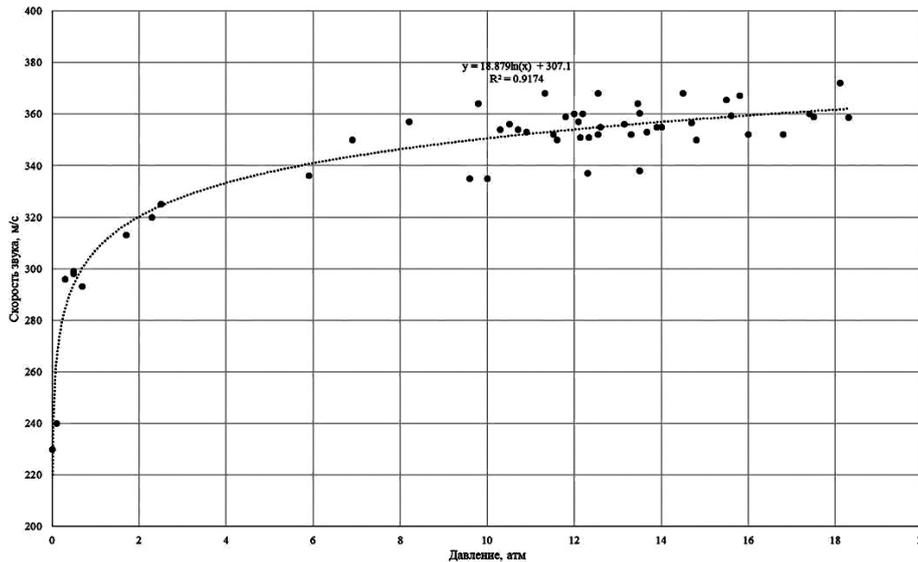


Рис. 1. Зависимость скорости звука от затрубного давления для скважин II пачки воронежского горизонта Речицкого месторождения

По скоростям звука установлены фактические динамические уровни, проанализировано положение погружного оборудования относительно динамического уровня и выявлен ряд скважин, на которых динамический уровень находится на глубине, близкой к приему насоса (скважина 230 на рис. 2). Результат, полученный по зависимости, подтверждается снижением дебита ниже номинальной производительности оборудования и влиянием выделяющегося из нефти газа на его работу.

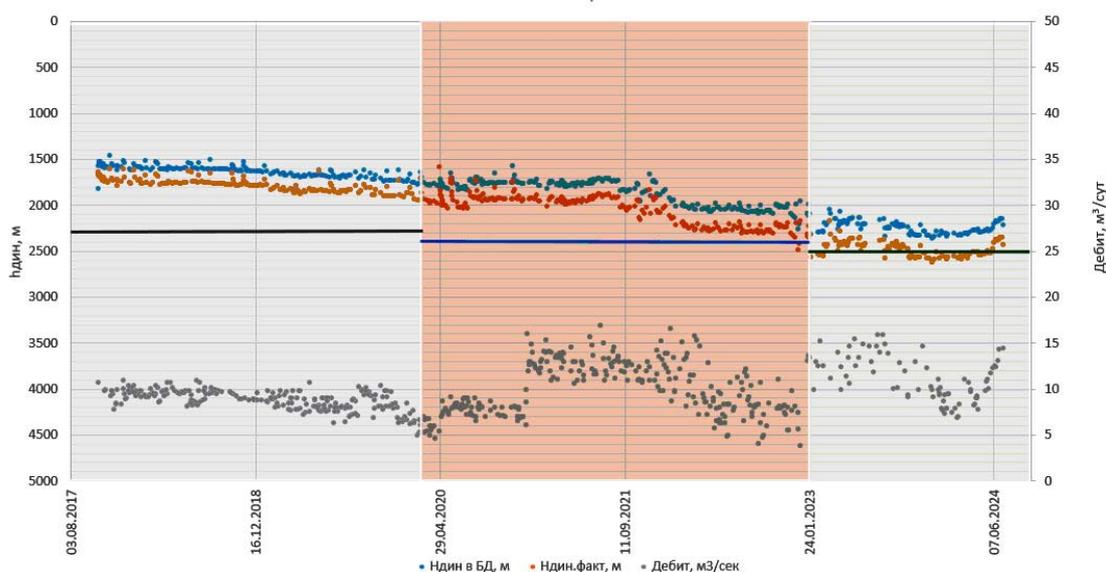


Рис. 2. Изменение динамического уровня при разных скоростях звука в скважине 230

Полученные кривые скорости звука изменятся со временем по мере разработки залежи и требуют последующей периодической корректировки.

Построение зависимостей скорости звука от затрубного давления и мониторинг скорости звука другими методами позволит улучшить достоверность оценки фильтрационных параметров пласта и продуктивности скважины по устьевым методам гидродинамических исследований, повысит качество подбора и предотвратит преждевременный выход из строя насосного оборудования, что в конечном итоге приведет к повышению эффективности разработки залежи.

#### Литература

1. Технические решения по оценке уровня жидкости в нефтедобывающих и водозаборных скважинах / И. З. Денисламов, И. К. Гималтдинов, Р. Н. Якубов, А. И. Денисламова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 6. – С. 197–207.
2. Бочаров, Н. В. К вопросу определения уровня жидкости в нефтяных скважинах методом эхолокации / Н. В. Бочаров, У. В. Клочко, И. С. Шепелева // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2024. – Ч. 1. – С. 32–35.
3. Гидродинамические исследования скважин и методы обработки результатов измерений / Р. С. Хисамов, Э. И. Сулейманов, Р. Г. Фархуллин [и др.]. – Москва : ВНИИОЭНГ, 2000. – 228 с.
4. Сваровская, Н. А. Влияние условий прохождения звуковой волны на скорость ее распространения в затрубном пространстве скважины и оценку уровня жидкости при эхолокации / Н. А. Сваровская, С. Г. Перминов // Известия Томского политехнического университета. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2002. – Т. 305, № 8. – С. 157–160.

УДК 622.276

**ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ  
КОЛЛЕКТОРОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАЛЕЖИ I–III ПАЧЕК МЕЖСОЛЕВЫХ  
ОТЛОЖЕНИЙ РЕЧИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**К. С. Карсеко, А. Л. Липский**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Отмечено, что в условиях истощения традиционных запасов нефти создание новых технологий разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами является важной задачей в поддержании и увеличении текущих уровней добычи. Подчеркнуто, что при разработке нефтяных месторождений с низкопроницаемым коллектором основная проблема – это низкая эффективность системы поддержания пластового давления. Закачка воды и характер заводнения залежи в нетрадиционных коллекторах значительно отличается от таковых в традиционных коллекторах из-за сложных и низких петрофизических свойств пластов. В связи с этим оценена применимость и проведен расчет эффективности использования различных методов увеличения нефтеотдачи на межсолевой залежи нефти I–III пачек Речицкого месторождения.*

**Ключевые слова:** трудноизвлекаемые запасы, низкопроницаемый коллектор, поддержание пластового давления, методы увеличения нефтеотдачи, huff-and-puff.

**ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY AND CALCULATION  
OF THE EFFECTIVENESS OF ENHANCED OIL RECOVERY  
METHODS OF LOW-PERMEABILITY RESERVOIRS  
ON THE EXAMPLE OF DEPOSITS OF I–III PACKS  
OF INTER-SALT DEPOSITS OF THE RECHITSKOE FIELD**

**K. S. Karseka, A. L. Lipski**

*BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*In conditions of depletion of traditional oil reserves, the creation of new technologies for the development of fields with hard-to-recover reserves is an important task in maintaining and increasing current production levels. When developing oil fields with a low-permeability reservoir, the main problem is the low efficiency of the reservoir pressure maintenance system. Water injection in unconventional reservoirs differs significantly from injection in traditional reservoirs due to the complex and low petrophysical properties of the formations. The paper evaluates the applicability and calculates the effectiveness of enhanced oil recovery methods in inter-salt oil deposits I-III packs Rechitskoe field.*

**Keywords:** hard-to-recover reserves, low-permeability reservoir, reservoir pressure maintenance, enhanced oil recovery methods, huff-and-puff.

Опыт организации систем поддержания пластового давления (ППД) в залежах с низко- и сверхнизкопроницаемыми коллекторами указывает на возникновение ряда проблем:

- снижение приемистости нагнетательных скважин;
- отсутствие влияния нагнетательных скважин на добывающие;
- при повышении давления закачки образование трещин автоматического гидроразрыва пласта (ГРП) и интенсивное обводнение добывающих скважин.

К основным проблемам разработки залежи нефти I–III пачки Речицкого месторождения относятся:

- низкие фильтрационно-емкостные характеристики пласта;
- быстрое снижение энергетике в зоне отбора в первый год эксплуатации скважин и, как следствие, снижение дебитов;
- наличие гидродинамической связи отложений I–III пачек петриковско-елецкого резервуара и отложений IV пачки задонского горизонта.

При планировании ячеек разработки большое внимание уделяется схеме расположения скважин относительно максимального стресса и друг относительно друга. Важнейшим фактором, оказывающим влияние на взаимодействие нагнетательных и добывающих скважин в пределах ячейки разработки, является расстояние между ними.

При проведении расчетов на гидродинамической модели (ГДМ) и для последующего выбора оптимального варианта организации системы ППД на I–III пачках межсолевой залежи Речицкого месторождения опробованы следующие возможные режимы организации ППД:

- постоянной закачки вытесняющего агента через нагнетательные скважины;
- периодических отборов и закачки в пределах ячейки ППД;
- циклической многократной эксплуатации скважин по схеме «huff-and-puff».

Под каждый режим рассмотрены разные схемы организации вытеснения:

- с параллельным расположением стволов скважин (1 : 1 – одна добывающая, одна нагнетательная; 2 : 1 – две добывающие, одна нагнетательная);
- с перпендикулярным расположением скважин (5 : 1 – 5 параллельных добывающих и 1 нагнетательная, перпендикулярная добывающим);
- с расположением стволов в крест простирания максимального стресса и параллельно простиранию максимального стресса;
- с организацией ячейки заводнения путем строительства горизонтальных и наклонно-направленных скважин.

Все горизонтальные и наклонно-направленные скважины заканчиваются многостадийным ГРП. В качестве вытесняющих агентов рассмотрены вода системы ППД, вода системы ППД с поверхностно-активными веществами (ПАВ), карбонизированная вода системы ППД, отбензиненный углеводородный газ. Нагнетание воды системы ППД с ПАВ представляет собой закачку раствора ПАВ (ОП-10, концентрация – 0,5 %) в виде оторочки с последующей продавкой минерализованной водой из системы ППД (объем оторочки – около 1–5 % порового объема участка опытно-промышленных работ (ОПР)). Нагнетание карбонизированной воды (концентрация – 5 %) проводится в виде оторочек с последующей продавкой минерализованной водой из системы ППД. Для приготовления карбонизированной воды потребуется двуокись углерода (объем оторочки – около 1–5 % порового объема участка ОПР). Нагнетание отбензиненного углеводородного газа представляет собой нагнетание сухого отбензиненного газа (метана).

В результате выполненных работ была создана тестовая ГДМ пласта (рис. 1), в основу которой легли усредненные свойства залежи I–III пачек Речицкого месторождения. На основе созданной модели был произведен расчет предложенных вариантов и режимов организации ППД и методов увеличения нефтеотдачи (МУН).

На ГДМ также оценивалась эффективность периодической закачки по технологии «huff-and-puff». В результате расчетов на тестовой модели было установлено, что наилучшей эффективностью при реализации технологии «huff-and-puff» облада-

ют газообразные агенты: углекислый газ и отбензиненный газ. Жидкие агенты (вода с ПАВ и карбонизированная вода) также показали эффективность при сравнении с базовым вариантом без закачки.

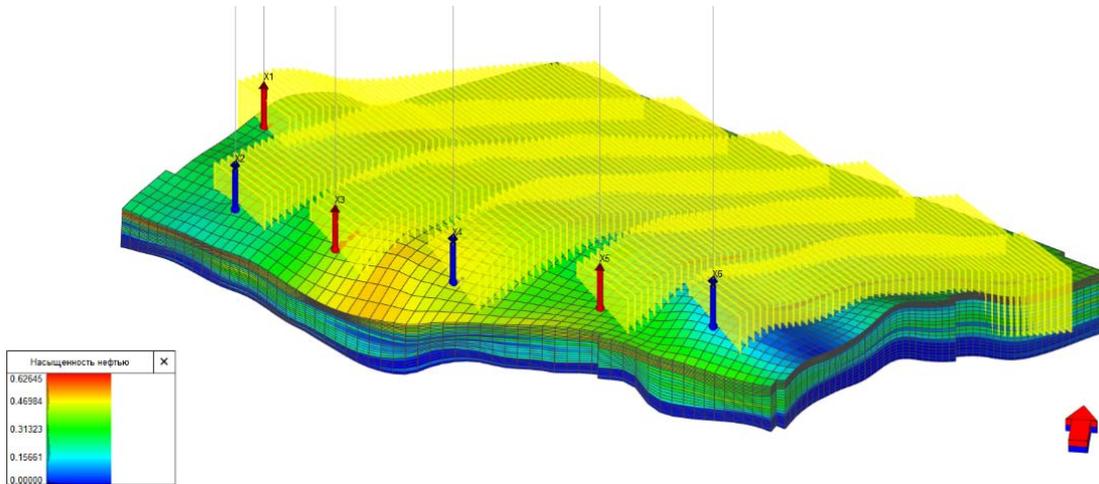


Рис. 1. Тестовая ГДМ залежи I–III пачек Речицкого нефтяного месторождения

Следующим шагом после тестовых расчетов являлся расчет подобранных под предлагаемые рабочие агенты схем расположения скважин на секторной модели залежи. Секторная модель представляет собой участок ГДМ залежи I–III пачек Речицкого месторождения с расположенными на нем фактически пробуренными скважинами. Выбор участка залежи для создания секторной модели очень важен, так как в дальнейшем данный участок будет рассматриваться как полигон для проведения ОПР по внедрению выбранной технологической схемы организации ППД и проведения МУН. Для создания секторной модели был выбран участок в юго-восточной части залежи, включающий горизонтальные скважины 418g, 411g, 41602g, 419g, 464g и 310g.

На секторной модели были просчитаны варианты, признанные наиболее эффективными по результатам расчетов на тестовой ГДМ. Всего рассчитано 6 вариантов разработки (рис. 2):

- 1) базовый (без ППД);
- 2) базовый (с ППД в скважине 310g);
- 3) вариант с закачкой воды ППД по схеме 2 : 1;
- 4) вариант с закачкой карбонизированной воды по схеме 2 : 1;
- 5) вариант с закачкой воды с оторочкой ПАВ по схеме 2 : 1;
- 6) вариант с закачкой отбензиненного газа по схеме 2 : 1.

Единственным вариантом, показавшим свою эффективность по сравнению с базовым вариантом (без ППД), является вариант с закачкой отбензиненного газа (2 : 1). Остальные варианты – с закачкой воды ППД, воды с оторочкой ПАВ, карбонизированной воды – на секторной модели получили очень схожие результаты, продемонстрировав крайнюю неэффективность. Накопленная добыча нефти по данным вариантам более чем в 2 раза ниже, чем по базовому варианту (без ППД). Причина низкой накопленной добычи нефти по вариантам с закачкой агентов на основе воды – это то, что закачиваемая вода не поступает в матрицу (поровый объем) низкопроницаемого коллектора, а движется только по трещинам, быстро достигая забоев добы-

вающих скважин и производя их обводнение. Таким образом, полезной работы по вытеснению нефти из порового объема закачиваемая вода не производит, а лишь негативно влияет на обводненность добывающих скважин. Карбонизация воды ППД и добавление в нее ПАВ никак не влияют на результат. Единственным агентом закачки, показавшим способность производить вытеснение нефти из матрицы породы и поддерживать пластовое давление, является отбензиненный газ. Накопленная добыча нефти по варианту с закачкой отбензиненного газа на 34 % превышает добычу по базовому варианту без ППД (рис. 2).

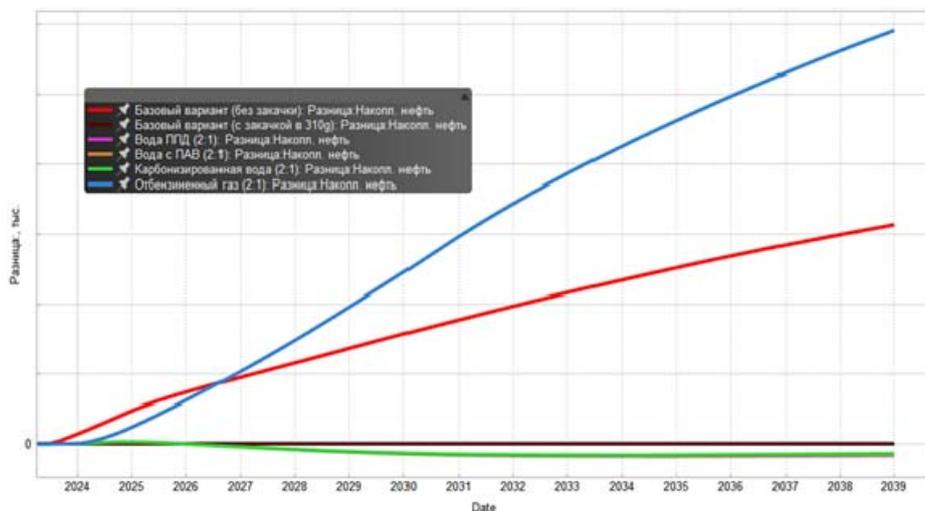


Рис. 2. Разница в накопленной добыче нефти по вариантам разработки. Результаты расчета на секторной модели I–III пачек Речицкого месторождения

Учитывая экономическую нецелесообразность закачки газа, а также принимая во внимание результаты статических и фильтрационных исследований с целью подбора химических композиций для улучшения нефтевытесняющих свойств воды в низкопроницаемых породах, рекомендуется опробовать технологию «huff-and-puff» с применением в качестве рабочего агента воды ППД. При снижении эффективности после нескольких циклов работы необходимо проведение ОПР с использованием выбранного раствора ПАВ – ОП-10 (концентрация – 0,5 %, вода затворения – минерализованная, плотностью 1,128 г/см<sup>3</sup>).

УДК 622.276(075.8)

### ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ДОБЫЧЕ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМОЙ НЕФТИ

Ш. М. Алхатиб, Н. А. Демяненко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Отмечено, что нанотехнологии зародились в начале 1980-х гг. прошлого столетия. В последнее время они завоевали популярность в нефтегазовом секторе. Это направление считается одним из самых перспективных в области повышения нефтеотдачи пластов из-за эффективного воздействия наножидкостей на увеличение нефтеотдачи трудноизвлекаемой нефти из пластов. Проведены исследования по вытеснению остаточной нефти наножидко-

стями из керновых моделей, которые показали, что можно получить дополнительный прирост нефтеотдачи до 20 % по сравнению с традиционным заводнением. Рассмотрены результаты исследований, выполненных в последнее время в области влияния наноконпозиций на увеличение нефтеотдачи пластов.

**Ключевые слова:** наночастицы, наножидкости, трудноизвлекаемые запасы нефти, повышение нефтеотдачи пластов, интенсификация добычи нефти.

## APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES IN THE EXTRACTION OF HARD-TO-RECOVER OIL

Sh. M. Alkhateeb, N. A. Demyanenko

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Nanotechnology emerged in the early 1980s. Recently, it has gained popularity in the oil and gas sector. This area is considered one of the most attractive in the field of enhanced oil recovery due to the effective impact of nanofluids on increasing the oil recovery of hard-to-recover oil from formations. Studies on the displacement of residual oil by nanofluids from core models have shown that it is possible to obtain an additional increase in oil recovery of up to 20 % compared to traditional flooding. The paper considers the results of studies carried out recently in the field of the influence of nanocompositions on increasing oil recovery.*

**Keywords:** nanoparticles, nanofluids, hard-to-recover oil reserves, enhanced oil recovery, intensification of oil production.

Нанотехнология определяется как создание функциональных материалов, устройств и систем путем управления материей на наноуровне (одна миллиардная доля метра) и использования ее новых свойств [1]. Наножидкости – это новый класс жидкостей-теплоносителей, основанный на нанотехнологиях, которые созданы путем стабильного диспергирования и суспендирования наночастиц размером 1–50 нм в обычных жидкостях-теплоносителях [2].

Небольшой размер наночастиц и большая площадь их поверхности дают им различные преимущества с точки зрения реологии, смачиваемости, поверхностных эффектов и вытеснения остаточной нефти. Они также часто характеризуются высокими способностями к эмульгированию и растворению и являются термодинамически стабильными соединениями. Поэтому при добавлении наночастиц в жидкость, которая будет закачиваться в пласт для вытеснения нефти, изменяются свойства вытесняющей жидкости (увеличивается ее вязкость, снижается поверхностное натяжение на границе раздела фаз, изменяется смачиваемость породы с гидрофобной на гидрофильную). Вязкость вытесняющей жидкости приближается к вязкости пластовой нефти, что предотвращает быстрое продвижение закачиваемой жидкости по наиболее проницаемым зонам и способствует выравниванию фронта вытеснения.

Снижение поверхностного натяжения на границе раздела фаз и изменение смачиваемости пород содействуют уменьшению давления закачки вытесняющих жидкостей. Увеличивается способность двигаться пленочной и капиллярной нефти, поскольку наножидкость легко проникает в пространство мелких nanopores. Хороший эффект возникает даже в условиях чрезвычайно низкой проницаемости коллекторов (0,1–1 мД), что позволяет преодолеть проблемы, с которыми сталкиваются традиционные методы повышения нефтеотдачи пластов [3, 4], Тип, размер и концентрация наночастиц влияют на свойства приготовленных наножидкостей, эффективность и результативность вытеснения нефти, а также на конечный результат вытеснения.

В нефтегазовой промышленности для приготовления наножидкостей исследованы наночастицы оксидов металлов, металлов, углеродные нанотрубки и магнитные наночастицы [3].

Стабильная гомогенная дисперсия наночастиц или их суспензия в жидкостях-носителях (пресной, соленой, морской воде, растворах полимеров, гликолях или спиртах) имеет решающее значение для производства высококачественных наножидкостей и является одним из основных требований для успешного использования наноконкомпозитов для нефтеотдачи пластов [5, 6]. При равномерном осаждении наночастиц на поверхности пор породы изменяются ее свойства, что способствует отрыву остаточных пленок нефти и движению вала нефти к добывающим скважинам. При агрегации наночастиц образуются более крупные конгломераты, что вызывает закупорку мелких пор, приводит к увеличению давления закачки, снижению эффективности вытеснения. Дисперсионная стабильность наночастиц зависит от природы самих наночастиц, солености используемых закачиваемых жидкостей, значения pH этих жидкостей, а также магнитных свойств и электростатического отталкивания между частицами.

Наночастицы уменьшают шероховатость поверхности породы путем адсорбции на ней, образуя более обтекаемые поровые пространства, которые облегчают движение молекул нефти и уменьшают давление закачки. Этот слой является гидрофобным и предотвращает прилипание воды к поверхности породы, снижая сопротивление потоку воды и предотвращая набухание глинистых частиц в слое, не допуская тем самым закрытие пор, а также помогает снижению поверхностного натяжения между нефтью и водой, что способствует удалению остатков нефти из каналов фильтрации.

Механизм действия наноконкомпозитов на пленки нефти, покрывающие стенки каналов фильтрации, можно объяснить следующим образом: частицы агрегируются и образуют клиновидный слой в зоне трехфазного контакта капля нефти, наножидкости и поверхности пор породы. Эта сборка приводит к образованию силы, которую можно сравнить с вершиной клиновидной пленки (скользящей пленки), называемой давлением структурного разделения, поскольку наночастицы в верхней части головки постоянно выталкиваются вперед. Капля нефти отделяется от поверхности пор породы и выбрасывается под действием капиллярной силы (рис. 1).



Рис. 1. Схема уменьшения поверхностного натяжения между наножидкостью, нефтью и породой

Исследования по извлечению остаточной нефти с использованием наножидкостей показали, что с увеличением концентрации наночастиц в наножидкостях вязкость нефти и содержание асфальтенов в получаемой нефти уменьшались, и их значения постепенно становились ниже значений в исходной нефти. Это связано с тем,

что наночастицы могут поглощать асфальтены в сырой нефти. Также результаты исследований показали, что оптимальная концентрация наночастиц составляет 10 частей на миллион. Увеличение концентрации введенных в наножидкость наночастиц может засорить поровое пространство из-за их агрегации и образования крупных соединений, что приведет к снижению извлечения нефти. Таким образом, при планировании мероприятий по повышению нефтеотдачи с наножидкостями необходимо подбирать оптимальную концентрацию наночастиц, чтобы они выполняли свою задачу, не влияя на петрофизические свойства нефтяного пласта.

В результате экспериментов было определено, что периодическая (циклическая) подача наносоединений вместе с другими закачиваемыми жидкостями, такими как соленая вода, приводит к сокращению потребления наносоединений и, таким образом, к снижению стоимости процесса производства и повышению эффективности вытеснения по сравнению с постоянной непрерывной закачкой наножидкостей, которая требует большого количества наносоединений.

На сегодняшний день самые последние исследования сосредоточены на совместном введении наносоединений с поверхностно-активными веществами. В ходе исследований установлено, что совместное воздействие жидкостей является более сильным и эффективным в снижении поверхностного натяжения и изменении смачиваемости породы в продуктивном пласте. А это, в свою очередь, приводит к увеличению извлечения нефти до 20 % [3]. Кроме того, сейчас разрабатываются магнитные наносоединения, которые активируются при применении магнитного поля, что повышает их подвижность и эффективность в пласте.

В настоящее время исследования в использовании нанотехнологий в области добычи нефти становятся современным направлением в повышении нефтеотдачи пластов, которое доказало свою эффективность в увеличении извлечения трудноизвлекаемой нефти. Однако при этом необходимы дальнейшая обширная исследовательская работа для производства менее дорогих и экологически чистых наносоединений и более глубокое определение типов, размеров и оптимальных концентраций соединений для целевого пласта. Также следует расширять исследования магнитных наносоединений, учитывая их будущую важную роль в добыче нефти.

#### Литература

1. Shidong, Li. A coreflood investigation of nanofluid enhanced oil recovery / Li Shidong, Ole Torsæter, Luky Hendraningrat // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2013. – DOI 10.1016/j.petrol.2013.07.003
2. Stephen, U. S. Choi. Nanofluids: From Vision to Reality Through Research / U. S. Choi Stephen // *American Society of Mechanical Engineers*. – 2009. – DOI 10.1115/1.3056479
3. A review of nanomaterials and their applications in oil & petroleum / D. Kabra, G. Pareek, K. Kumari, A. Roy // *Nano Express*. – 2023. – DOI 10.1088/2632-959X/acdc40
4. Pryazhnikov, M. I. Numerical study of the mechanisms of enhanced oil recovery using nanosuspensions / M. I. Pryazhnikov, V. A. Zhigarev, A. V. Minakov // *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Research Gate. – 2021. – DOI 10.1007/s00162-021-00569-9
5. Morteza Dejam. Comprehensive experimental study on the effect of silica nanoparticles on the oil recovery during alternating injection with low salinity water and surfactant into carbonate reservoirs / Morteza Dejam, Saheed Olawale Olayiwola // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – DOI 10.1016/j.molliq.2020.115178
6. Potential application of low-salinity polymeric-nanofluid in carbonate oil reservoirs: IFT reduction, wettability alteration, rheology and emulsification characteristics / Y. Kamal, Odisho Kolo, Abbas Khaksar, Manshad agar A. Ali // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – DOI 10.1016/j.molliq.2019.04.053

УДК 550.3:622.276.4(476)

**ВОЗМОЖНОСТИ ОТКРЫТОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ  
СИСТЕМЫ QGIS НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА  
РАБОТ ПО МОНИТОРИНГУ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ  
ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА**

**Т. А. Климов, А. П. Марковский**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Отмечено, что в рамках выполнения работ по мониторингу микросейсмических событий при гидроразрыве пласта одним из важных начальных этапов является проектирование систем наблюдения и сопровождение проекта полевых работ, который включает в себя необходимость расстановки большого количества сейсмических датчиков (1000–1200 приборов). Указано, что ключевым в процессе проектирования становится привлечение информации о поверхностных условиях и техногенной нагрузке (актуальность карт-подложек различного типа). Рассмотрены возможности использования геоинформационной системы QGIS в проектировании систем регистрации для мониторинга микросейсмических событий при гидроразрыве пласта.*

**Ключевые слова:** мониторинг микросейсмических событий, гидроразрыв пласта, геоинформационная система, QGIS.

**OPEN GEOINFORMATION SYSTEM QGIS CAPABILITY  
ON THE EXAMPLE OF DESIGNING AND ANALYSIS  
OF WORKS ON MICROSEISMIC MONITORING DURING  
HYDRAULIC FRACTURING**

**T. A. Klimov, A. P. Markovsky**

*BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*As part of the work on microseismic monitoring during hydraulic fracturing, one of the important initial stages is the design of systems for monitoring and supporting the field work project, which includes the need to deploy a large number of seismic sensors (1000–1200 devices). The key to the design process is the involvement of information on surface conditions and manmade loads (the relevance of various types of base maps). The presented work considers the possibilities of using the QGIS geoinformation system in the design of recording system for microseismic monitoring during hydraulic fracturing.*

**Keywords:** microseismic monitoring, hydraulic fracturing, geoinformation system, QGIS.

В настоящее время основой геоинформационной системы (далее – ГИС) в геологическом направлении предприятия является MapInfo Pro 15 (актуальная версия MapInfo Pro 21). Использование данной ГИС в проектировании системы регистрации мониторинга микросейсмических событий (МСМ) занимало более двух рабочих дней и не позволяло загружать карты-подложки.

Решение задачи выбора мест установки приборов регистрации (сейсмоприемников) возможно было с использованием актуальной информации о местности проведения работ МСМ. Для этого необходим доступный программный продукт, который позволил бы решить эту задачу и упростить процесс проектирования.

В настоящее время существует большое количество геоинформационных систем для проектирования: MapInfo, SAGA GIS, QGIS, Global Mapper, ArcGIS, Surfer, Cardcorp, FME, Carto и т. д. Одним из перспективных программных продуктов мож-

но считать QGIS. В последнее время QGIS, так же как и ArcGIS и MapInfo, является одной из наиболее популярных геоинформационных систем (рис. 1). Преимущество QGIS в сравнении с двумя другими состоит в том, что программный продукт – свободный (открытый), имеет архитектуру на основе актуальных технологии, развитую систему доступа к данным.

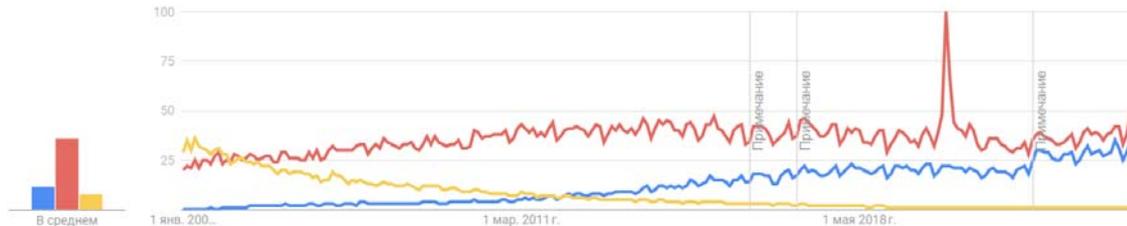


Рис. 1. Статистика запросов по данным Google

Использование ГИС QGIS предоставляет доступ к актуальным картам-подложкам для проектирования систем наблюдения МСМ, а также имеет функционал, расширяющий возможности анализа и визуализации результатов МСМ.

Карты-подложки добавлять можно из карт-сервисов: ESRI, Google maps, OpenStreetMap (OSM), Yandex Satellite, USGS и др. Для добавления подложки на рабочем компьютере должна присутствовать сеть Интернет.

Применение QGIS в проектировании системы регистрации для МСМ сократило время проектирования до нескольких часов.

Программный продукт QGIS функционирует на рынке с 2002 г., являясь свободным и кроссплатформенным, позволяет постоянно улучшать функционал для применения в различных направлениях деятельности и остается привлекательным в широком сообществе пользователей, в том числе имеется возможность в получении квалифицированной помощи.

Состоит QGIS из настольной и серверной части. QGIS Desktop – настольная ГИС для создания, редактирования, визуализации, анализа и публикации геопространственной информации. Называя QGIS, часто имеют в виду именно QGIS Desktop.

Системы QGIS Server и QGIS Web Client – серверные приложения для публикации в сети проектов, созданных в QGIS Desktop, через сервисы, совместимые с OGC-стандартами (например, WMS и WFS) [1].

Пакет QGIS позволяет использовать большое количество распространенных ГИС-функций, обеспечиваемых встроенными инструментами и модулями. Применение пакета QGIS предоставляет следующие преимущества:

- наличие единой базы плагинов, которые легко устанавливаются и способны значительно ускорять решение задач проектирования;
- широкий спектр загрузки форматов данных;
- перепроецирование систем координат;
- обработка и анализ растровых данных;
- экспресс-доступ к космоснимкам и моментальное добавление подложки для проектирования;
- интеграция с другими системами и расширяемость;
- 3D-визуализация результатов;

- использование языка программирования Python;
- работа с базами данных и Web-ГИС;
- возможность создания динамического макета, который можно распечатать или вывести в любом формате для чтения на другом компьютере.

Использование базы плагинов позволяет расширять возможности программного продукта и способствует проведению анализа полученных результатов.

Примером анализа может служить исследование пространственно-временного характера развития микросейсмической эмиссии во времени. Выполняется создание анимации тепловой карты во времени, где в качестве параметра значений используется соотношение сигнал/шум микросейсмических событий. Этот анализ позволяет судить, каким образом происходило развитие области стимулирования при гидроразрыве пласта (ГРП) и помогает анализировать микросейсмические события в зависимости от задаваемых граничных условий. В качестве параметров используются координаты микросейсмических событий, соотношение «сигнал/шум», удаления от зоны инициации, время возникновения и т. д. В результате получаем выборки значений.

Широкие возможности загрузки форматов данных обеспечивают использование информации различных форматов данных, таких как TXT, CSV, Shapefile, GeoJSON, KML, DXF, PostGIS, Tab и др. [2], дают возможность загружать информацию из других программных продуктов, а также подключать базы данных, при этом сокращая время загрузки данных и проектирования системы регистрации. Основная причина, из-за которой актуально использование подложек, – это выбор мест, наиболее удаленных от источников техногенного шума. К таким источникам можно отнести станки-качалки, трубопроводы, технологические сооружения, автотрассы и др.

При мониторинге микросейсмических событий снижение шумовой составляющей в общем сигнале играет важную роль. Это связано с тем, что величина полезного сигнала меньше фонового шума. При наличии 3D-сеймики в районе проведения работ по МСМ используют тепловые карты шумов, которые возможно строить в QGIS (рис. 2). Определяется среднее значение шумов за период в несколько месяцев, и можно разделять карты на дневные и ночные. Однако предпочтительнее проводить работы по МСМ в ночное время, потому что в данный период суток шумовой фон снижен, а приборы необходимо устанавливать в наиболее тихих зонах.



Рис. 2. Проектирование системы наблюдения с использованием тепловых карт

В настоящее время в современных ГИС получило распространение использование языка программирования Python. Данная возможность также реализована в QGIS, где команды прописываются в терминале QGIS, что позволяет автоматизировать процесс проектирования, с помощью написанных скриптов создавать стандартные объекты геометрии, например, устья, инклинометрия, контуры системы расстановки, стили оформления и др.

Систему QGIS можно использовать для решения широкого круга оперативных задач в проектировании и обмене наборов данных между структурными подразделениями в процессе производственной деятельности, для проектирования и контроля работ по МСМ, при проведении сейсморазведочных работ, выделении эксклюзивных зон, где невозможно провести сейсморазведочные работы, при необходимости смещения проектных пунктов приема и возбуждения, проектировании площадок ВСП–НВСП.

#### Л и т е р а т у р а

1. QGIS – геоинформационная система. – URL: <https://redos.red-soft.ru/base/arm/arm-other/qgis/> (дата обращения: 10.04.2024).
2. Supported Data Formats. – URL: [https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user\\_manual/working\\_with\\_vector/supported\\_data.html](https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user_manual/working_with_vector/supported_data.html) (дата обращения: 10.04.2024).

УДК 622.276.63

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ И ПЛЕНОЧНЫХ НЕФТЕЙ ИЗ ПРИРОДНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НА ЗАВЕРШАЮЩЕЙ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ)**

**Ш. М. Алхатиб, Н. А. Демяненко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Показано, что большая часть мировых запасов нефти (более 70 %) находится в месторождениях, истощенных после вторичной стадии эксплуатации с использованием закачки воды для вытеснения нефти. Отмечено, что известные методы, широко применяемые для повышения нефтеотдачи пластов, не позволяют достичь желаемых результатов по извлечению максимально возможного количества нефти из разрабатываемых залежей. Поэтому для повышения эффективности выработки запасов нефти необходимы новые методы и технологии. Рассмотрены результаты исследований, направленных на воздействие на запасы капиллярно-защеленных нефтей и нефтяных пленок на стенках каналов фильтрации, оставшихся в пластах после заводнения, закачкой композиций поверхностно-активных веществ.*

**Ключевые слова:** третичные методы добычи нефти, поверхностно-активные вещества, композиции ПАВ, увеличение добычи нефти.

### **DEVELOPMENT OF METHODS FOR EXTRACTING TRAPPED AND FILMY CAPILLARY OILS FROM RESERVOIRS IS IN THE FINAL STAGE OF DEVELOPMENT (USING SURFACTANTS)**

**Sh. M. Alkhateeb, N. A. Demyanenko**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Most of the world's oil reserves (more than 70 %) are located in fields depleted after the secondary stage of extraction by water injection. Known extraction methods, widely used*

*to enhance oil recovery, do not allow achieving the desired results in extracting the maximum possible amount of oil. Therefore, new methods and technologies are needed to improve the efficiency of oil extraction. This paper examines the results of studies aimed at influencing the reserves of capillary-trapped oils and oil films on the walls of filtration channels remaining in the formations after water flooding by injecting surfactant compositions.*

**Keywords:** tertiary oil recovery methods, surfactants, surfactant compositions, increased oil recovery.

Большинство нефтенасыщенных пород в результате их длительного контакта с нефтью на протяжении миллионов лет становятся пропитанными нефтью. Образуется гидрофобная нефтяная пленка, покрывающая стенки пор, которую трудно разрушить и извлечь нефть с помощью традиционных методов вытеснения. Для извлечения этих запасов и изолированных резервов внутри узких пор, к которым трудно добраться, необходимо снизить поверхностное натяжение на границе «нефть – вода – порода» и удалить нефть, прилипшую к внутренним стенкам породы («нефтяную пленку»). Для этого следует изменить смачиваемость породы с гидрофобной на гидрофильную. Последнего можно достичь путем использования вытесняющих жидкостей, содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Поверхностно-активные вещества – это химические вещества, добавляемые в жидкость, которая закачивается в пласт в определенных концентрациях, в зависимости от природы вещества и характеристик как нефти, так и пластовых пород, для стимулирования добычи и улучшения процессов извлечения остаточной нефти. По классификации Международной организации по стандартизации (ISO) все ПАВ подразделяются на анионные, катионные, неионогенные и амфотерные [1]. Эффективность каждого ПАВ и его влияние на увеличение нефтеотдачи зависят от типа пород-коллекторов, взаимодействия этого вещества с пластовыми жидкостями, неоднородности пористой среды, природы адсорбции ПАВ на поверхности твердых пород («ионной силы»), рН среды, температуры пласта, концентрации активного вещества и поляризации ионов [2]. Основные компоненты сырой нефти, ответственные за изменения смачиваемости пород-коллекторов, – это те, которые содержат заряженные группы, такие как кислоты и щелочные соединения. Карбонатные породы обычно имеют положительный поверхностный заряд, поэтому они обладают большей аффинностью к кислотным компонентам сырой нефти, тогда как отрицательно заряженная поверхность песчаников делает их более аффинными к щелочным компонентам сырой нефти.

Катионные ПАВ могут изменить смачиваемость гидрофобной поверхности карбонатных пород в сторону более гидрофильного состояния за счет образования ионных пар между катионными головными группами и отрицательно заряженными карбоксильными группами, адсорбированными на поверхности пород-коллекторов. Анионные ПАВ – более эффективны, чем катионные, в изменении смачиваемости песчаников в сторону гидрофильного состояния, поскольку тогда происходит электростатическое взаимодействие между ионными головными группами молекул ПАВ и положительно заряженными основными компонентами сырой нефти, адсорбированными на поверхности песчаника. В этом случае ионные пары изменяют смачиваемость в сторону более гидрофильного состояния (рис. 1 и 2).

Изменение смачиваемости пород измеряется путем измерения угла смачивания, который представляет собой угол между системой «газ – жидкость» и твердой поверхностью. В системе «вода – нефть – порода» породы являются водосмачивае-

мыми (гидрофильными), когда угол контакта между каплей воды и твердого тела находится в диапазоне от 0 до 75°, гидрофобно-гидрофильными – при углах от 75 до 105°, и гидрофобными – при углах от 105 до 180° [3].

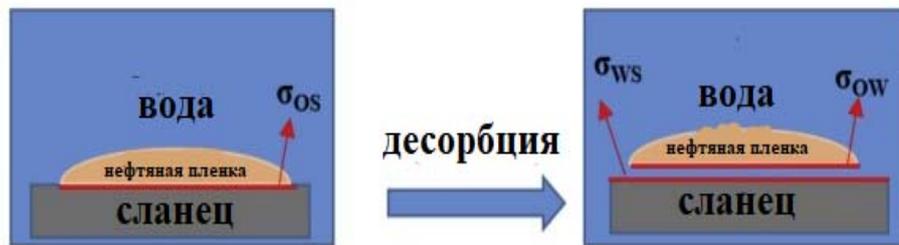


Рис. 1. Иллюстрация добавления ПАВ к гидрофобной породе, показывающая удаление слоя нефти с поверхности породы за счет образования устойчивого слоя воды между поверхностью породы и слоем нефти



Рис. 2. Иллюстрация добавления ионных ПАВ к гидрофобной породе, показывающая, как электростатические взаимодействия способствуют отделению нефти от поверхности породы и изменению смачиваемости

Эксперименты по измерению угла контакта показывают, что угол контакта в системах «порода – нефть – вода» уменьшается по мере добавления большего количества ПАВ, и смачиваемость пород увеличивается за счет адсорбции ПАВ.

В экспериментах, проведенных Альваресом и другими учеными, было установлено, что анионные ПАВ оказывают лучшее влияние на изменение смачиваемости по сравнению с неионогенными и катионными ПАВ, однако механизм изменения смачиваемости анионных ПАВ имеет временную задержку [4, 5]. Эксперименты также показали, что использование ПАВ помогает снизить поверхностное натяжение на границе «нефть – вода – порода». Было доказано, что с увеличением концентрации ПАВ в растворе поверхностное натяжение уменьшается, а фазовая проницаемость нефти увеличивается, в то время как фазовая проницаемость воды остается практически постоянной. При этом коэффициент извлечения нефти увеличивается до 70–80 %, что на 29–40 % выше, чем в случае отсутствия ПАВ в закачиваемой жидкости (например, вода без добавления ПАВ).

Таким образом, добавление ПАВ оказывает значительное положительное влияние на извлечение остаточной нефти из пласта за счет воздействия на поверхностное натяжение на границе «нефть – вода – порода» и изменения смачиваемости пород с гидрофобной на гидрофильную.

Поверхностно-активные вещества подвергаются всестороннему анализу перед их использованием в экспериментальных условиях. Один из аспектов – техническая осуществимость производства ПАВ, что требует детального изучения адсорбции и кинетики на породах пласта. Кроме того, перед планированием ПНП с ПАВ проводится анализ затрат и выгод, учитывающий текущую цену на сырую нефть и цену продажи ПАВ в зависимости от объема добычи нефти, который можно достичь с помощью ПАВ.

Синтетические ПАВ, такие как SDS, Tween-80 и Triton X-100, широко используемые в химических технологиях увеличения нефтеотдачи, производятся путем этоксилирования. Поскольку оксид этилена (ЕО) реагирует с фенолом и спиртами, опасность связана с высокой реакционной способностью и термической нестабильностью ЕО, а также с возможностью образования 1,4-диоксана, известного канцерогена. Поэтому продолжаются поиск и исследования экологически чистых природных ПАВ.

#### Литература

1. Experimental study of wettability alteration and spontaneous imbibition in Chinese shale oil reservoirs using anionic and nonionic surfactants / L. Junrong, J. James, B. Shenga [et al.]. – Texas, USA, 2019.
2. Mehdi, S. Mechanistic Study of Wettability Alteration Using Surfactants with Applications in Naturally Fractured Reservoirs / S. Mehdi. – Kansas, 2008.
3. Monday, O. M. Adsorption of Natural Surfactant on Sandstone in Enhanced Oil Recovery: Isotherms and Kinetics Studies / O. M. Monday // Open Journal of Applied Sciences. – Baku, Azerbaijan, 2023.
4. Anderson, W. Wettability Literature Survey. – Part 2: Wettability Measurement, W. Anderson, J. Pet // Society of Petroleum Engineers, 1986.
5. Alvarez, J. O. Improving oil recovery in the Wolfcamp unconventional liquid reservoir using surfactants in completion fluids / J. O. Alvarez, D. S. Schechter // Journal of Petroleum Science and Engineering. – Texas, USA, 2017.

УДК 666.9

### **ПОЛУЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ**

**К. Ф. Мархотко**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Рассмотрены вопросы разработки комплексного минерального состава компонента тампонажного материала, позволяющего получить тампонажный раствор пониженной плотности без потери механических свойств цементного камня.*

**Ключевые слова:** тампонажный раствор, сульфферрит, техногенное сырье, плотность, синтез.

### **OBTAINING A COMPLEX MINERAL ADDITIVE FOR CEMENTING SOLUTIONS**

**K. F. Marhotko**

*BelNIPIneft RUE “Production association “Belorusneft”, Gomel*

*This work involves the development of a mineral composition – a component of the cementing material, which allows obtaining a low-density cementing solution without loss of the mechanical properties of the cement stone.*

**Keywords:** cement slurry, sulfoferrite, technogenic raw materials, density, synthesis.

Основными объектами освоения на нефтяных месторождениях Республики Беларусь являются залежи в межсолевых и подсолевых отложениях. Для эксплуатации таких объектов часто конструкции скважин предусматривают спуск эксплуатационных колонн на глубины более 3500 м. Цементирование эксплуатационной колонны в таких условиях с использованием тампонажного раствора нормальной плотности может привести к самопроизвольному гидроразрыву пласта с последующим поглощением тампонажного раствора. Для предупреждения таких технологических происшествий в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» при цементировании в настоящее время применяется технология цементирования двухступенчатым способом, однако любая технологическая оснастка несовершенна и может привести к аварии вследствие ее отказа. Поэтому разработка и совершенствование составов тампонажных материалов, обладающих специальными свойствами, позволяющих выполнить качественное цементирование скважин сложной конструкции, является важной производственной задачей.

В данной работе рассматриваются результаты проведенных исследований, направленных на разработку комплексного минерального состава – компонента тампонажного материала, дающего возможность получить тампонажный раствор пониженной плотности без потери механических свойств цементного камня. Применение в составе тампонажного цемента данного компонента позволит осуществлять цементирование эксплуатационных колонн в одну ступень.

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

- произведен поиск техногенного сырья, потенциально пригодного к использованию в составе тампонажных материалов;
- определены условия синтеза комплексного минерального состава и его свойства;
- разработана рецептура тампонажного материала, содержащего комплексный минеральный состав, исследованы состав и структура цементного камня, изучено влияние комплексного минерального состава на основные физико-технологические и механические свойства смесевых композиций.

На основании проведенных исследований получена комплексная минеральная добавка заданных параметров, включение которой в рецептуру цемента позволяет получить тампонажный раствор пониженной плотности ( $1750 \text{ кг/м}^3$ ), без потери механических свойств цементного камня. Кроме того, разработанный комплексный минеральный состав позволяет вовлечь в использование техногенное сырье Беларуси и частично будет способствовать решению экономических и экологических проблем предприятий. Материалы по химическому, гранулометрическому и фазово-минералогическому составу используемые в комплексной минеральной добавке, представляют собой отходы, идентичные природному минеральному сырью. Состав сырья для приготовления добавки включает:

- карьерный мел, ОАО «Красносельскстройматериалы»; состав:  $\text{CaCO}_3$  – 96 %, примеси – 4 %;
- шлам станций обезжелезивания воды; состав:  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  – 88,6 %, примеси – 11,4 %;
- фосфогипс, ОАО «Гомельский химический завод»; состав:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 96 %, примеси – 4 %;
- обеленные земли, ОАО «Бобруйский завод растительных масел»; состав:  $\text{SiO}_2$  – 74 %, примеси – 26 %.

## 126 Секция 6. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений

Процесс производства сульфоферритного компонента в составе добавки состоит из следующих основных технологических стадий:

– пластическое перемешивание сырьевых компонентов в двухвальном смесителе ( $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

– грануляция сырьевой смеси ( $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

– сушка гранул сырьевой смеси в барабанной сушилке ( $t = 105 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

– обжиг гранул во вращающейся печи ( $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

– помол обожженных гранул в трубной мельнице.

Диатомит получен путем обжига обеленных земель, отхода производства растительных масел при температуре обжига  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  до полного выгорания органических примесей.

Проведено исследование следующих рецептов тампонажного раствора плотностью  $1750\text{ кг/м}^3$  (табл. 1).

Таблица 1

Состав тампонажного раствора

Компонент смеси	Содержание компонента, % (состав А)	Содержание компонента, % (состав Б)	Содержание компонента, % (состав В)	Содержание компонента, % (состав Г)	Контроль без добавки
ПЦТ-1-Г	56,25	54,1	51,6	46,6	58,8
Комплексная добавка	6,25	9,6	12,9	20	0
Вода соленасыщенная	37,5	36,3	35,5	33,4	41,2

Испытания проводились для устьевых ( $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 0,1\text{ МПа}$ ), забойных ( $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 25\text{ МПа}$ ) термобарических условий. Технологические параметры прочность на сжатие и объемное изменение цементного камня даны в табл. 2. Прочность на сжатие определялась разрушающим методом контроля п. 14.5 ISO 10426-3-2003 [3]. Объемное расширение – изменением фактического объема цементного камня согласно ISO 10426-5-2004 [3].

Таблица 2

Технологические параметры цемента

Термобарические условия проведения испытаний		Наименование показателей	Значения				
			Контроль	Состав А	Состав Б	Состав В	Состав Г
$T, ^{\circ}\text{C}$	$P, \text{ МПа}$						
25	0,1	Растекаемость, мм	250	235	235	230	215
		Объемное расширение через 24 ч, %	-4,5	-2,3	-1,2	0,2	-0,6
		Прочность через 24 ч, МПа	14,4	16,2	14,3	15,9	13,4
		Прочность через 72 ч, МПа	21,2	19,8	18,9	20,3	19,2

Термобарические условия проведения испытаний		Наименование показателей	Значения				
			Контроль	Состав А	Состав Б	Состав В	Состав Г
T, °C	P, МПа						
60	28	Растекаемость, мм	250	235	235	230	215
		Объемное расширение через 24 ч, %	-7,8	-5,3	-2,1	0	-1,4
		Прочность через 24 ч, МПа	17,7	19,5	18,2	21,3	17,8
		Прочность через 72 ч, МПа	23,0	22,4	21,5	25,2	23,6

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование состава В в тампонажном растворе позволяет получить безусадочный цемент пониженной плотности с сохранением механических характеристик.

Новизна разработки заключается в получении облегчающей добавки для тампонажного раствора, пригодного для цементирования эксплуатационных колонн. В настоящее время в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» облегченные тампонажные растворы не применяются при цементировании эксплуатационных колонн из-за высокой стоимости, отсутствия технологичности (требуемых механических свойств цементного камня).

#### Л и т е р а т у р а

1. Патент RU 2232731, МПК 7 С 04 В 7/02. Безусадочный цемент : № 2001123471/03 : заявлено 23.08.2001 : опубл. 20.07.2004 / Осокин А. П., Пушкарев И. С., Сивков С. П., Энтин З. Б. ; заявители и патентообладатели : Осокин А. П., Пушкарев И. С., Сивков С. П., Энтин З. Б. – 3 с.
2. Исследование адсорбционно-структурных свойств природных и обработанных диатомитов / Г. Г. Мартиросян, А. Г. Манукян, Э. Б. Овсепян, К. А. Костанян // Прикладная химия. – 2003. – Т. 76, № 4. – С. 551–555.
3. Международный стандарт. Промышленность нефтяная и газовая. Цементы и материалы для цементирования скважин : ISO 10426.

УДК 622.276

### ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАБОТКАХ ГОРЯЧЕЙ ВОДОЙ НА СКВАЖИНАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

В. С. Горбаченко<sup>1</sup>, Н. А. Демяненко<sup>2</sup>, М. А. Лопушко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель

<sup>2</sup>Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Представлены результаты измерения температуры жидкости в насосно-компрессорных трубах при проведении обработок скважин горячей водой от асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) и их эффективность. С помощью корреляционного анализа выделены основные критерии, влияющие на степень прогрева добываемой жидкости, и предложены рекомендации по повышению эффективности применяемых методов борьбы с АСПО.

**Ключевые слова:** АСПО, методы борьбы с АСПО, обработки горячей водой.

## THERMAL IMPACT DURING HOT WATER PROCESSING IN WELLS OF THE PRIPYAT DEPOSITS

V. S. Gorbachenko<sup>1</sup>, N. A. Demyanenko<sup>2</sup>, M. A. Lopushko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BelNIPIneft RUE "Production association "Belorusneft", Gomel

<sup>2</sup>Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

*The paper presents the results of measuring the temperature of liquid in tubing during well treatments with hot water from ASPD and their effectiveness. Using correlation analysis, the main criteria influencing the degree of heating of the produced liquid are identified, and recommendations are proposed to improve the effectiveness of the methods used to combat ASPD.*

**Keywords:** asphalt resin paraffin deposits, ASPD, methods of combating ASPD.

Наиболее распространенным осложняющим фактором при добыче нефти на месторождениях Припятского прогиба является образование асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО). Это вызывает необходимость внеплановых ремонтов для замены насосного оборудования, что сокращает межремонтный период, снижает добычу нефти и увеличивает затраты. Цель данной работы – изучение термического воздействия на столб жидкости в насосно-компрессорных трубах в процессе добычи нефти при обработке горячей водой с расходом 14 м<sup>3</sup>/ч.

Наиболее распространенным методом удаления АСПО для скважин месторождений Припятского прогиба является технологические обработки (ТО) горячей водой. Это связано с тем, что горячая вода на белорусском нефтегазодобывающем предприятии получается в процессе охлаждения электрогенерирующих установок, и основные расходы при проведении ТО горячей водой связаны только с использованием технологического транспорта и необходимого обслуживающего персонала.

Частота проведения технологических обработок горячей водой во многом зависит от качества удаления АСПО при предыдущей обработке. Поэтому исследование эффективности удаления АСПО при технологических обработках горячей водой является важной задачей. Понимание эффективности таких обработок позволит оптимизировать объемы закачиваемой горячей воды и периоды обработок. Воздействие горячей водой считается эффективным, если после ТО в насосно-компрессорных трубах (НКТ) через внутренний проточный канал свободно проходит шаблон диаметром 42 мм.

Рассматриваемые исследования проведены на 7 скважинах. На рис. 1 представлены графики изменения температуры жидкости в НКТ на скважине № 50 Чкаловского месторождения. Эксплуатация данной скважины ведется при помощи УЭЦН5-50-2750, глубина спуска установки – 2819 м. Температура погружного электродвигателя в процессе работы УЭЦН составляет 85 °С, дебит – 50 м<sup>3</sup>/сут, условный диаметр эксплуатационной колонны – 146 мм.

Результаты измерений температуры жидкости в НКТ по всем исследуемым скважинами показали, что на глубине 10 м от дневной поверхности температура изменяется в пределах от 63 до 68 °С, а прирост температуры варьирует в интервале от 40 до 48 °С. На глубине 300 м  $T_{300}$  температура изменяется в пределах от 51 до 58 °С, а прирост температуры  $dT_{300}$  составляет 21–35 °С. На глубине 500 м  $T_{500}$  изменяется в пределах от 44 до 53 °С, а  $dT_{500}$  – 7–26 °С. На глубинах более 300 м увеличивается разница между приращениями температур.

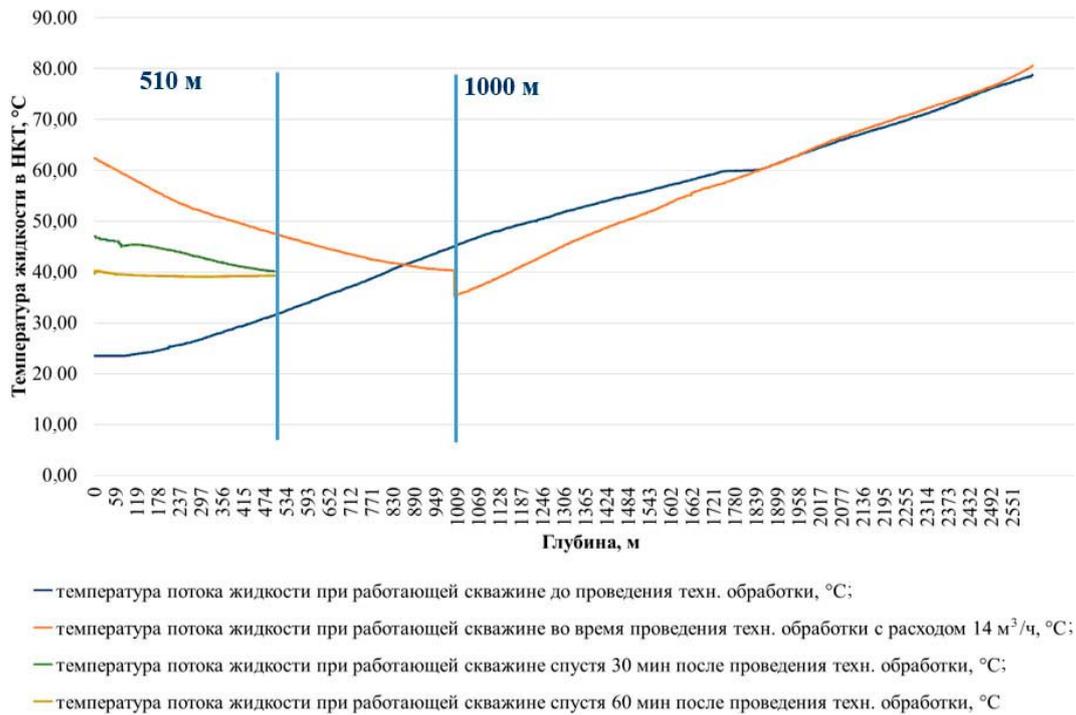


Рис. 1. Изменение температуры жидкости в НКТ при проведении технологической обработки на скважине № 50 Чкаловского месторождения

Для определения факторов, влияющих на величину прогрева (приращение температуры) столба жидкости в НКТ на глубине 500 м, рассмотрены переменные факторы, описывающие теплофизические процессы при передаче тепловой энергии от закачиваемой горячей воды, а именно: диаметр эксплуатационной колонны, дебит скважины и обводненность добываемого флюида.

Для установления взаимосвязи между приращением температуры на глубине 500 м, дебитом, обводненностью и диаметром эксплуатационной колонны применялся выборочный коэффициент корреляции Пирсона [1]. В таблице представлены результаты корреляционного анализа.

#### Результаты корреляционного анализа

Фактор	Коэффициент корреляции	<i>p-value</i>
Дебит, м³/сут	-0,167	0,720
Наружный диаметр эксплуатационной колонны, мм	0,277	0,548
Обводненность, ед.	-0,789	0,035

Результаты корреляционного анализа позволили выявить следующее:

1. Коэффициент корреляции между обводненностью и увеличением температуры на глубине 500 м составил  $r = -0,789$ , что указывает на сильную отрицательную корреляцию. Значение *p-value* равно 0,035, что ниже порогового уровня  $\alpha = 0,05$ , подтверждая значимость этого фактора.

2. Анализ корреляции между дебитом, диаметром эксплуатационной колонны и увеличением температуры на глубине 500 м не выявил статистически значимой взаимосвязи. Коэффициенты корреляции составили  $r = -0,167$  – для дебита и  $r = 0,277$  – для наружного диаметра эксплуатационной колонны, а значения  $p$ -value равны 0,720 и 0,548 соответственно, что превышает уровень значимости  $\alpha = 0,05$ , указывая на слабую и случайную взаимосвязь.

Влияние обводненности можно объяснить с помощью двух основных аспектов:

1. Теплопроводность воды – почти в 4 раза выше, чем у нефти.
2. Теплоемкость воды – в 2 раза выше, чем у нефти.

Коэффициент теплопередачи при вынужденном движении жидкостей от воды к воде – более чем в 6 раз выше, чем от воды к углеводородным жидкостям [2]. Следовательно, для нагрева добываемой обводненной продукции на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  при прочих равных условиях потребуется меньше времени, так как теплопередача происходит быстрее.

Однако из-за высокой теплоемкости воды для нагрева одинаковых объемов воды и нефти на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  необходимо будет в два раза больше энергии. Поэтому при проведении технического обслуживания на скважине с обводненной продукцией потребуются большее количество тепловой энергии.

После промывки горячей водой на скважинах № 50 Чкаловского и № 395 Речицкого месторождения была зафиксирована посадка шаблона. При этом посадка шаблона 42 мм произошла на глубинах 510 и 690 м соответственно. На этих скважинах эффективность проведенного технического обслуживания оказалась низкой из-за глубокой зоны интенсивного образования АСПО [3]. Следовательно, не на всех скважинах текущий технологический подход к промывке горячей водой является эффективным для удаления АСПО с рабочей поверхности подземного оборудования. На скважинах, где интенсивное образование АСПО происходит на глубинах более 500 м, необходимо использовать другие методы борьбы с АСПО (греющий кабель, кольцевые индукционные нагреватели [4], НКТ с покрытием и т. д.) или повысить эффективность промывки горячей водой за счет увеличения количества передаваемой тепловой энергии добываемому потоку.

#### Л и т е р а т у р а

1. Айвазян, С. А. Методы эконометрики : учебник / С. А. Айвазян. – Москва : Магистр : ИНФРА-М, 2010. – 512 с.
2. Теплоемкость и теплопроводность пород и флюидов баженовской свиты – исходные данные для численного моделирования тепловых способов разработки / В. А. Юдин, А. В. Королев, И. В. Афанаскин, С. Г. Вольпин. – Москва : ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2015. – 225 с.
3. Горбаченко, В. С. Прогнозирование глубины начала образования асфальтосмолопарафиновых отложений в скважинах месторождений Припятского прогиба / В. С. Горбаченко, Н. А. Демяненко // Инженер-нефтяник. – 2024. – № 2. – С. 12–18.
4. Горбаченко, В. С. Индукционные нагреватели для борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями и алгоритм определения глубин их расстановки в скважине / В. С. Горбаченко, Н. А. Демяненко // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2024. – № 4. – С. 31–38.

УДК 622.248

**ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕИМУЩЕСТВ  
ТЕХНОЛОГИИ С УПРАВЛЯЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ БУРЕНИИ  
СКВАЖИН С АНОМАЛЬНО ВЫСОКИМИ ПЛАСТОВЫМИ  
ДАВЛЕНИЯМИ В ПРИПЯТСКОМ ПРОГИБЕ**

**И. С. Авласенко, Д. В. Порошин, В. В. Пологеенко**  
*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Известно, что в ряде районов Припятского прогиба в подсолевом и межсолевом нефтегазоносных комплексах встречены пласты с аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД). Рассмотрен один из наиболее эффективных методов проводки глубоких скважин в зонах распространения АВПД, основанный на технологии бурения с управляемым давлением. Обсужден вопрос научного обоснования выбора технологии строительства и конструкции скважины в условиях узкого или неизвестного окна бурения для конкретных геолого-технических условий одного из участков рассматриваемого региона.*

**Ключевые слова:** скважина, промывочная жидкость, окно бурения, регулирование давления, бурение, плотность, АВПД, эквивалентная циркуляционная плотность.

**ENGINEERING ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL  
ADVANTAGES OF MANAGED PRESSURE TECHNOLOGY  
IN DRILLING WELLS WITH AHFP IN THE PRIPYAT TROUGH**

**I. S. Aulasenka, D. V. Poroshin, V. V. Pologeenko**  
*“BelNIPIneft” RUE “Production association “Belorusneft”, Gomel*

*In a number of areas of the Pripyat Trough, formations with abnormally high formation pressures (AHFP) have been encountered in the subsalt and intersalt oil and gas complexes. This paper discusses one of the most effective methods for drilling deep wells in AHFP distribution zones, based on the managed pressure drilling (MPD) technology. The issue of scientific justification for the choice of well construction technology and design in conditions of a narrow or unknown drilling window for specific geological and technical conditions of one of the areas of the region under consideration is discussed.*

**Keywords:** well, drilling fluid, drilling window, pressure control, drilling, density, AHRP, equivalent circulating density.

В процессе проведения поисково-разведочного бурения в подсолевом и межсолевом нефтегазоносных комплексах целого ряда зон и локальных объектов Припятского прогиба встречены аномально высокие пластовые давления (АВПД) [1] Так, при доразведке подсолевых залежей восточного блока Гарцевского нефтяного месторождения в межсолевых отложениях (туровские слои елецкого горизонта) были вскрыты породы-коллекторы с АВПД с весьма высокими значениями коэффициента аномальности. Условия бурения на скважинах с АВПД характеризуются узким допустимым диапазоном статической и циркуляционной плотности бурового раствора («окном бурения»). По этой причине вскрытие нефтегазоносного резервуара с АВПД привело к значительному непроизводительному времени строительства скважины. Были понесены дополнительные затраты при борьбе с нефтегазоводопроявлением (НГВП) и поглощениями.

В мировой практике одной из наиболее эффективных технологий в схожих условиях узкого окна бурения является бурение с управляемым давлением (MPD) [2].

Данная технология является дорогостоящей и ее применение экономически оправдано не на каждой скважине. В связи с этим крайне актуален вопрос научного обоснования выбора технологии бурения и конструкции скважины в условиях узкого или неизвестного окна бурения для конкретных геолого-технических условий.

Цель данной работы – инженерная оценка технологических преимуществ МРД по эквивалентной циркуляционной плотности (ЭЦП) на примере скважины 6 Гарцевская.

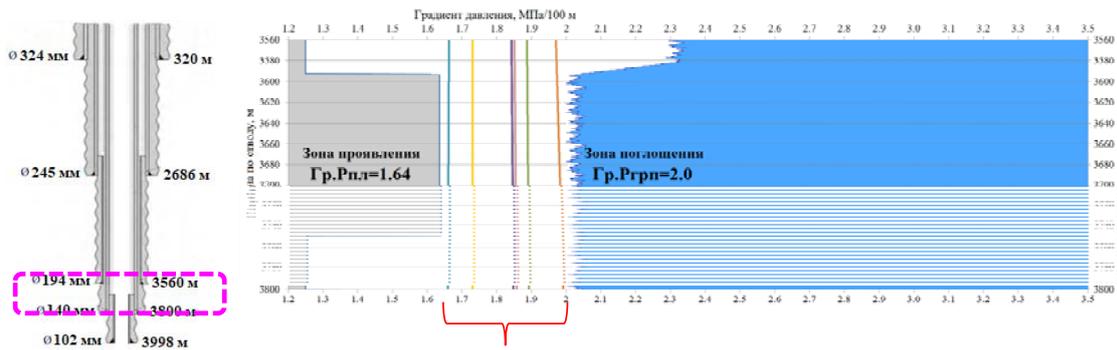
В условиях узкого окна бурения необходимо точно знать ЭЦП, чтобы контролировать скважину. Кроме этого, при проектировании важно определить возможность удержания ЭЦП во время всех операций в пределах окна бурения. Эти вопросы, а также инженерная оценка технологических преимуществ системы МРД по сравнению с другими методами проводки скважин в условиях АВПД рассматриваются в данной работе на примере гидравлического моделирования во время проведения основных операций при бурении межсолевых отложений в скважине 6 Гарцевская по проектной и предлагаемой конструкции.

В проектной конструкции скважины 6 Гарцевская предусмотрено вскрытие межсолевых отложений двумя секциями, первая – диаметром 165,1 мм со спуском обсадной колонны диаметром 140 мм, вторая – 114,3 мм со спуском эксплуатационного хвостовика диаметром 102 мм. Данное решение обусловлено наличием в межсолевых отложениях пластов, несовместимых по условиям вскрытия, а именно: необходимостью использования разных буровых растворов, для того чтобы не допустить проявлений и поглощений.

Авторами в данной статье рассматривается вопрос возможности за счет технологии МРД изменения проектной конструкции скважины со вскрытием межсолевых отложений одной секцией диаметром 165,1 мм со спуском обсадной колонны диаметром 140 мм.

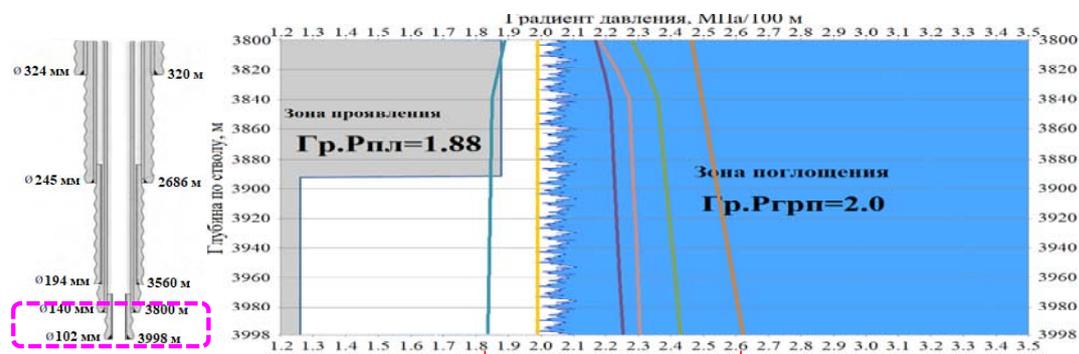
При бурении по проектной конструкции первой секции диаметром 165,1 мм используется буровой раствор с плотностью  $1,73 \text{ г/см}^3$ . Согласно проведенным авторами расчетам, ЭЦП при этом находится в диапазоне  $1,85\text{--}1,89 \text{ г/см}^3$  (рис. 1, а). При подъеме компоновки низа бурильной колонки (КНБК) со стандартной скоростью  $30 \text{ м/мин}$  ЭЦП составит  $1,61 \text{ г/см}^3$ , что приведет к НГВП, так как градиент пластового давления выше и равен  $1,64 \text{ МПа/100 м}$ . Избежать этого можно путем снижения скорости подъема до  $10 \text{ м/мин}$ , ЭЦП при этом составит  $1,65 \text{ г/см}^3$ . При спуске обсадной колонны (ОК) со стандартной скоростью  $30 \text{ м/мин}$  ожидается гидроразрыв пород, поэтому необходимо ограничить скорость спуска ОК – до  $20 \text{ м/мин}$ . Таким образом, бурение данной секции возможно по традиционной технологии, для чего необходимо ограничить скорость подъема КНБК до  $10 \text{ м/мин}$  и скорость спуска ОК – до  $20 \text{ м/мин}$ . С учетом подъема и спуска КНБК требуемое для безопасного бурения «окно» будет равно  $1,65\text{--}2,0 \text{ МПа/100 м}$ .

При бурении по проектной конструкции второй секции диаметром 114,3 мм используется буровой раствор с плотностью  $1,99 \text{ г/см}^3$  (рис. 1, б). Согласно проведенным авторами расчетам, ЭЦП при этом находится в диапазоне  $2,18\text{--}2,24 \text{ г/см}^3$ . С учетом подъема и спуска КНБК требуемое для безопасного бурения «окно» составляет  $1,84\text{--}2,64 \text{ МПа/100 м}$ . Исходя из градиента пластового давления  $1,64 \text{ МПа/100 м}$  и градиента гидроразрыва –  $2 \text{ МПа/100 м}$  при бурении данной секции ожидается как НГВП, так и поглощение бурового раствора.



Необходимое окно бурения – 1,65–2,00 МПа/100 м

а)



Необходимое окно бурения – 1,84–2,64 МПа/100 м

б)

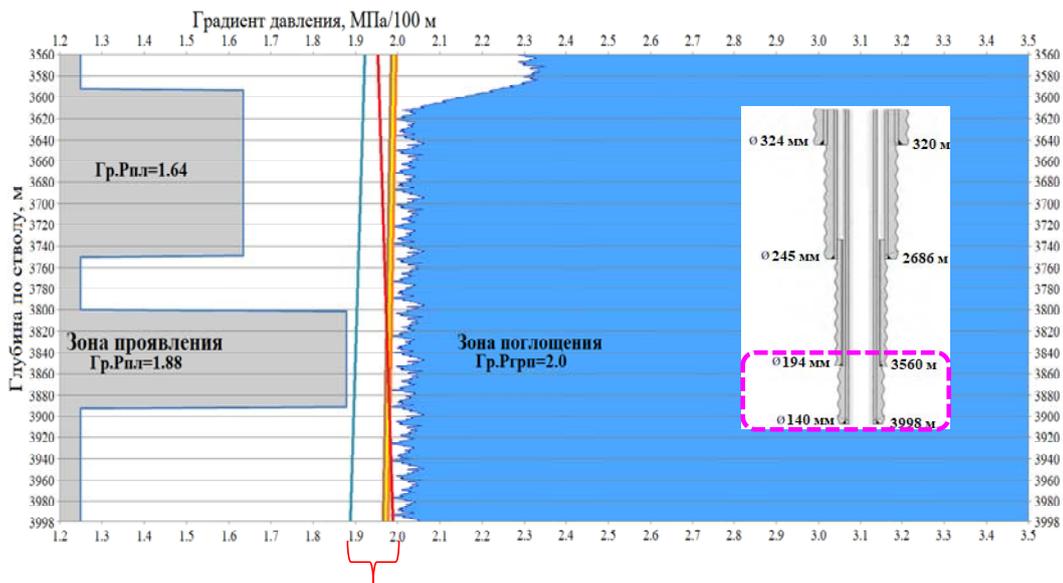
- градиент ЭЦП при подъеме КНБК 10 м/мин; — градиент ЭЦП при подъеме КНБК 10 м/мин с МРД;
- градиент ЭЦП при бурении с 10 л/с; — градиент ЭЦП при бурении с 10 л/с с МРД;
- градиент ЭЦП при спуске КНБК 30 м/мин; — градиент ЭЦП при спуске КНБК 30 м/мин с МРД;
- градиент ЭЦП при бурении с 20 л/с; — градиент ЭЦП при бурении с 20 л/с с МРД;
- градиент ЭЦП при спуске ОК 20 м/мин

Рис. 1. Градиенты давления во время всех операций бурения про проектной конструкции секций:

а – диаметром 165,1 мм; б – диаметром 114,3 мм

Для бурения по технологии МРД выбрана плотность промывочной жидкости  $1,73 \text{ г/см}^3$ . Поддержание репрессии на пласт по технологии МРД обеспечивается дополнительным противодавлением на устье.

При бурении с технологией МРД по предлагаемой конструкции одной секцией диаметром 165,1 мм с учетом подъема и спуска КНБК требуемое для безопасного бурения «окно» равно всего 1,88–2,0 МПа/100 м (рис. 2), что значительно ниже (в 14 раз), чем по стандартной технологии с проектной конструкцией. При этом исключаются как НГВП, так и поглощение бурового раствора.



Необходимое окно бурения – 1,88–2,00 МПа/100 м

- градиент ЭЦП при подъеме КНБК 10 м/мин;
- градиент ЭЦП при подъеме КНБК 10 м/мин с МРД;
- градиент ЭЦП при бурении с 10 л/с;
- градиент ЭЦП при бурении с 10 л/с с МРД;
- градиент ЭЦП при спуске КНБК 30 м/мин;
- градиент ЭЦП при спуске КНБК 30 м/мин с МРД;
- градиент ЭЦП при бурении с 20 л/с;
- градиент ЭЦП при бурении с 20 л/с с МРД;
- градиент ЭЦП при спуске ОК 20 м/мин

Рис. 2. Градиенты давления во время всех операций бурения с системой МРД по предлагаемой конструкции

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведено гидравлическое моделирование бурения на примере скважины 6 Гарцевская в условиях АВПД с проектной конструкцией по стандартной технологии и с предлагаемой конструкцией по технологии МРД.

2. При бурении с проектной конструкцией скважины 6 Гарцевская в условиях АВПД по стандартной технологии ожидается как НГВП, так и поглощение бурового раствора.

4. Установлено, что с применением технологии МРД на примере скважины 6 Гарцевская требуется «окно бурения» в 14 раз меньшее, чем при стандартной технологии, что является важным техническим преимуществом.

4. Технология МРД при вскрытии межсоловых отложений одной секцией диаметром 165,1 мм скважины 6 Гарцевская в условиях АВПД позволяет обеспечить ЭЦП во время всех операций в пределах «окна бурения».

#### Л и т е р а т у р а

1. Порошин, В. Д. Аномальные пластовые давления в межсоловых и подсоловых девонских отложениях Припятского прогиба / В. Д. Порошин, Н. Л. Лобова // Доклады АН БССР. – 1990. – Т. 34, № 1.
2. Роснефть: применение систем контроля давления для скважин с трещиноватым коллектором в условиях аномально низкого пластового давления // К. А. Чернокалов, А. Г. Пушкарский, А. М. Поляруш, М. И. Кошчер // Научно-технический Вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2016. – № 4. – С. 45–47.

УДК 622.276.40

**РАЗРАБОТКА ТИПОВЫХ ДИЗАЙНОВ ОГРАНИЧЕНИЯ  
ВОДОПРИТОКА В УСЛОВИЯХ ТОНКОЙ НЕФТЯНОЙ ОТОРОЧКИ  
ТАЗОВСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**В. Ю. Хорюшин**

*ООО «Меретояханефтегаз», г. Тюмень, Российская Федерация*

*Разработаны типовые дизайны для проведения ограничения водопритока в условиях Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения. Проведены лабораторные исследования изолирующих свойств реагентов АК-642 и Изопласт-Д. Отмечено, что изопласт-Д продемонстрировал селективные свойства, что позволяет сократить расходы на проведение операций по ограничению водопритока.*

**Ключевые слова:** ограничение водопритока, полиакриламид, эмульсия.

**DEVELOPMENT OF DESIGNS FOR WATER SHUTOFF  
IN THE CONDITIONS OF THE THIN OIL RIM OF THE TAZOVSKY  
OIL AND GAS CONDENSATE FIELD**

**V. Khorushin**

*LLC Meretoyakhaneftegaz, Tyumen, the Russian Federation*

*Standard designs have been developed to limit water flow in the conditions of the Tazovsky field. Laboratory tests of the reagent AK-642 and Isoplast-D were carried out. Isoplast-D has demonstrated its selective properties, which reduces the cost of conducting operations to limit water flow.*

**Keywords:** water shutoff, polyacrylamide, emulsion.

Основная проблема разработки Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) – это канальные прорывы газа из газовой шапки, а также подстилающей воды, что приводит к неравномерной выработке запасов нефти по разрезу вследствие анизотропии коллектора. Исследования по определению профиля притока это подтверждают. На сегодняшний день решение данной проблемы является актуальной задачей для повышения эффективности разработки залежи пласта ПК<sub>1</sub> Тазовского нефтегазоконденсаторного месторождения.

Для решения указанного вопроса автором статьи предложены варианты по изоляции интервалов прорыва воды с помощью установки пакерных систем и закачки изолирующих (тампонирующих) агентов. Реализация этого предложения на практике требовала проведения лабораторных исследований изолирующих реагентов. В результате проведенных исследований разработаны шаблонные дизайны по закачке изолирующих реагентов и выбраны рецептуры этих составов, которые впервые применяются в условиях пласта ПК<sub>1</sub> Тазовского НГКМ.

Рассмотрим типовые дизайны проведения ограничения водопритока (ОВП) на примере рис. 1, 2:

1. Прорыв воды из первого сегмента («носочная» зона горизонтального ствола) ограничивается путем установки пакера-ретенера в хвостовике в зоне заколонного пакера 1 и закачки изолирующего состава. При этом изолирующая жидкость не фильтруется в другие сегменты, а пакер-ретенер извлекается по завершении работ.

2. Прорыв воды из пятого сегмента («пяточная» зона горизонтального ствола) ограничивается путем установки пакера-пробки в хвостовике в зоне заколонного па-

кера 5 и закачки изолирующего состава. При этом изолирующая жидкость не фильтруется в верхние четыре сегмента, пакер-пробка фрезеруется.

3. Прорыв воды из второго, третьего и четвертого сегментов в отдельности или совместно ограничивается путем установки пакера-пробки в хвостовике в зоне ближайшего к забою заколонного пакера, установки пакера-ретенера в зоне ближайшего к устью заколонного пакера и закачки изолирующего состава. Пакер-пробка фрезеруется.

4. Прорыв воды в многозабойную скважину (МЗС) ограничивается последовательно отсечением основного ствола горизонтального ствола (ГС) или бокового (непроходного) ствола ГС.

5. Нелокализованный интервал прорыва воды ограничивается закачкой «селективного» состава без извлечения ГНО.

Не является исключением ситуация, когда возникает недохождение пакерного оборудования до целевых интервалов ввиду сложной конструкции скважины (высокая извилистость, большие отходы забоев скважин от устья). В таком случае под закачку изоляционного состава попадают и нецелевые интервалы (сегменты), которые, как правило, имеют высокий коэффициент нефтенасыщенности, а их изоляция крайне негативно сказывается на коэффициенте извлечения нефти. Ключевым решением подобной проблемы является применение селективного состава, а именно избирательно изолирующего водонасыщенные интервалы (сегменты). Таким составом является обратная эмульсия, которая представляют собой термодинамически неустойчивые дисперсные системы, где дисперсная среда представлена неполярной или малополярной жидкостью.

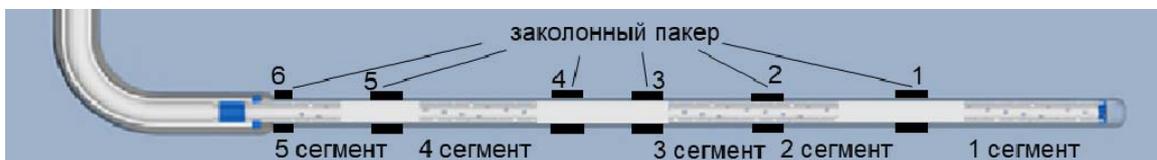


Рис. 1. Типовая схема заканчивания скважин, эксплуатирующих объект ПК<sub>1</sub> Тазовского НГКМ (ГС)

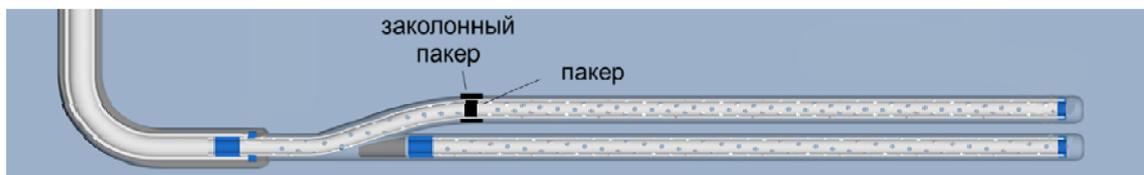


Рис. 2. Типовая схема заканчивания скважин, эксплуатирующих объект ПК<sub>1</sub> Тазовского НГКМ (МЗС)

Типовой дизайн № 4 (последовательное отсечение пробуренных стволов скважин) основан на допущении, что интервал притока воды локализован в основном (проходном) стволе МЗС. Все работы можно разделить на два этапа, которые выполняются последовательно. При успешности первого этапа работы по ОВП могут считаться успешными. При неуспешности первого этапа, а именно – невыполнении ключевых показателей эффективности (КПЭ), выполняется работы второго этапа.

На первом этапе осуществляется подготовка части основного ствола ГС скважины, обсаженного глухими трубами с заколонным нефтенабухающим или водона-

бухающим пакером, устанавливается пакер-пробка (как правило, ниже интервала срезки проходного ствола), спускается электроцентробежный насос (ЭЦН), скважина выводится на режим, оценивается достижение КПЭ этапа.

Вторым этапом становится проверка гипотезы обводнения бокового (непроемного) ствола. К уже имеющемуся пакеру-пробке в ствол скважины на глубины меньшие интервала срезки проходного ствола спускается пакер-ретейнер для недопущения попадания тампонажной жидкости в нецелевые интервалы основного ствола скважины, а при отсутствии таковых – в зоне воздействия для недопущения гидравлической нагрузки при закачке тампонажной жидкости на эксплуатационную колонну. Далее осуществляется закачка расчетного объема сшитой полимерной системы (АК-642) и закрепление ее цементным раствором. При этом закачка сшитой полимерной системы создает экран в межстволовом пространстве и не позволяет воде фильтроваться из бокового ствола в основной по матрице породы [1]. Заключительными работами является извлечение пакера-ретейнера, ожидание застывания цемента, фрезерование пакер-пробки, спуск ЭЦН и вывод скважины на режим.

Данное решение позволяет отказаться от проведения промыслово-геофизических исследований (ПГИ) и нормализации забоя на ГНКТ, что снижает затраты на проведение ОВП на 70–75 %.

Типовой дизайн № 5 основан на ограничении водопритока без проведения предварительных работ по проведению ПГИ и подготовки скважины к мероприятию. Физико-химические свойства применяемого реагента Изопласт-Д, т. е. его «селективные» свойства, заключаются в инертности эмульсионной системы при контакте с водой и снижении вязкости («разжижение») при контакте с нефтью. При этом смешение эмульсий с водной фазой не происходит, наблюдаются отдельные сгустки эмульсии в водной фазе. С нефтью эмульсия смешивается до однородного состояния, при этом можно видеть значительное снижение вязкости системы (см. таблицу).

**Влияние товарной нефти на вязкость эмульсий  
рецептуры 2 и 3 состава Изопласт-Д**

Соотношение, %		Эффективная вязкость, мПа · с	
Эмульсия	Нефть	Рецептура №2	Рецептура № 3
100	0	4459	4239
50	50	511,1	422,6
20	80	291,6	274,4
0	100	193,4	193,4

Подобные селективные свойства составов ОВП рассматриваются в работе [2].

**Литература**

1. Хасаншин, Р. Н. Опыт применения технологий по ограничению водопритока на горизонтальных скважинах компании ПАО «Газпром нефть» / Р. Н. Хасаншин, И. М. Маликов, А. Н. Большаков // Нефть. Газ. Новации. – 2018. – № 7. – С. 85–87.
2. Хасаншин, Р. Н. Разработка технологии изоляции попутнодобываемых вод в скважинах (на примере Тевлинско-Русскинского месторождения) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.17 / Хасаншин Рустам Нурисламович ; Уфим. гос. нефт. техн. ун-т. – Уфа, 2005. – 23 с.

УДК 622.276.64

**ОЦЕНКА ДОМИНИРУЮЩИХ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО  
ЗАВОДНЕНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ  
ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА**

**А. О. Чекан**

*Филиал «БН-Научно-технический центр» РУП «Производственное  
объединение «Белоруснефть», г. Тюмень, Российская Федерация*

*Рассмотрена оценка доминирующих петрофизических факторов, влияющих на эффективность циклического заводнения на месторождениях Припятского прогиба. Проведен факторный анализ влияния основных геолого-физических параметров, включая пористость, проницаемость, расчлененность, нефтенасыщенность и вязкость нефти. Выделены три ключевых фактора, объясняющих 90,7 % общей дисперсии данных. Исходя из интерпретации результатов проведенных исследований определены основные свойства продуктивных пластов, влияющих на эффективность циклического заводнения. Предложены рекомендации по оптимизации разработки нефтяных месторождений с учетом выявленных факторов.*

**Ключевые слова:** циклическое заводнение, петрофизические факторы, факторный анализ, Припятский прогиб, повышение нефтеотдачи.

**ASSESSMENT OF DOMINANT PETROPHYSICAL FACTORS  
FOR THE EFFECTIVE APPLICATION OF CYCLIC  
WATERFLOODING AT THE PRIPYAT TROUGH OILFIELDS**

**A. O. Chekan**

*BN Scientific and Technical Center RUF "Production Association  
"Belorusneft", Tyumen, the Russian Federation*

*This article examines the assessment of dominant petrophysical factors influencing the effectiveness of cyclic waterflooding at the oilfields of the Pripyat Trough. A factor analysis of the main geological and physical parameters was conducted, including porosity, permeability, compartmentalization, oil saturation, and oil viscosity. Three key factors explaining 90.7 % of the total data variance were identified. The interpretation of the results allows for the determination of the main properties affecting the effectiveness of cyclic waterflooding and offers recommendations for optimizing oilfield development considering the identified factors.*

**Keywords:** cyclic waterflooding, petrophysical factors, factor analysis, Pripyat Trough, enhanced oil recovery.

Циклическое заводнение (ЦЗ) является одним из эффективных методов повышения нефтеотдачи пластов, особенно в условиях высокой неоднородности коллекторов. Метод заключается в чередовании периодов закачки воды и снижения пластового давления, что способствует вовлечению в разработку невыработанных участков пласта и увеличению общей добычи нефти.

Месторождения Припятского прогиба характеризуются сложным геологическим строением и разнообразными петрофизическими свойствами, что оказывает значительное влияние на эффективность применяемых технологий повышения нефтеотдачи. В связи с этим актуальна задача оценки доминирующих петрофизических факторов, влияющих на результаты циклического заводнения [1].

Цель настоящей работы — выявить основные петрофизические параметры, определяющие эффективность ЦЗ на месторождениях Припятского прогиба, посредством факторного анализа.

**Объекты исследования.** Циклическое заводнение применялось на нескольких месторождениях Припятского прогиба, на карбонатных коллекторах межсолевого и подсолевого комплексов. Все объекты характеризуются высокой степенью неоднородности как по разрезу, так и по площади. Геолого-физические свойства объектов ЦЗ представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Геолого-физические свойства объектов циклического заводнения

Месторождение	Пористость, %	Проницаемость, мД	Расчлененность, доли ед.	Эффективная нефтенасыщенная толщина, м	Нефтенасыщенность, %	Вязкость нефти, сП	Глинность, %	Коэффициент Дикстра–Парсона, доли ед.	Песчанис-тость, доли ед.	Доп. добыча нефти, т
IV п Речицкое	8	297	4,1	6,3	76,2	5,24	7	0,85	0,3	3604
VI-гг Вишанское	7	10	4,6	8,7	87	2,52	7	0,89	0,32	1229
sm вст блок Тишковское	10	65	2,2	11,7	89	0,63	3,2	0,92	0,86	8770
Sm Осташковичское	9,2	83	1,74	11	88,3	0,75	3	0,55	0,55	112

**Метод факторного анализа.** Для выявления основных факторов, влияющих на эффективность ЦЗ, использован факторный анализ с применением метода главных компонент и последующим ортогональным вращением (Варимакс) [2].

**Корреляционный анализ.** На первом этапе составлена корреляционная матрица (табл. 2), показывающая коэффициенты корреляции между исследуемыми переменными.

Для расчета использован коэффициент корреляции Пирсона (1):

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

где  $X_i$  и  $Y_i$  – значения переменных;  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  – средние значения этих переменных.

Таблица 2

## Корреляционная матрица

	Пористость	Проницаемость	Расчлененность	Эффективная толщ.	Нефтенасыщенность	Вязкость нефти	Глинистость	Коэф. Дикстра–Парсонса	Песчанистость	Дополнительная добыча нефти
Пористость	1	–0,06	–0,91	0,74	0,41	–0,63	–0,91	–0,23	0,91	0,58
Проницаемость	–0,06	1	0,21	–0,71	–0,93	0,79	0,36	0,03	–0,38	0,07
Расчлененность	–0,91	0,21	1	–0,82	–0,55	0,76	0,98	0,58	–0,79	–0,21
Эффективная толщина	0,74	–0,71	–0,82	1	0,92	–0,99	–0,90	–0,27	0,86	0,28
Нефтенасыщенность	0,41	–0,93	–0,55	0,92	1	–0,96	–0,68	–0,20	0,64	0,06
Вязкость нефти	–0,63	0,79	0,76	–0,99	–0,96	1	0,85	0,32	–0,78	–0,15
Глинистость	–0,91	0,36	0,98	–0,90	–0,68	0,85	1	0,49	–0,86	–0,27
Коэффициент Дикстра–Парсонса	–0,23	0,03	0,58	–0,27	–0,20	0,32	0,49	1	0,03	0,65
Песчанистость	0,91	–0,38	–0,79	0,86	0,64	–0,78	–0,86	0,03	1	0,70
Дополнительная добыча нефти	0,58	0,07	–0,21	0,28	0,06	–0,15	–0,27	0,65	0,70	1

**Выделение факторов.** Вычислены собственные значения корреляционной матрицы и определено количество факторов на основе критерия Кайзера (факторы с собственными значениями больше 1). Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Собственные значения и доля объясненной дисперсии

Фактор	Собственное значение	Доля объясненной дисперсии, %	Кумулятивная дисперсия, %
1	5,54	55,4	55,4
2	2,32	23,2	78,6
3	1,21	12,1	90,7

Выбраны три фактора, объясняющие в сумме 90,7 % общей дисперсии данных.

**Расчет факторных нагрузок.** После ортогонального вращения (Варимакс) получены факторные нагрузки для каждой переменной (табл. 4).

## Факторные нагрузки после вращения

Переменная	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Пористость	0,88	-0,10	0,05
Проницаемость	0,00	0,92	-0,05
Расчлененность	-0,90	0,15	0,12
Эффективная нефтенасыщенная толщина	0,83	-0,20	0,02
Начальная нефтенасыщенность	0,72	-0,35	0,08
Вязкость нефти в пластовых условиях	-0,83	0,25	-0,10
Глинистость	-0,90	0,08	0,05
Коэффициент Дикстра–Парсонса	-0,05	0,12	0,84
Песчанистость	0,90	-0,08	0,18
Дополнительная добыча нефти	0,60	0,00	0,76

**Интерпретация факторов**

*Фактор 1 – коллекторские свойства.* Наибольшие положительные нагрузки по фактору 1 наблюдаются у переменных: пористость (0,88), эффективная нефтенасыщенная толщина (0,83), начальная нефтенасыщенность (0,72), песчанистость (0,90).

Отрицательные нагрузки – у переменных: расчлененность (-0,90), глинистость (-0,90), вязкость нефти (-0,83).

Этот фактор отражает свойства коллектора, влияющие на емкостные и фильтрационные характеристики пласта. Высокая пористость и песчанистость способствуют увеличению объема порового пространства, доступного для накопления и перемещения флюидов. Низкая глинистость и вязкость нефти облегчают процесс фильтрации.

*Фактор 2 – фильтрационные свойства.* Наибольшая положительная нагрузка по фактору 2 отмечается у переменной: проницаемость (0,92).

Этот фактор связан с фильтрационной способностью пласта. Высокая проницаемость обеспечивает эффективное движение флюидов и содействует повышению коэффициента вытеснения нефти.

*Фактор 3 – неоднородность пласта.* Высокие нагрузки по фактору 3 имеет переменная: коэффициент Дикстра–Парсонса (0,84).

Этот фактор отражает степень неоднородности пласта по проницаемости. Неоднородность влияет на равномерность охвата пласта воздействием и эффективность методов повышения нефтеотдачи.

**Влияние факторов на эффективность циклического заводнения.** Фактор 1 показывает, что высокие коллекторские свойства (пористость, песчанистость) и низкая глинистость способствуют повышению эффективности ЦЗ. Низкая вязкость нефти также облегчает процесс вытеснения.

Фактор 2 подчеркивает важность проницаемости для эффективного применения ЦЗ. Высокая проницаемость обеспечивает более равномерное и быстрое распространение закачиваемых агентов по пласту.

Фактор 3 указывает на то, что неоднородность пласта по проницаемости (высокий коэффициент Дикстра–Парсонса) может как негативно, так и позитивно влиять на эффективность ЦЗ. Применение циклического заводнения в неоднородных

пластах может повысить вовлечение в разработку низкопроницаемых зон за счет создания перепадов давления.

Таким образом, проведенный факторный анализ позволил выявить три основных фактора, влияющих на эффективность циклического заводнения на месторождениях Припятского прогиба:

- 1) коллекторские свойства пласта (пористость, песчаность, нефтенасыщенность, низкая глинистость и вязкость нефти);
- 2) фильтрационные свойства (проницаемость);
- 3) неоднородность пласта (коэффициент Дикстра–Парсонса).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что эффективность ЦЗ зависит от комплекса петрофизических свойств. Оптимизация разработки месторождений должна учитывать выявленные факторы для повышения общей нефтеотдачи.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кудряшов, А. А. О циклическом воздействии на семилукскую залежь восточного блока Тишковского месторождения / А. А. Кудряшов, Д. А. Примичев // *Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь* : сб. науч. тр. – 2017. – № 9. – С. 88–99.
2. Дэвис, Дж. К. Статистический анализ данных в геологии : в 2 кн. / Дж. К. Дэвис ; пер. с англ. В. А. Голубевой ; под ред. Д. А. Родионова. – Москва : Недра, 1990. – Кн. 1. – 319 с.

УДК 622.276(075.8)

### **ПРОВЕДЕНИЕ ТРАССЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ НА ПРИМЕРЕ ДАВИДОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**К. А. Глушаков, Т. В. Атвиновская**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Отмечено, что овременные трассерные исследования с применением химических трассеров в практике контроля за разработкой нефтяных залежей являются одним из эффективных гидродинамических методов. Приведены результаты трассерных исследований, выполненные на восточной части петриковско-задонской залежи Давыдовского месторождения.*

**Ключевые слова:** трассерные исследования, Давыдовское месторождение, фонд скважин, фильтрационные потоки, отбор.

### **CONDUCTING TRACER STUDIES TO CONTROL AND REGULATE THE DEVELOPMENT PROCESS USING THE EXAMPLE OF THE DAVYDOVSKOYE FIELD**

**K. A. Glushakov, T. V. Atvinovskaya**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Modern tracer studies using chemical tracers in the practice of monitoring the development of oil deposits are one of the effective hydrodynamic methods. The proposed material presents the results of tracer studies performed on the eastern part of the Ptr-zd deposit of the Davydovskoye field.*

**Keywords:** tracer studies, Davydovskoye field, well stock, filtration flows, selection.

В практике контроля за разработкой залежей на месторождениях Республики Беларусь активно применяется технология трассерных исследований с использованием химических индикаторов, которая характеризуется высокой информативностью, помехоустойчивостью, точностью, безопасностью.

Проведение трассерных исследований состоит из нескольких этапов [1]:

1. Анализ информации по объекту разработки, подбор контрольных нагнетательных и добывающих скважин.
2. Подготовка к промысловой части; выбор трассера, обоснование объемов закачки и периодичности отбора проб; закачка трассера.
3. Отбор проб жидкости с дальнейшими лабораторными исследованиями; интерпретация полученных результатов.

На первом этапе анализируется весь фонд скважин потенциального исследуемого объекта, заодно рассматривается информация о бурении скважин, о случившихся аварийных ситуациях при их сооружении, данные об осуществлении капитального ремонта скважин, материалы геофизических исследований скважин за весь период их эксплуатации. При недостатке сведений о текущем состоянии дополнительно проводят геофизические исследования [1].

Продолжительность исследований выбирается в зависимости от задач, которые необходимо решить по результатам исследований. Выбранный промежуток времени является минимальным для получения оценки фильтрационных параметров пласта [2].

Основа для использования полученных во время исследований результатов для контроля за разработкой залежей – это анализ основных параметров трассирования фильтрационных потоков: скоростей движения фильтрационных потоков, объема промытых каналов, проницаемости и производительности каналов тока, а также доли воды, перемещающейся по каналам без совершения работы по вытеснению от общего объема воды, добываемой скважиной [3].

В пределах восточной части петриковско-задонской (Ptr-zd) залежи Давыдовского месторождения специалистами БелНИПИнефть выполнены оперативные трассерные исследования с длительностью периода времени отбора проб жидкости с поступающим трассером из добывающих скважин в течение 20 сут.

Целью исследований являлось получение информации о наличии гидродинамической связи нагнетательных скважин с добывающими, определение истинных скоростей прихода первой волны трассеров, направлений движения нагнетаемой воды от нагнетательных к добывающим скважинам, выявление неоднородности по площади в вытеснении нефти закачиваемой жидкостью для планирования мероприятий по повышению нефтеотдачи, а также наличия связи нагнетательных скважин с добывающей скважины 97, эксплуатирующей лебедянские отложения после ее перевода с ptr-zd залежи (оценка качества изоляционных работ) [4].

Работы по трассированию фильтрационных потоков на межсолевой залежи (ptr-zd) Давыдовского месторождения выполнены закачкой растворов индикаторов в нагнетательные скважины 82n3, 63 и 133. Отбор проб добываемой жидкости проводился по добывающим скважинам 62, 68k1, 69, 83, 88, 90, 93, 94n, 106, 112, 127s2, 135n, 97(отсеч. ptr), 128, 37, 58 и 91 (ОРД).

**Полученные результаты.** В результате исследований было установлено, что основные фильтрационные потоки направлены (рис. 1) от нагнетательных скважин:

- 82n3 – к добывающим скважинам 93 и 128;
- 63 – к добывающим скважинам 62, 68k1, 37;
- 133 – к добывающим скважинам 62, 68k1, 37.

## 144 Секция 6. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений

Основные фильтрационные потоки от нагнетательных скважин 63 и 133 имеют юго-западное направление, от нагнетательной скважины 82n3 – восточное направление. Нагнетательные скважины 63 и 133 оказывают преобладающее влияние на добывающие скважины 68k1, 37, которые находятся значительно южнее нагнетательной скважины 82n3. В то же время нагнетательная скважина 82n3 не оказывает существенного влияния на близлежащие добывающие скважины. Ее максимальное влияние распространяется на скважину 128, расположенную на расстоянии более 1400 м на восток от скважины 82n3.

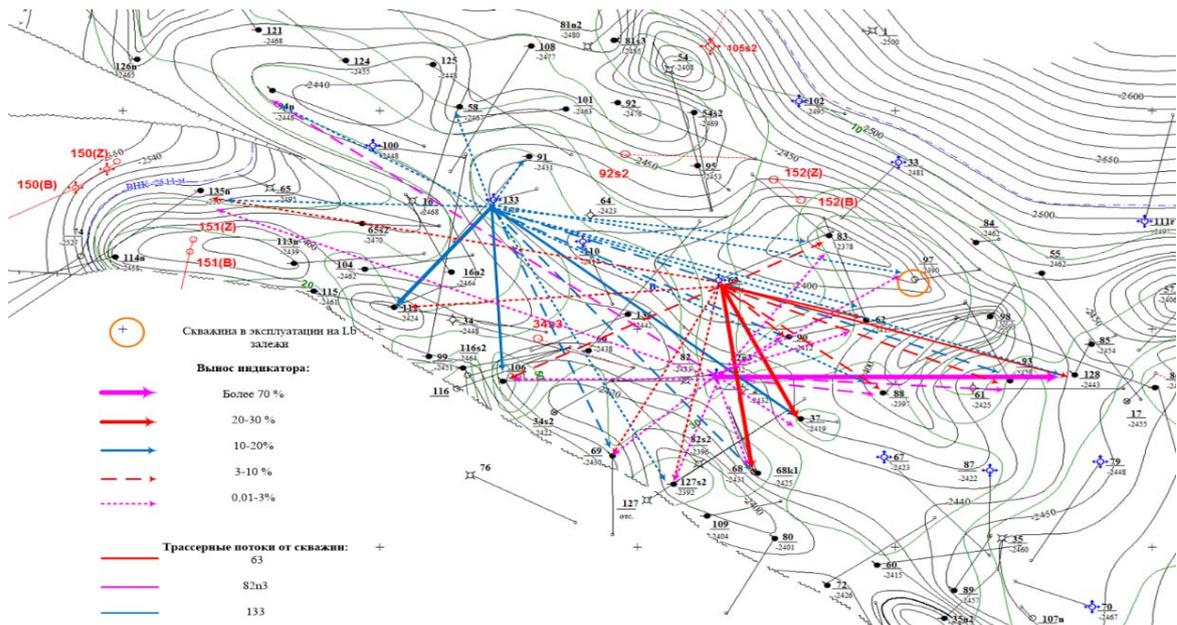


Рис. 1. Выкопировка структурной карты Ptг-zd залежи Давыдовского месторождения (восточная часть залежи). Графическое представление результатов трассирования по [1]

Из рис. 1 видно, что у межзолевой (ptг-zd) залежи Давыдовского месторождения на участке исследования имеется две системы фильтрационных каналов низкого фильтрационного сопротивления, расположенных перпендикулярно друг другу с севера на юг от нагнетательных скважин 63 и 133 и с запада на восток от скважины 82n3.

На рис. 2 представлено сопоставление блок-диаграмма распределения фильтрационных потоков от исследуемых нагнетательных скважин по площади. Исходя из рис. 2 понятно, что охват вытеснением по площади весьма неравномерный. Так, от скважины 82n3 (рис. 2, а) максимальное вытеснение и прорыв воды произошел только в направлении скважины 128. В направлении других добывающих скважин влияние скважины 82n3 незначительно. Наиболее равномерный охват вытеснением по площади можно отметить от нагнетательной скважины 63 (рис. 2, б).

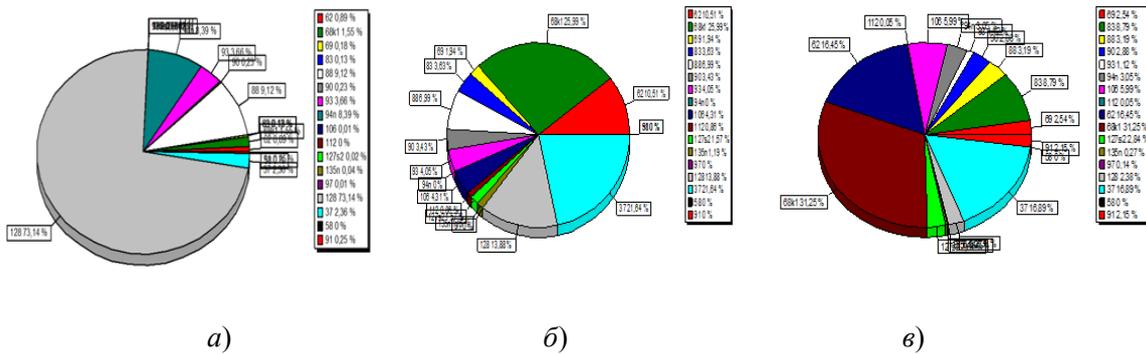


Рис. 2. Сопоставление (блок-диаграмма) распределения фильтрационных потоков от нагнетательных скважин (а – 82n3; б – 63; в – 133) Давыдовского месторождения ptr-zd залежи (восточная часть залежи) [1]

В направлении добывающей скважины 128 установлены максимальные объемы промытых каналов. Они составляют 24,4 м<sup>3</sup>. В направлении других добывающих скважин, как от нагнетательной скважины 82n3, так и от нагнетательных скважин 63 и 133, объемы промытых каналов не превышают 1 м<sup>3</sup>. В связи с этим для выравнивания фронта вытеснения от нагнетательной скважины 82n3 в нее необходимо выполнить закачку потокоотклоняющих композиций.

#### Л и т е р а т у р а

1. Результаты трассирования фильтрационных потоков Давыдовского (ptr-zd\_ск) месторождения : отчет о НИР : 42.2020 / БелНИПИнефть ; рук. Д. В. Ткачев. – Гомель, 2020. – 89 с.
2. Совершенствование технологии индикаторных исследований для оценки фильтрационной неоднородности межскважинного пространства нефтяных пластов: диссертация : 25.00.10 / Дмитрий Александрович Чернокожев ; Междунар. ун-т природы, общества и человека «Дубна». – Дубна, 2008. – 29 с.
3. Методическое руководство по приемке, анализу и систематизации результатов трассерных исследований в организациях Группы «ЛУКОЙЛ». Редакция 1.0. – Москва : ОАО «ЛУКОЙЛ», 2012.

УДК 550.34.06

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛНО-АЗИМУТАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ ES360 И МИГРАЦИИ КИРХГОФА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ЭТАПЕ СТРУКТУРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ИНТЕРВАЛЕ ВЕРХНЕСОЛЕНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РЕЧИЦКОГО УЧАСТКА

И. В. Киреев

РУП Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель

Отмечено, что традиционно применяемая миграция Кирхгофа не всегда позволяет получить достаточно информативные сейсмические данные на участках с контрастной соляно-купольной тектоникой. И это не дает возможности однозначно интерпретировать поверхность галитовой толщи, картировать соляные купола и нижележащие отражающие горизонты. Поверхность галитовой толщи является основной преломляющей сейсмической границей, определяющей пространственное положение межсолевого и подсолевого комплексов. Опыт построения глубинно-скоростных моделей показывает, что ошибочное построение отражающей поверхности галитовой толщи приводит к искажению пространственного положения нижележащих отражающих границ на мигрированных глубин-

ных разрезах либо к потере фокусировки отражений межсолевого и подсолевого комплексов под соляными куполами. В связи с данным ограничением миграции Кирхгофа поставлен вопрос о поиске и применении новых алгоритмов миграции, позволяющих получать более качественный и информативный сейсмический материал вблизи границ соляных поднятий. Рассмотрены качество и точность миграционных преобразований сейсмических данных для дальнейшего их использования в задачах кинематической интерпретации.

**Ключевые слова:** сейсмический снос, миграция, отражения, структурная интерпретация.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF ES360 FULL-AZIMUTH MIGRATION AND KIRCHHOFF MIGRATION USED AT THE STAGE OF STRUCTURAL INTERPRETATION OF SEISMIC DATA IN THE INTERVAL OF UPPER SALINE DEPOSITS USING THE EXAMPLE OF THE RECHITSA SITE**

I. V. Kireev

RUE "Production Association "Belorusneft", Gomel

*Traditionally used Kirchhoff migration doesn't always allow obtaining sufficiently informative seismic data in areas with contrasting salt-dome tectonics, which doesn't allow for a sufficiently unambiguous interpretation of the surface of the halite strata, mapping salt domes and underlying reflecting horizons. The surface of the halite strata is the main refractive seismic boundary that determines the spatial position of the intersalt and subsalt complexes. Experience in constructing depth-velocity models shows that erroneous construction of the reflecting surface of the halite strata leads to a distortion of the spatial position of the underlying reflecting boundaries on migrated deep sections or to a loss of focusing of the reflections of the intersalt and subsalt complexes under salt domes.*

*This limitation of Kirchhoff migration raises the question of searching for and applying new migration algorithms that allow obtaining higher-quality and informative seismic material near the boundaries of salt uplifts. The presented work examines the quality and accuracy of migration transformations of seismic data for their further use in kinematic interpretation problems.*

**Keywords:** seismic drift, migration, reflections, structural interpretation.

В условиях, близким к горизонтальным, на временных разрезах отражающие границы правильно отображают черты соответствующих им геологических горизонтов, однако в условиях негоризонтально-слоистого залегания отражающих границ временной разрез дает искаженное представление геологической среды вследствие эффекта сейсмического сноса – несовпадения проекции на поверхность точки отражения волны с общей средней точкой (рис. 1).

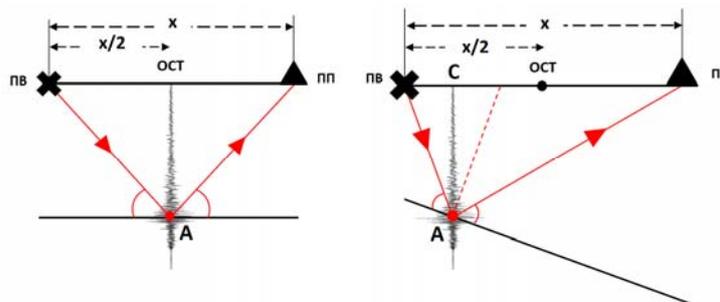


Рис. 1. Эффект сейсмического сноса при горизонтальных и наклонных отражающих границах

Особенно сильно эффект сейсмического сноса проявляется в условиях крутопадающего и субвертикального залегания слоев, характерного для регионов развития соляной тектоники. В пределах Припятского прогиба большинство разрабатываемых месторождений и перспективных площадей приурочено к областям региональных и субрегиональных разломов с расположенными над ними соляными куполами, углы падения на крыльях которых в пределах региона достигают 60–90°, что приводит к потере фокусировки отражений как от самих стенок соляного купола, так и от отражений межсолевых и подсолевых структур.

Эффект сейсмического сноса устраняется процедурой сейсмической миграции. Наиболее широко применяемым в мире алгоритмом миграции является миграция Кирхгофа, используемая в том числе и в БелНИПИнефть. Однако в сложном геологическом строении региона миграция Кирхгофа не дает возможности однозначно интерпретировать крутопадающие границы галитовой толщи.

Необходимо отметить, что поверхность галитовой толщи является основной преломляющей границей, определяющей пространственное положение на сейсмических разрезах межсолевого и подсолевого комплексов, представляющих основной промышленный интерес. Опыт построения глубинно-скоростных моделей показывает, что ошибочное построение отражающей поверхности галитовой толщи приводит к искажению пространственного положения нижерасположенных отражающих границ межсолевого и подсолевого комплекса на временных разрезах, либо к потере фокусировки отражений под соляными структурами (рис. 2).

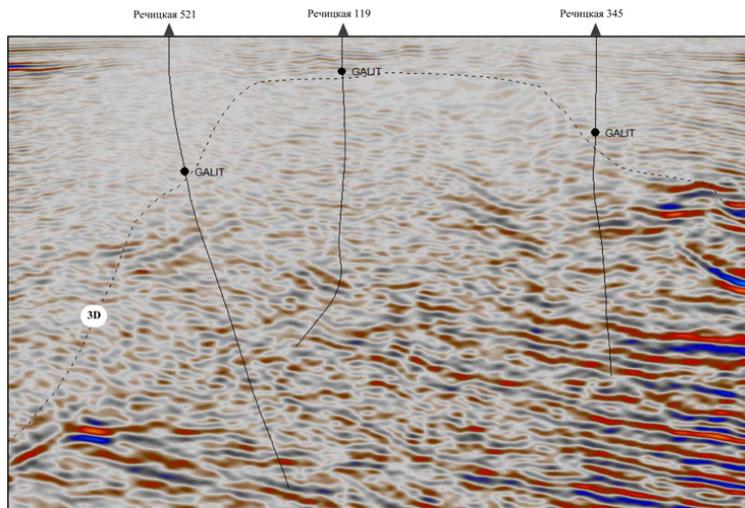


Рис. 2. Фрагмент сейсмического разреза inline 1570 миграции Кирхгофа с отсутствием явной возможности проследить отражение от поверхности галитовой толщи и слабой прослеживаемостью нижележащих отложений

Для реализации всех возможностей полноазимутальной угловой миграции ES360 рекомендуется проектировать полноазимутальные или широкоазимутальные съемки с высокой кратностью. При этом во многих работах отмечается значительное улучшение качества сейсмического материала даже при использовании технологии ES360 на съемках со средней кратностью и неравномерным распределением азимутов [1]. Речницкая площадь была отработана с проектными параметрами кратности прослеживания 300–1000 и является полноазимутальной для максимального удаления ПВ-ПП до 4000 м.

## 148 Секция 6. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений

Основное отличие ES360 от применяемой миграции Кирхгофа – трассировка лучей непосредственно из точек среды к поверхности, в то время как классическая миграция Кирхгофа трассирует лучи от поверхности к точкам среды.

Полученные результаты полноазимутальной угловой миграции ES360 показали более высокую прослеживаемость отражения кровли галитовой толщи, что позволяет с большей уверенностью и точностью интерпретировать поверхность соляного поднятия (рис. 3).

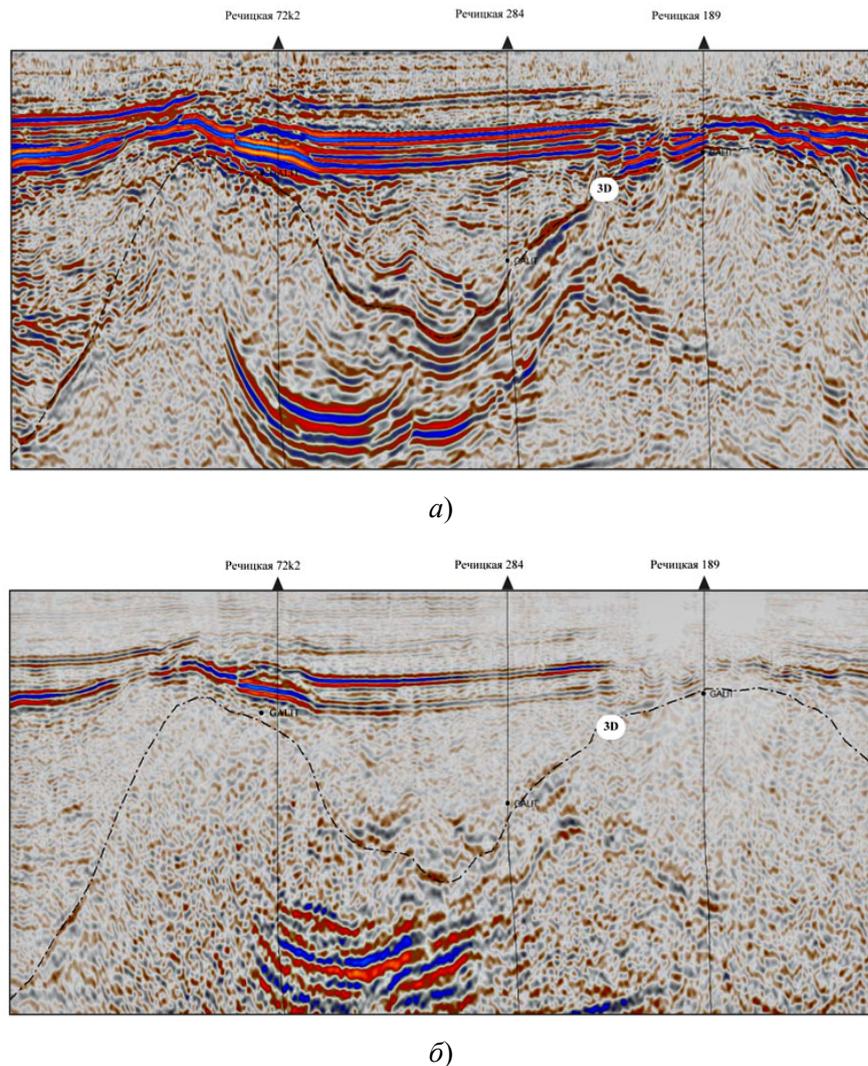


Рис. 3. Сравнение сейсмических разрезов xline 7540:  
а – миграции ES360; б – миграции Кирхгофа

Применение альтернативного алгоритма миграции дает возможность получить более разрешенные сейсмические разрезы, как при прослеживании кровли галитовой толщи, так и при выделении тел межсолевого и подсолевого комплекса (рис. 4).

Однако важно заметить, что результаты, полученные с использованием миграции ES360, по-прежнему не всегда позволяют получать однозначную волновую картину, так, на крыльях соляных куполов по-прежнему встречаются участки, где однозначная интерпретация положения границы галитовой толщи затруднительна или невозможна.

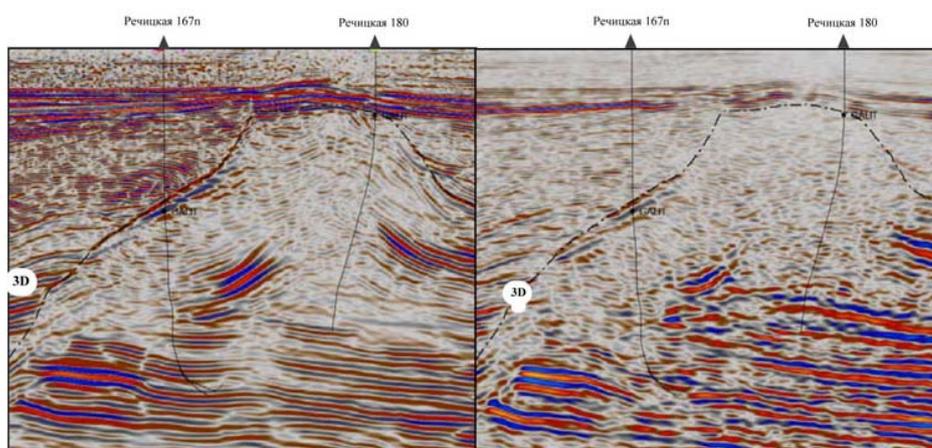


Рис. 4. Сравнение сейсмических разрезов inline миграции ES360 (слева) и миграции Кирхгофа (справа)

По результатам, представленным в работе, видно, что с помощью полно-азимутальной миграции ES360 можно получать более качественную волновую картину по сравнению с традиционно применяемой миграцией Кирхгофа, что положительно сказывается на качестве и достоверности построений поверхности галитовой толщи и, как следствие – лучшей прослеживаемости отражений межсолевой и подсолевой толщи. Вышеописанные тезисы указывают на целесообразность дальнейшего применения миграции ES360.

Важно отметить, что миграция ES360 помимо своих преимуществ для задач кинематической интерпретации, рассмотренных в данной работе, дает большие возможности при решении задач динамической интерпретации [3].

Использование итерационного подхода в интерпретации и построении глубинно-скоростной модели повышает достоверность и точность структурного каркаса. Суть подхода заключается в проведении нескольких итераций интерпретации с последующим уточнением глубинно-скоростной модели на основе новых построений. Подход позволяет добиться лучшей фокусировки лучей и получить более детальную волновую картину, однако каждая итерация увеличивает продолжительность всего цикла работ.

Использование миграции ES360 требует больших ресурсов вычислительных мощностей, что также увеличивает сроки проведения работ, либо ставит вопрос о повышении мощности вычислительного комплекса или аренде вычислительных мощностей для сохранения прежних сроков проведения работ [2].

Таким образом, в результате проведенных исследований автор представил интерпретацию сейсмического горизонта 3D, горизонта I, построение поверхности галитовой, глинисто-галитовой толщ, сравнение результатов миграции алгоритмов Кирхгофа и ES360, а также осуществил подготовку графических и текстовых материалов для непосредственного доклада по теме работы.

#### Литература

1. Применение технологии полно-азимутальной угловой миграции для исследований терригенных коллекторов на примере одного из месторождений Восточной Сибири / А. С. Сорокин, П. П. Емельянов, Л. Н. Шакирзянов, А. Н. Иноземцев // Геофизика. – 2017. – 12 окт. – С. 85–94.
2. Тяпкина, А. Н. Адекватная скоростная модель – основа эффективного построения сейсмических изображений при картировании ловушек углеводородов, связанных с соляными

куполами / А. Н. Тяпкина, Ю. К. Тяпкин, А. И. Окрепский // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 1. – С. 147–164.

3. Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки для подсчета запасов углеводородов в условиях карбонатных пород с пористостью трещинно-кавернового типа / В. Б. Левянт, И. Ю. Хромова, Е. А. Козлов [и др.]. – Москва : Федер. агентство по недропользованию, 2010. – 250 с.

УДК 622.276

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЖИМАЕМОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ИСПЫТАНИЙ НА ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ  
ПРИ ТРЕХОСНОМ СЖАТИИ**

**А. М. Жуковский**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

**П. П. Повжик**

*РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

*Отмечено, что построение геомеханических моделей скважин и месторождений основывается на информации о пространственном распределении физико-механических свойств горных пород и их напряженно-деформированном состоянии. Физико-механические свойства горных пород получают при проведении лабораторных испытаний на образцах керна. Одним из таких исследований является испытание по определению предела прочности при трехосном сжатии. Рассмотрен подход анализа и интерпретации информации для определения общей сжимаемости, сжимаемости твердой фазы и порового объема при проведении лабораторных испытаний на предел прочности при трехосном сжатии.*

**Ключевые слова:** лабораторные испытания, предел прочности при трехосном сжатии, общая сжимаемость, сжимаемость зерна, сжимаемость порового объема.

**DETERMINATION OF COMPRESSIBILITY BASED  
ON THE RESULTS OF TRIAXIAL COMPRESSION  
STRENGTH TESTS**

**A. M. Zhukouski**

*BelNIPIneft RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

**P. P. Povzhik**

*RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*Construction of geomechanical models of wells and oil fields is based on information about the spatial distribution of physical and mechanical properties of rocks and their stress-strain state. Physical and mechanical properties of rocks are obtained during laboratory tests on core samples. One of such studies is a test to determine the ultimate strength under triaxial compression. This paper considers an approach to the analysis and interpretation of information to determine the total compressibility, compressibility of the solid phase and pore volume during laboratory tests for the ultimate strength under triaxial compression.*

**Keywords:** laboratory tests, triaxial compression strength, total compressibility, grain compressibility, pore volume compressibility.

Керновый материал, извлеченный из скважины, ограничен, при этом хотелось бы получать на одном и том же образце горной породы весь комплекс возможных испытаний: геохимические, петрофизические и геомеханические свойства. Для одного образца выполнить все эти исследования затруднительно либо невозможно по следующим причинам: различные требования к размерам, подготовки, условиям проведения эксперимента, а также разрушение образца при геомеханических экспериментах. В связи с этим в последнее время активно развивается направление «цифрового керна» [1–3], позволяющее создавать цифровой двойник образца керна с возможностью неограниченного проведения на нем цифровых лабораторных испытаний. Таким образом, актуальным является вопрос о максимальном получении информации с проведенных лабораторных испытаний на образцах керна.

Цель работы – разработать методический подход анализа и интерпретации информации для определения общей сжимаемости, сжимаемости твердой фазы и порового объема при проведении лабораторных испытаний на предел прочности при трехосном сжатии.

**Решение задачи.** Исследование физико-механических свойств кернового материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел прочности) проводят на лабораторном оборудовании, воспроизводящем условия залегания: пластовая температура, а также создание всестороннего и порового давления. При проведении экспериментов на предел прочности при трехосном сжатии выполняется запись осевой и радиальной деформации, а также осуществляется регистрация скоростей упругих волн с целью определения динамических упругих свойств. Стандартная схема проведения испытаний такого типа представлена на рис. 1, б).

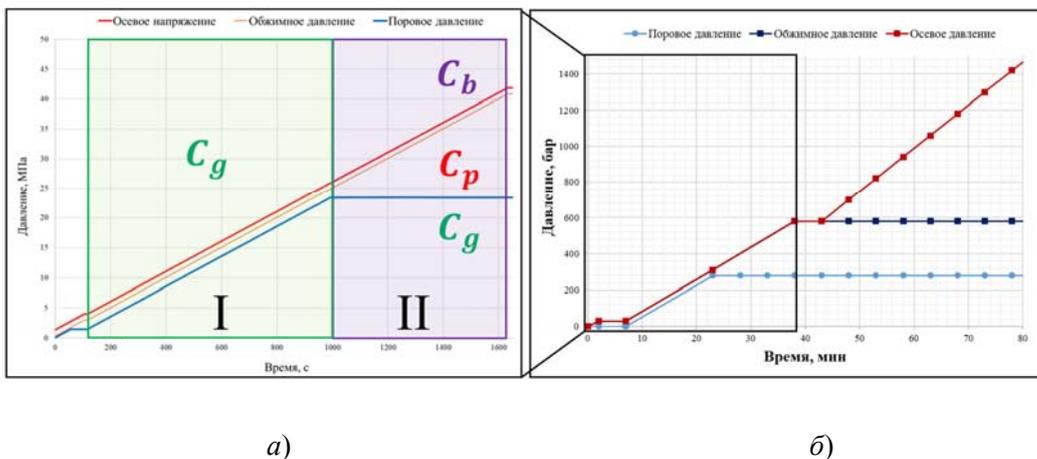


Рис. 1. Выход на пластовые условия (а) и схема нагружения эксперимента (б) по определению предела прочности при трехосном сжатии

Результатом проведения эксперимента является определение пикового значения нагрузки, при которой разрушается образец, – это величина принимается за предел прочности при трехосном сжатии. Для определения упругих модулей используются прямолинейные участки нагружения (рис. 2). По известным значениям осевой деформации и осевого напряжения определяется статический модуль Юнга (рис. 2, а), по отношению изменения радиальной к осевой деформации рассчитывается статический коэффициент Пуассона (рис. 2, б).

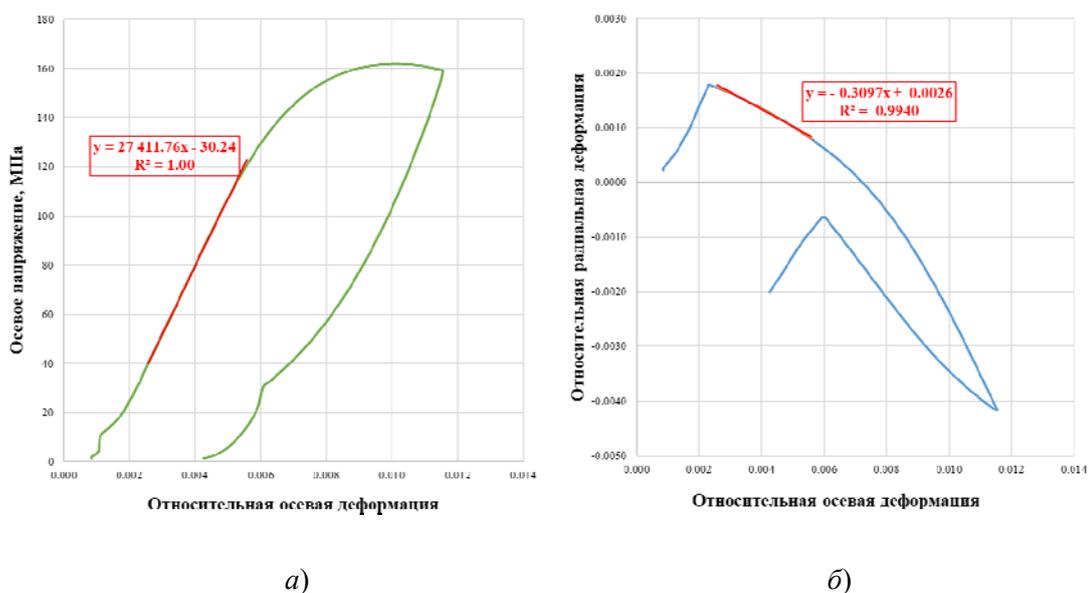


Рис. 2. Определение статического модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б)

Создание и выход на пластовые условия при проведении этого эксперимента происходит по схеме, выделенной на рис. 1, а). При стандартном подходе эта часть эксперимента не применяется на этапе анализа результатов испытаний. В работе предлагается использовать данный участок с целью определения на нем общей сжимаемости, а также сжимаемости твердой фазы и порового объема.

Участок I (рис. 1, а) – это участок изостатического сжатия, на котором, можно определить сжимаемость твердой фазы образца ( $C_g$ ). ( $C_g$ ) Приложение изостатического давления обжима и порового давления к образцам при идентичных контролируемых компьютером значениях интенсивности при нагружении до начального целевого значения радиального напряжения является основным лабораторным методом измерения сжимаемости зерен [4].

На участке II (рис. 1, а) происходит повышение давление обжима до пластовых условий при постоянном поровом давлении, для этого участка можно определить общую сжимаемость ( $C_b$ ) ( $C_b$ ) – это производное значение объемной деформации на данном этапе нагружения по отношению к напряжению обжима [4]. При получении величины общей сжимаемости и зная величину сжимаемости твердой фазы можно рассчитать величину сжимаемости порового объема ( $C_p$ ). ( $C_p$ )

Таким образом, предложенный подход позволяет определить общую сжимаемость, а также сжимаемость твердой фазы и пустотного пространства по результатам записи осевой и радиальной деформации для участка эксперимента, на котором осуществляется выход на пластовые условия при проведении испытаний на предел прочности при трехосном сжатии. Данный участок ранее не использовался при анализе результатов испытаний образцов керн.

#### Литература

1. Балашов, В. А. Технология «цифровой керн» и суперкомпьютерные вычисления / В. А. Балашов, Е. Б. Савенков, Б. Н. Четверушкин // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 6. – С. 503–511.

2. Катанов, Ю. Е. Цифровой керн: аппроксимационные модели текстурных особенностей пустотного пространства песчаников / Ю. Е. Катанов, А. К. Ягафаров, А. И. Аристов // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2023. – Т. 47, № 2 (110). – С. 33–42.
3. Многомасштабные цифровые модели керна: практика применения / И. Д. Магдеев, И. А. Варфоломеев, Н. В. Евсеев [и др.] // ПРОнефть. Профессионально о нефти. – 2024. – Т. 9, № 1 (31). – С. 183–191.
4. МакФи, К. Лабораторные исследования керна: гид по лучшим практикам / К. МакФи, Дж. Рид, И. Зубизаретта. – Москва – Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2018. – 924 с.

УДК 622.24.053.6

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НАКОПЛЕННОГО УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА БУРИЛЬНЫХ ТРУБ**

**М. Г. Гегедеш, Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**А. А. Туркевич**

*РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

*Выполнен анализ современных методов оценки накопленного усталостного износа труб бурильной колонны. Предложен алгоритм динамического расчета накопленной усталости каждой используемой при проходке скважин нефтяных месторождений трубы на основе решения задачи по определению прочности и усталости ее материала в статической постановке для каждого фиксируемого момента времени проходки. Определены необходимые исходные данные для реализации алгоритма.*

**Ключевые слова:** бурильная колонна, усталостные повреждения, износ бурильной трубы, алгоритм расчета накопленного износа.

## **MODERN APPROACHES TO ASSESSING THE ACCUMULATED FATIGUE WEAR OF DRILLING PIPES**

**M. G. Gegedesh, N. V. Bocharov, V. M. Tkachev**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

**A. A. Turkevich**

*RUE “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*The analysis of modern methods for assessing of the accumulated drill string pipes fatigue wear is performed. The article proposes an algorithm for dynamic calculating of the accumulated fatigue of each pipe used in drilling wells based on solving the problem of determining the pipe material strength and fatigue in a static statement for each recorded drilling time moment. The necessary initial data for the algorithm implementation are determined.*

**Keywords:** drill string, fatigue damage, drilling pipe wear, calculation algorithm for accumulated fatigue wear.

В настоящее время на нефтяных месторождениях Республики Беларусь увеличивается количество скважин со сложным профилем – наклонно-направленные скважины с протяженным горизонтальным участком. При бурении таких скважин возникает сложное напряженно-деформированное состояние в бурильных трубах (БТ), которое вызывает рост инцидентов, связанных с усталостным разрушением бурильного инстру-

мента. Подобные инциденты приводят к непроизводительным затратам времени и, как следствие, к ухудшению технико-экономических показателей бурения. Повышаются риски возникновения аварийных ситуаций, утери дорогостоящего оборудования, в том числе с радиоактивными источниками [1]. Современные технологии позволили автоматизировать основные процессы и структурировать существующий порядок работ, однако до сих пор существуют нерешенные проблемы, одной из которых является мониторинг полного жизненного цикла БТ и прогнозирование накопления усталостных повреждений. В большинстве случаев выход из строя БТ связан с усталостным разрушением, которое начинается с микротрещин в результате воздействия переменных напряжений в процессе строительства скважины (бурения). В настоящее время отсутствуют эффективные методы контроля накопленных усталостных повреждений или остаточной прочности трубы при заданном уровне напряжений. В связи с этим необходима система более достоверной оценки состояния БТ, которая будет учитывать весь перечень факторов, влияющих на скорость накопления усталостных повреждений в теле трубы, и позволит рассчитывать (прогнозировать) накопленную усталость БТ, используя данные режимов бурения и параметров скважин. Понимание механизма накопления усталостного износа, приводящего к выходу из строя БТ, дает возможность управлять этим процессом, существенно снизить затраты на содержание фонда БТ и уменьшить количество инцидентов со сломом или размывом труб [2].

Цель данной работы – разработка алгоритма расчета усталостного износа БТ на основе данных считывания геолокационных RFID-меток (радиочастотная идентификация), режимных параметров бурения и инклинометрии скважины.

**Объекты и методики исследований.** В работе исследовалось напряженно-деформированное состояние БТ в процессе бурения скважины. Исходными данными для расчета усталостного износа БТ являлись: считывание вмонтированных в муфту каждой БТ RFID-меток с последующим определением местоположения каждой трубы в бурильной колонне; режимно-технологические параметры бурения, запись которых велась набором датчиков станции геолого-технологических исследований; параметры, характеризующие пространственное положение скважины, в частности, параметр искривления скважины.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В общепринятых мировых стандартах, регулирующих процессы строительства скважины, описаны несколько подходов к оценке накопленного усталостного износа БТ. Например, в стандарте DS-1 [3] рассчитываются условные баллы накопленного износа. При этом расчет производится не для каждой отдельной трубы, а для комплекта труб. Также затруднительно определить нормативное число баллов, которое бы указывало на полный износ БТ. Наиболее подходящим, по нашему мнению, является классический подход кумулятивного усталостного повреждения, описанный в API RP 7G [4] и API IADC DrillingManual [5]. Данный подход заключается в определении процентного соотношения между максимально возможным количеством циклов нагружения трубы к количеству циклов нагружения, совершенных в текущем интервале бурения. Затем для расчета накопленного усталостного износа необходимо просуммировать износ, который приобрела труба на каждом из расчетных интервалов.

Предлагаемый в данной работе алгоритм расчета накопленного усталостного износа БТ заключается в следующем:

1) подбор исходных данных для реализации расчета накопленной усталости каждой трубы бурильной колонны в соответствии с разработанным алгоритмом;

- 2) расчет параметров каждой бурильной трубы колонны, обуславленных их массово-геометрическими характеристиками;
- 3) восстановление последовательности БТ в бурильной колонне на основе данных считывания RFID-меток;
- 4) загрузка фактической инклинометрии в расчетный модуль;
- 5) определение характеристик бурильной колонны в исследуемый момент времени;
- 6) расчет осевых напряжений для каждой бурильной трубы в рассматриваемый момент времени;
- 7) вычисление касательных напряжений (от кручения) для каждой трубы для исследуемого момента времени;
- 8) определение радиальных и окружных напряжений для каждой трубы в рассматриваемый момент времени;
- 9) расчет максимальных изгибающих напряжений с учетом искривления скважины для каждой трубы колонны в рассматриваемый момент времени;
- 10) вычисление расчетного напряжения на основе эквивалентных по Треске;
- 11) определение степени накопленного усталостного износа в материале каждой трубы.

Расчет необходимо проводить для каждой операции, в которой происходит вращение бурильной колонны и наблюдается нагрузка на долото – операции бурения и проработки.

Полученные результаты расчета усталостного износа по предлагаемому алгоритму (рис. 1) согласуются с предположением, что наибольший износ в теле БТ возникает при наибольших изгибающих напряжениях, которые, в свою очередь, появляются на участках с большей интенсивностью искривления ствола скважины.

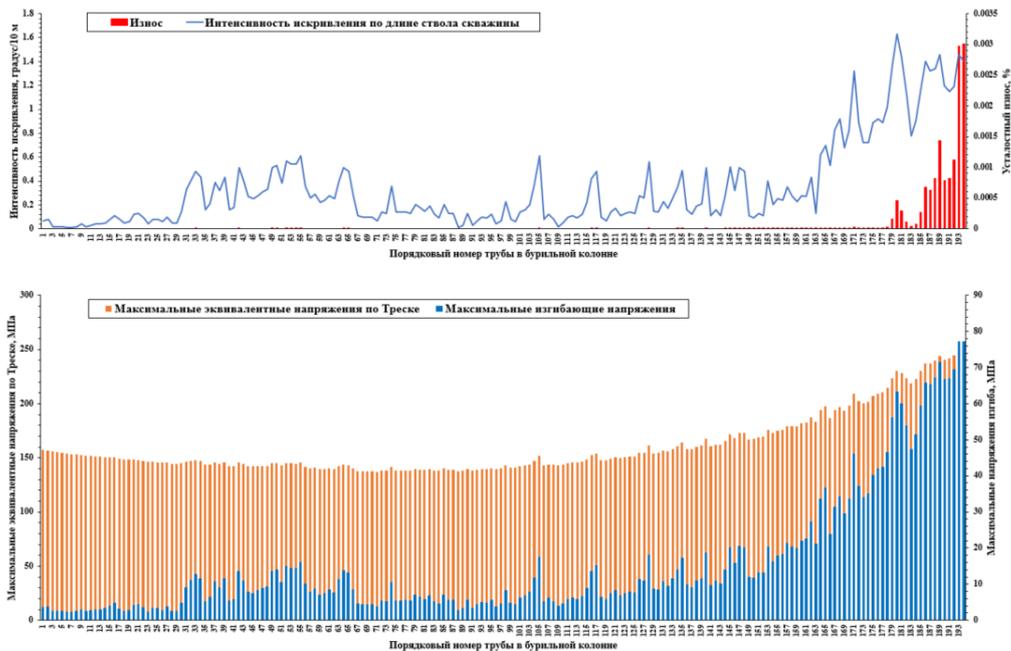


Рис. 1. Результаты расчета изгибающих, эквивалентных напряжений и усталостного износа каждой БТ в бурильной колонне за одну операцию бурения (длительность операции – 27 мин, проходка – 4,1 м)

Таким образом, предлагаемый алгоритм учета усталостного износа БТ позволяет существенно повысить экономическую эффективность бурения, снизить аварийность по сравнению с традиционными подходами, заключающимися в отбраковке труб по наработке всего комплекта БТ.

Л и т е р а т у р а

1. Прогнозирование остаточного ресурса бурильных труб / Д. Л. Бакиров, Д. Я. Патрушев, А. К. Шириев [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2023. – № 12 (372). – С. 13–18. – DOI 10.33285/0130-3872-2023-12(372)-13-18
2. Gubaidullin, R. I. Innovative approach to analysis drilling tool works / R. I. Gubaidullin // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference, 12–15 oct. 2021. – Virtual, Online, 2021. – DOI 10.2118/SPE-206458-MS
3. Стандарт DS-1. Инспекция бурильных колонн / Т. Х. Хилл, Т. М. Вадсворт, К. Бранч, Б. Хаббарт. – Houston, TX : TH HILL Associates, Inc, 2004. – Т. 3. – 253 с.
4. Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits : API RP 7 G. – 14th edition. – Washington : API, 1998. – DC : Aug. 1.
5. IADC Drilling Manual // International Association of Drilling Contractors, March–Apr. 2000. – Vol. 11.

УДК 620.178.4/6

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЧИВОСТИ МОДУЛЯ ЮНГА ГОРНЫХ ПОРОД ИЗУЧАЕМОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА**

**Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Приведены результаты исследования изменчивости модуля Юнга горных пород методом индентирования. Особенностью испытания методом индентирования является небольшая область контакта породы и индентора, что делает возможным исследования небольшого локально однородного объема горной породы. Такой подход позволяет получить полное представление о механических свойствах всех имеющихся на данной глубине механических фаций, что невозможно осуществить стандартными испытаниями на полноразмерных образцах ввиду значительной неоднородности карбонатных горных пород. Расширенный объем исходной информации об упругих свойствах горных пород направлен на улучшение геомеханических моделей, применяемых для проектирования дизайна гидроразрыва пласта и т. д.*

**Ключевые слова:** геомеханика, горные породы, механические свойства, индентирование, неразрушающий метод, модуль Юнга.

**APPLICATION OF THE INDENTATION METHOD TO ASSESS THE VARIABILITY OF THE YOUNG'S MODULUS OF THE ROCKS OF THE STUDIED GEOLOGICAL SECTION**

**N. V. Bocharov, V. M. Tkachev**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The paper presents the results of studying the variability of the Young's modulus of rocks using the indentation method. An advantage of the indentation test is a small area of contact between the rock and the indenter, which makes it possible to study a small locally homogeneous volume of rock. This approach allows us to get a complete representation of the mechanical properties*

*of all mechanical facies present at a given depth, which cannot be done by standard tests on full-size samples due to the significant heterogeneity of carbonate rocks. The expanded volume of initial information on the elastic properties of rocks is aimed at improving geomechanical models used for hydraulic fracturing design, etc.*

**Keywords:** geomechanics, rocks, mechanical properties, indentation, non-destructive method, Young's modulus.

Рост значимости геомеханического моделирования для решения задач по оптимизации разработки нефтегазовых месторождений усиливает потребность в инновационных методах исследования керна для получения дополнительных характеристик, значительно повышающих точность и достоверность геомеханических моделей [1]. Получение качественных исходных данных требует проведения значительного объема лабораторных испытаний, включая керновые исследования упруго-прочностных свойств. Надежность входных данных подтверждается повторяемостью (сходимостью) результатов лабораторных измерений и зависит от обоснованности подходов к выбору локализации интервалов отбора серий образцов керна. Это особенно заметно при исследовании трещинно-каверновых коллекторов. Литологическое разнообразие усиливает неопределенность, а различие масштабных факторов лабораторных и скважинных исследований снижает точность привязки результатов, полученных статическими и динамическими методами. Для получения достоверных корреляционных зависимостей упруго-прочностных свойств пород пласта необходимо обеспечить охват свойств всех механических фаций [2]. Однако исследование карбонатных горных пород осложняется тем, что в стандартных образцах может присутствовать несколько разнородных механофаций, что приводит к получению усредненных упруго-прочностных свойств на изучаемой глубине. Уточненную оценку можно получить при использовании дополнительных инструментов керновых исследований, например, испытание методом индентирования.

Цель данной работы – определение упругих характеристик горных пород в неоднородных карбонатных разрезах с присутствием разных механических фаций на одной глубине методом индентирования.

**Объекты и методики исследований.** В данной работе исследовался керн скважины X Мармовичского нефтяного месторождения. Было выполнено несколько испытаний: два многостадийных трехосных испытания на сжатие стандартных образцов с целью определения упругих свойств; шесть испытаний методом индентирования на вертикально ориентированных фрагментах горных пород, зафиксированных в эпоксидной смоле; три испытания – методом индентирования на торцах вертикальных стандартных образцов.

Испытания методом индентирования для определения модуля Юнга горных пород проводились по методу Оливера–Фарра [3], но с авторской модификацией, заключающейся в циклическом воздействии на испытуемый материал в одном и том же месте, с ростом максимального значения силы вдавливания, что позволяет снизить влияние масштабного фактора, который обуславлен композиционной природой материала горных пород. По мере возрастания нагрузки и соответственно глубины вдавливания и контактной поверхности между индентором и испытуемым материалом увеличивается интегральная сущность дюрометрического испытания, регистрирующего реакцию локально однородного материала в целом, а не его отдельных составляющих (минеральных зерен). Многостадийные трехосные испытания на сжатие проводились

по ступенчатой схеме с последовательным приближением действующих напряжений обжима (боковое давление) и осевого (горного давления) к пластовым условиям. При этом было дополнительное циклическое изменение осевого напряжения при постоянном напряжении обжима на определенных стадиях испытания с постоянным поровым давлением.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Как показано на рис. 1, в работе исследовался керн со значительной неоднородностью и чередованием различных литологических фаций, отличающихся механическими свойствами. Исследование упруго-прочностных свойств по стандартным методикам на образцах  $\varnothing 30 \times 60$  мм или  $\varnothing 38 \times 76$  мм дает усредненные значения упругих свойств, что не позволяет точно оценить диапазон свойств всех механических фаций на данной глубине.

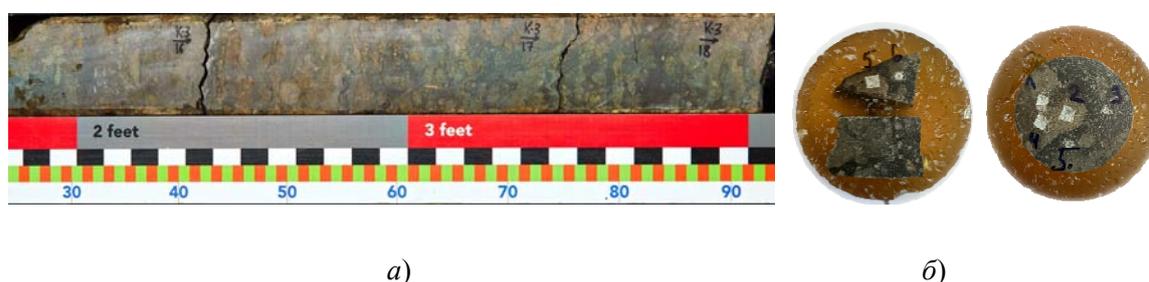


Рис. 1. Фото керна, извлеченного из скважины X Мармовичского месторождения:  
а – полноразмерный керн; б – фрагменты керна, зафиксированного в эпоксидной смоле, с отпечатками разных размеров, образованных после испытания индентированием

Испытание образцов горных пород методом индентирования дает возможность определить механические свойства всех литологических фаций с учетом минералогического состава, характеризующихся различием упругих и прочностных свойств.

На рис. 2 приведены основные результаты данной работы по определению модуля Юнга стандартным способом и методом индентирования. Следует отметить, что в результате стандартного многостадийного трехосного сжатия устанавливается усредненное значение свойств одного исследуемого образца. В то же время испытание методом индентирования позволяет определить диапазон значений матричных упругих характеристик на одном образце, отобранном с определенной глубины, что помогает более точно охарактеризовать распределение упругих свойств. Также представлена гистограмма процентных отклонений средних значений статического модуля Юнга, определенных методом индентирования, от принятой в РУП «ПО «Белоруснефть» референсной кривой распределения статического модуля Юнга по стволу скважины, построенной на основе акустического каротажа и откалиброванной по результатам стандартных испытаний, – отклонение не превышает 25 %, что говорит о приемлемости использования метода индентирования как дополнительного инструмента в исследовании механических свойств горных пород.

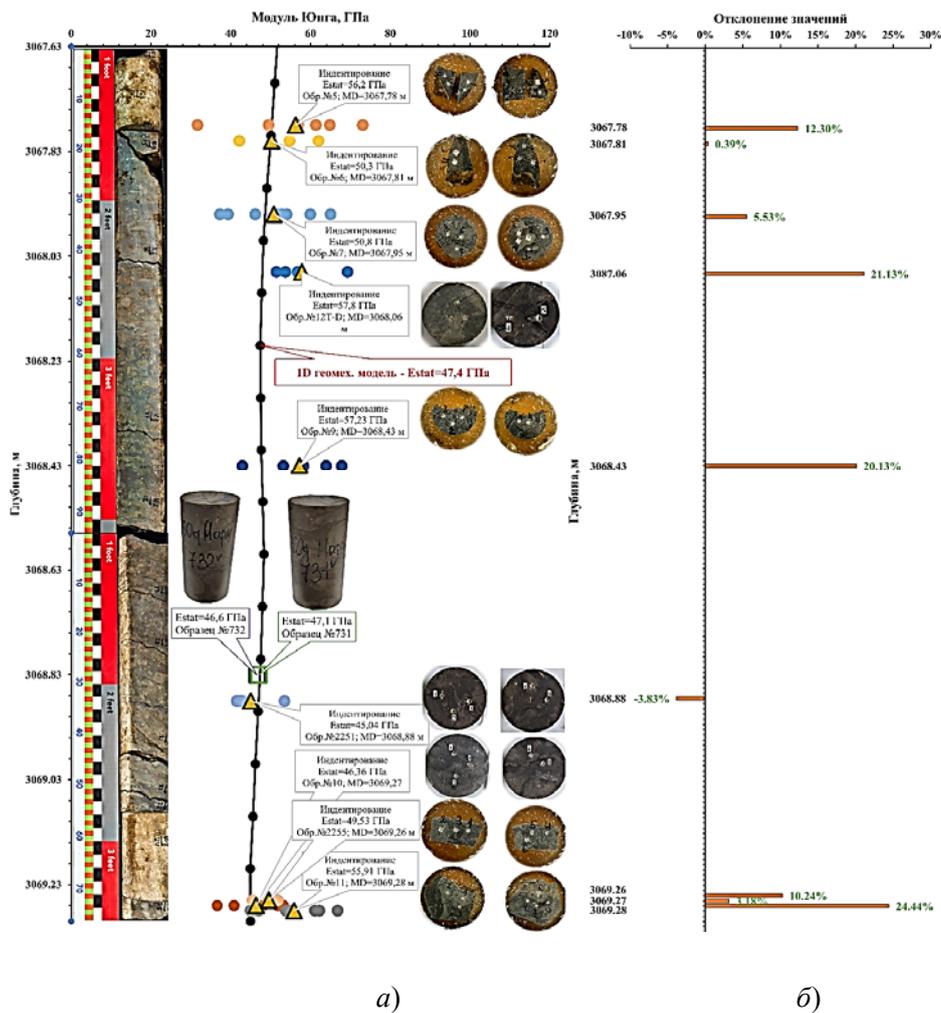


Рис. 2. Результаты исследования:

- а* – сводный планшет, включающий фотоколонку ядра, результаты 1D геомеханического моделирования (модуль Юнга), результаты стандартных испытаний, результаты испытаний методом индентирования:
  - – трехосное многостадийное сжатие; ● – статический модуль Юнга, определенный в процессе одного акта индентирования; ▲ – среднее значение модуля Юнга, определенный в процессе индентирования одного образца;
- б* – отклонение средних значений модуля Юнга, определенного методом индентирования, от принятой в РУП «ПО «Белоруснефть» 1D геомеханической модели (распределения модуля Юнга)

Таким образом, на примере горных пород Припятского прогиба проведено сопоставление результатов дюрOMETрических и стандартных статических исследований модуля Юнга. Анализ полученных результатов позволил сформулировать гипотезу о возможности применения метода индентирования для получения детального распределения модуля Юнга по длине кернового образца. Результаты дюрOMETрического исследования в совокупности с данными, полученными при объемном сжатии стандартных образцов, сопоставлены с каротажными диаграммами распределения модуля Юнга. Высокая степень детализации наиболее актуальна для оценки физико-механических свойств интервалов с тонкочередующимися пропластками, а также при подготовке граничных условий для построения цифрового двойника ядра. При этом для проведения испытаний не требуется специализированного оборудова-

ния, а также трудоемкой подготовки образцов. Также метод индентирования позволяет проводить экспресс анализ упругих свойств горных пород на частицах шлама в скважинах, где отбор керна не предусмотрен.

*Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант №ГР 20240634 от 22.04.2024 г.).*

**Литература**

1. Специализированные лабораторные исследования керна для решения задач бурения, ГРП и разработки нефтегазовых месторождений / М. Д. Субботин, В. А. Павлов, Д. О. Кроль [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – №. 10. – С. 84–92.
2. Использование предварительной 1D геомеханической модели для планирования исследований керна / В. А. Фадеева [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – № 7. – С. 29–35.
3. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of materials research. – 1992. – Vol. 7, N 6. – P. 1564–1583.

УДК 641.642

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗИМНЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ СВЕРХБОЛЬШИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЫРОЙ НЕФТИ**

**Янян Юй**

*Чжэцзянская нефтехимическая компания с ограниченной ответственностью, Китайская Народная Республика*

**А. Б. Невзорова**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Отмечено, что большие незакрепленные резервуары для хранения нефти являются одними из передовых устройств нефтяных запасов, и исследованиям их безопасности уделено большое внимание. В качестве объекта исследования выбран недавно построенный большой резервуар с плавающей крышей размером  $15 \times 10^4 \text{ м}^3$  в Китае. С использованием методом конечных элементов ANSYS Workbench проведен анализ стрессовых условий, напряжений и деформаций резервуаров под воздействием температуры при различных уровнях заполнения (от 0 до 20 м). Даны рекомендации по улучшению условий эксплуатации.*

**Ключевые слова:** топливные емкости, температурное поле, анализ напряжений, ограниченный элемент, ANSYS.

**WINTER SAFETY STUDY OF ULTRA-LARGE CRUDE OIL STORAGE TANKS**

**Yu Yangyang**

*A refining and chemical integration project of Zhejiang Petrochemical Co., Ltd, China*

**A. Nevzorova**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Large loose oil storage tanks are one of the advanced devices of oil reserves, and research on their safety has attracted a lot of attention. In this article, a newly built large tank with a float-*

ing roof measuring  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  in China has been selected as the object of research. Stress conditions, stresses and deformations of reservoirs under the influence of temperature at various filling levels (from 0 to 20 m) were analyzed using the ANSYS Workbench finite element method. Recommendations for improving the operating conditions are given.

**Keywords:** tank, temperature field, stress analysis, finite element, ANSYS.

Резервуар для хранения сырой нефти размером  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  представляет собой очень большой нефтяной резервуар. В настоящее время отсутствуют международные технические стандарты для анализа напряжений и расчета конструкции его ключевых частей. Чтобы убедиться в рациональности конструкции некоторых ключевых частей большого резервуара и обеспечить безопасность и надежность его эксплуатации, необходимо провести комплексное нагрузочное испытание и анализ резервуара, а также оценить безопасность резервуар для хранения. Особенно следует изучить изменения напряжений в различных частях резервуара из-за влияния изменений температуры в очень больших резервуарах для хранения сырой нефти в зимний период [1–3].

Учитывая большую разницу температур зимой и летом в определенной области, а также разницу температур внутри и снаружи больших резервуаров для хранения, в этом проекте изучается влияние температуры на резервуары для хранения.

На сегодняшний день в мире сравнительно мало анализируется температурное поле больших резервуаров для хранения по сравнению с другим оборудованием, а в данной работе приведен анализ температурного поля резервуаров для хранения сырой нефти объемом  $150\,000 \text{ m}^3$  [4]. До настоящего времени в Китае не проводился комплексный температурный анализ сверхбольших резервуаров для хранения сырой нефти [5].

Цель работы – провести оценку прочности резервуаров-хранилищ, отключаемых в зимний период, и путем анализа влияния различных температур сырой нефти на нагрузку в резервуарах хранения в зимний период построить модель по распределению напряжений по конструктивным частям резервуара.

**Методы исследований.** Для проведения расчетов использовалась версия программы ANSYS 11.0 [6]. Структурная схема резервуара для хранения масла показана на рис. 1.

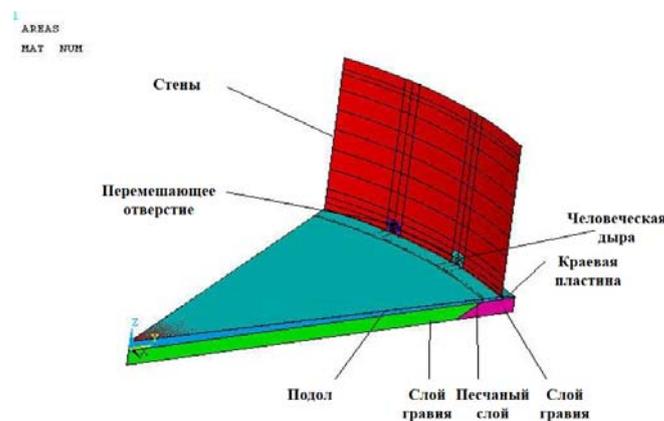


Рис. 1. Краткая схема конструкции резервуара

Согласно теории анализа стационарного температурного поля, закон распределения температуры каждого компонента не имеет ничего общего со временем и связан только с размером конструкции, материалом и термическими граничными условиями каждого компонента. С этой целью в соответствии со структурой резервуара для хранения масла мы всесторонне рассмотрели стеновую пластину, нижнюю пластину, краевую пластину, большой угловой сварной шов, войлок из минеральной ваты изоляционного слоя и материалы фундамента, выбрали плоскость всего резервуара в качестве объекта исследования.

**Результаты.** Для анализа напряжений в резервуаре для хранения нефти построена упрощенная осесимметричная и пространственная модели резервуара. Используя метод конечных элементов, проанализированы температурное поле и поля напряжений резервуара.

Представим основные выводы данной работы, которые включают в себя следующие аспекты:

1. Установлено, что расчетная модель конечных элементов осесимметричного температурного поля и пространственного поля напряжений резервуара позволяет точно рассчитать температуру и распределение напряжений, а также получить состояние распределения напряжений в резервуаре при различных температурах и разных уровнях жидкости.

2. В зимних температурных условиях распределение температуры всей трубной пластины резервуара для хранения, нижней и краевой пластины является относительно приемлемым. Эти температуры и разница температур – основные нагрузки, которые вызывают смещение и напряжение резервуара для хранения.

3. В зимних температурных условиях от 0 до минус 50 °С напряжения каждой детали накопительной емкости, не запущенной в производство, изменяются, однако это не влияет на соответствие требованиям прочности.

4. Нагрузка каждого компонента резервуара для хранения, введенного в эксплуатацию, относительно велика под воздействием зимних температур. Это происходит главным образом из-за низкой температуры наружного воздуха зимой и большой разницы температур с сырой нефтью в резервуаре. При этом увеличивается термическая нагрузка накопительного бака.

Моделирование позволило установить, что зимой более высокая температура масла увеличивает радиальную деформацию стенки резервуара, в то время как более низкая внешняя температура уменьшает радиальную деформацию каждой части резервуара. Этот вид положительной и отрицательной деформации может соответствующим образом уменьшить нагрузку на каждую часть резервуара для хранения. Показано, что нагрузка на стенку резервуара зимой значительно выше. Летом нагрузка на стенку резервуара в основном вызвана большой разницей между температурой окружающей среды и температурой сырой нефти.

Подводя итог, можно сказать, что в условиях подготовки к зиме все детали резервуаров, не запущенные в производство и запущенные в производство, соответствуют требованиям по прочности и работают безопасно.

Таким образом, в результате анализа подготовки к зиме пустых резервуаров и резервуаров для хранения, введенных в производство, основные предложения заключаются в следующем:

– температура сырой нефти зимой не должна быть слишком высокой при условии обеспечения нормальной температуры подачи, а рекомендуемая температура масла составляет 40–50 °С;

– толщина усиливающих колец смесительных отверстий и люков может быть соответствующим образом увеличена для снижения концентрации напряжений в отверстиях.

*Авторы выражают признательность китайской компании «Daqing Petroleum» за оказанную помощь при проведении данного исследования.*

**Литература**

1. Тунчжу, У. Обзор разработки больших вертикальных нефтяных резервуаров / У Тунчжу // Технология нефтехимического оборудования. – 2004. – № 25 (3). – С. 56–58.
2. Чжоу Шуся Знакомство с химическими контейнерами / Чжоу Шуся, Чжан Хуцзе, Лу Чуньцин // Нефтехимическая промышленность Внутренней Монголии. – 2006. – № 17 (8). – С. 63–64.
3. Ши Минсянь. Развитие и перспективы технологии химического технологического оборудования в моей стране / Ши Минсянь // Современная нефтехимическая промышленность. – 2005. – № 13 (12). – С. 3–7.
4. Ван Тунъюань. Вопросы классификации сосудов под давлением / Ван Тунъюань // Qilu Petrochemical Industry. – 1995. – № 5. – С. 51–52.
5. Ши Юцинъ Текущее состояние и прогресс в проектировании больших резервуаров для хранения нефти / Ши Юцинъ, Чжоу Хунмей // Нефтяные машины. – 2006. – № 7 (1). – С. 41–42.
6. Шимановский, А. Моделирование перетекания жидкости в резервуаре с использованием программных комплексов ANSYS и STAR-CD / А. Шимановский, А. Пуятю // Вестник Уральского государственного технического университета. – 2005. – № 11. – С. 130–110.

УДК 681.5:553.98:622.24:543.06

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА АВАРИЙ В ПРОЦЕССЕ СТРОИТЕЛЬСТВА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН**

**О. В. Захаров, И. В. Захаров**

*Общество с ограниченной ответственностью  
«Научно-производственное объединение «Союзнефтегазсервис»,  
г. Москва, Российская Федерация*

**Н. В. Бочаров**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Приведен опыт применения предиктивной аналитики и глубокого обучения для выявления и предотвращения осложнений и аварийных ситуаций при строительстве нефтяных и газовых скважин. Представлены разработанные программные продукты для формирования наборов данных и обучения моделей по Методике прогнозирования аварийности. На примерах показаны шаги, анализ которых позволил разработать и опробовать на реальных примерах Методику версии 2.0. Исходя из результатов установлено, что использование таких технологий увеличивает уровень безопасности и сокращает объем непроизводительного времени при строительстве нефтяных и газовых скважин.*

**Ключевые слова:** машинное обучение, прогнозирование аварийных ситуаций, геолого-технологические исследования, цифровая платформа «Унофактор®».

## APPLICATION OF PREDICTIVE ANALYTICS AND MACHINE LEARNING TO FORECAST ACCIDENTS IN THE PROCESS OF DRILLING OIL AND GAS WELLS

O. V. Zakharov, I. V. Zakharov

*NPO SNGS, the Russian Federation*

N. V. Bocharov

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The paper presents experience in applying predictive analytics and deep learning to identify and prevent complications and emergencies in the construction of oil and gas wells. The developed software products for generating data sets and training models according to the Accident Prediction Methodology are presented. The examples show the steps analysed to develop and test the Methodology version 2.0 on real examples. The results show that the use of such technologies increases the level of safety and reduces the amount of non-productive time in the construction of oil and gas wells.*

**Keywords:** machine learning, well accident forecasting, well logging, Unofactor digital platform.

Освоение труднодоступных месторождений нефти и газа, сложные геологические условия разработки и бурения современных нефтегазовых скважин (в особенности – при морской разработке), наличие в разрезе проницаемых пластов с аномально высокими и низкими пластовыми давлениями – все это вместе с другими факторами диктует необходимость постоянного совершенствования нефтегазосервисных технологий добычи углеводородов и строительства скважин. Однако даже при использовании современных достижений в области конструирования и технологии сооружения нефтегазовых скважин зачастую не удается избежать осложнений и аварий в процессе их строительства, обусловленных рядом геологических и технико-технологических факторов [1, 2].

Данные проблемы приводят к длительным простоям и значительным финансово-организационным затратам на их устранение и ликвидацию. Поэтому своевременное их прогнозирование и предупреждение является крайне важной и актуальной задачей, требующей применения современных инженерных методов и подходов.

Цель данной работы – разработка методики прогнозирования осложнений и аварий при бурении нефтегазовых скважин с помощью предиктивной аналитики и глубокого обучения и ее практическое применение.

**Объекты и методики исследований.** В данной работе описано использование данных геолого-технологических исследований (ГТИ) как одного из основных источников данных для разработки прогнозных моделей машинного обучения, и глубокого обучения, в частности [3].

Для удобного управления потоком данных была разработана так называемая ETL-система Uno.Dataset. Данный инструмент предназначен для объединения потоков каротажной информации из различных баз данных, включая данные с предоставленными кодами операций строительства скважины, и формирования на их основе наборов данных, затем анализируемых и подготавливаемых для обучения моделей глубокого обучения. Обучение моделей выполнялось на серверном инструменте компании под названием Uno.NeuralNetwork, одной из немаловажных целей которого является снижение порога вхождения для неспециалиста с предоставлением подсказок по подбору параметров и архитектуры моделей.

На сегодняшний день одним из основных решений, обеспечивающих безаварийное бурение нефтегазовых скважин, является планирование оптимальных организационных и технологических решений, направленных на минимизацию вероятности возникновения аварийных ситуаций. В этой связи одна из основных задач – это создание не только качественных проектов строительства скважин, но и их оперативная корректировка за минимальное время с учетом актуальных и достоверных данных в целях осуществления безаварийного ведения буровых работ [4–6].

Для решения данной задачи специалистами Научно-производственного объединения «Союзнефтегазсервис» были задействованы первичная геофизическая информация, получаемая со станций ГТИ в рамках агрегатора ГТИ, и разработаны инструменты, адаптированные для нефтегазовой отрасли и реализованные в технологиях искусственного интеллекта и предиктивного анализа данных. Инструментом цифровизации является отраслевая Система интерактивного управления жизненным циклом нефтегазовых месторождений «Унофактор®» (Unofactor®), позволяющая интегрировать различные программные и программно-аппаратные компоненты в единый технологический процесс.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результатом постоянной актуализации разработанных решений с использованием предиктивной аналитики является обновленная методика прогнозирования аварийности при бурении нефтегазовых скважина. В новой версии каждый «главный» параметр ГТИ, так или иначе участвующий в выработке той или иной аварии или осложнения, прогнозируется отдельно от остальных. Имеющаяся обширная база обработанных цифровой платформой данных позволила создать одну модель для прогноза сразу восьми каротажных кривых. Эта особенность дала возможность уйти от создания определенной модели под каждую аварийную ситуацию – поглощение, НГВП, подклинивания или прихват буровой колонны. В то же время это увеличило требовательность к качеству новых данных (отсутствие пропусков, аномальных значений и пр.), которые подаются на вход обученной модели.

Полученные результаты спрогнозированных (или экстраполированных) значений выбранных параметров позволили применить к ним специальные алгоритмы определения аварий. Этот подход представляет собой гибридный метод прогнозирования, заключающийся в экстраполяции параметров ГТИ с помощью модели глубокого обучения с последующей подачей результирующих значений на вход специально разработанных алгоритмов под каждый вид аварии или осложнения. Также в обязательном порядке данные алгоритмы согласовываются с Заказчиками, чтобы они отражали их требования и руководящие документы. Данное решение отличается от решений прочих конкурентов тем, что можно подстраивать его «на лету», без необходимости длительного по времени переобучения моделей на множестве скважинных данных.

Результат применения этого подхода обновленной методики под задачу прогнозирования интенсивности поглощений бурового раствора при бурении на одном из шельфовых месторождений представлен на рис. 1. На графике видны два пика, характеризующие интенсивность поглощения: синим цветом выделено фактическое значение поглощенного объема, оранжевым – прогноз модели за час до данного события. Всего таких пиковых значений в данных оказалось 5 – три из них были определены для обучения модели, которое, несмотря на их малое количество, дало результат. При этом немаловажно, что модель не показала всплески там, где их быть не должно. И это свидетельствует о перспективности дальнейшего развития методики.

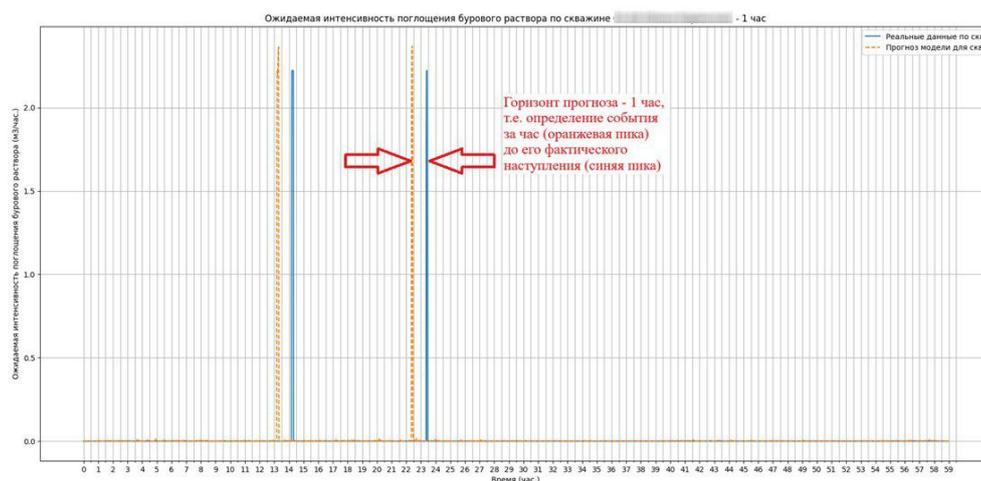


Рис. 1. Результаты прогноза интенсивности поглощения за час до события

Как один из частных примеров апробации данной методики рассматривается оповещение о возможных аварийных событиях не только в посекундном формате данных, а и почасовом. На выходе из алгоритма выдавалось telegram-оповещение с идентификационной информацией скважины и прогнозное значение интенсивности поглощения – ожидается ли поглощение бурового раствора или нет. И здесь полученные результаты применительно к прогнозированию бурового раствора позволяют говорить о перспективности применения разработанной методологии и ее дальнейшего расширения относительно прогнозируемых аварий и осложнений при бурении нефтяных и газовых скважин.

Таким образом, машинное обучение демонстрирует высокую точность и надежность в анализе данных, что способствует повышению эффективности процессов бурения и снижению рисков возникновения аварийных событий. Для выполнения качественного прогноза требуется и качественная разметка данных и их подготовка. Для повышения качества продукта алгоритмы методики при определении аварийности необходимы актуализация и вариативность в зависимости от требований заказчика, чтобы учитывать новые требования отрасли и расширение круга прогнозируемых аварий и осложнений. И поэтому в дальнейших планах – разработать алгоритмы для определения затяжек инструмента, обвалов и осыпей.

#### Литература

1. Применение методов искусственного интеллекта для выявления и прогнозирования осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин: проблемы и основные направления решения / А. Д. Черников, Н. А. Еремин, В. Е. Столяров [и др.] // Георесурсы. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 87–96. – DOI 10.18599/grs.2020.3.87-96
2. Бочаров, Н. В. Особенности цифровизации бурения скважин (на примере нефтяных месторождений Припятского прогиба) / Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев, Т. В. Аткинговская // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сб. науч. тр. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Ун-т им. Аджинкья Д. Я. Патила ; под ред. М. Н. Андриянчиковой. – Гомель, 2023. – С. 93–96.
3. Бочаров, Н. В. К вопросу применения агрегатора цифрового бурения для оценки эффективности строительства скважин (на примере скважин месторождений Припятского прогиба) / Н. В. Бочаров, Т. В. Аткинговская, Д. С. Матвеев // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 г. : в 2 ч. /

М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2023. – Ч. 2. – С. 35–38.

4. Предупреждение и ликвидация газонефтеводопроявлений и открытых фонтанов скважин. ВЕРСИЯ 1.0 : Стандарт Компании ОАО «НК» Роснефть. ПЗ-05С-0257.
5. Руководство по предупреждению и ликвидации газонефтеводопроявлений при строительстве и ремонте скважин : СТО Газпром 2-3.2-193-2008.
6. Документы нормативные для строительства скважин. Руководство по предупреждению аварий, осложнений и брака при строительстве скважин : СТО Газпром 7.4-007-2011.

УДК 622.279.3

## **ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ФОНДА СКВАЖИН**

**В. В. Фролов**

*Нефтегазодобывающее управление «Речицанефть»  
РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»*

**А. Б. Невзорова**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Показано, что для улучшения прогнозирования режима работы механизированного фонда скважин необходимо проводить непрерывный мониторинг и анализ отклонений их текущего состояния от плановых показателей с учетом изменения технологических параметров пласта. Целью проводимых исследований является разработка статистической цифровой модели прогнозирования оптимального режима работы скважин со штанговыми глубинными насосами. Предложен алгоритм анализа скважины на основе динамограмм в реальном времени и прогнозирование режима их дальнейшей эксплуатации.*

**Ключевые слова:** динамограмма, штанговый глубинный насос, механизированный фонд.

## **DIGITAL ANALYSIS OF THE OPERATION OF THE MECHANIZED WELL FUND**

**V. V. Frolov**

*Rechitsaneft Oil and Gas Production Department  
RUE “Production Assotiation “Belorusneft”*

**A. B. Nevzorova**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*To improve the forecasting of the operating mode of the mechanized well stock, it is necessary to continuously monitor and analyze deviations of their current state from planned indicators, taking into account changes in the technological parameters of the reservoir. The purpose of the research is to develop a statistical digital model for predicting the optimal mode of operation of wells with rod depth pumps. An algorithm for analyzing wells based on dynamograms in real time and predicting the mode of their further operation is proposed.*

**Keywords:** dynamogram, rod depth pump, mechanized fund.

Оперативный контроль работы фонда нефтяных скважин со штанговыми глубинными насосами на месторождении проводится круглосуточно для своевременного обнаружения отклонений от прогнозных показателей по фактическим данным,

которые могут сигнализировать о предаварийном состоянии штангового глубинного насоса [1]. Например, превышение выставленной уставки по какому-либо параметру может привести к аварийной остановке объекта, которая может закончиться дорогостоящим ремонтом и длительным простоем фонда с сопутствующими потерями [2].

Визуальный анализ ситуации специалистами не всегда может выявить критическую ситуацию без дополнительных сопоставлений влияющих факторов и определенных технологических особенностей конкретной скважины [3]. Все это усложняет анализ, либо частично или полностью его исключает в период отпуска или болезни специалиста. Поэтому актуальным является внедрение цифровых технологий интеграции систем автоматического съема показателей, интеллектуальных систем обработки больших данных в цифровую модель скважины и всего месторождения [4].

Цель работы – разработка статистической цифровой модели прогнозирования оптимального режима кратковременно-периодической эксплуатации фонда скважин со штанговыми глубинными насосами (ШГН) на основе анализа гидравлического динамометрирования.

**Решение задачи.** Динамометрирование эксплуатируемых ШГН скважин осуществляется дистанционно из центрального диспетчерского пункта [5]. С этой целью скважины оборудуются специальными тензометрическими датчиками усилий и датчиками хода полированного штока.

В настоящее время оперативный дистанционный мониторинг работы фонда ШГН (рис. 1) на Речицком месторождении осуществляется за 373 объектами на постоянной основе в нескольких режимах:

- 1) статус скважины – в данном режиме возможно определить конкретное состояние скважины, при этом необходимо поочередное переключение объектов и нет возможности просмотра динамограммы;
- 2) групповой просмотр – позволяет оценить состояние группы скважин с отражением основных параметров работы, но также не дает возможности качественно оценить динамограммы;
- 3) режим анализа – позволяет оценить состояние скважины с учетом текущих параметров, а также провести анализ динамограммы (рис. 1).

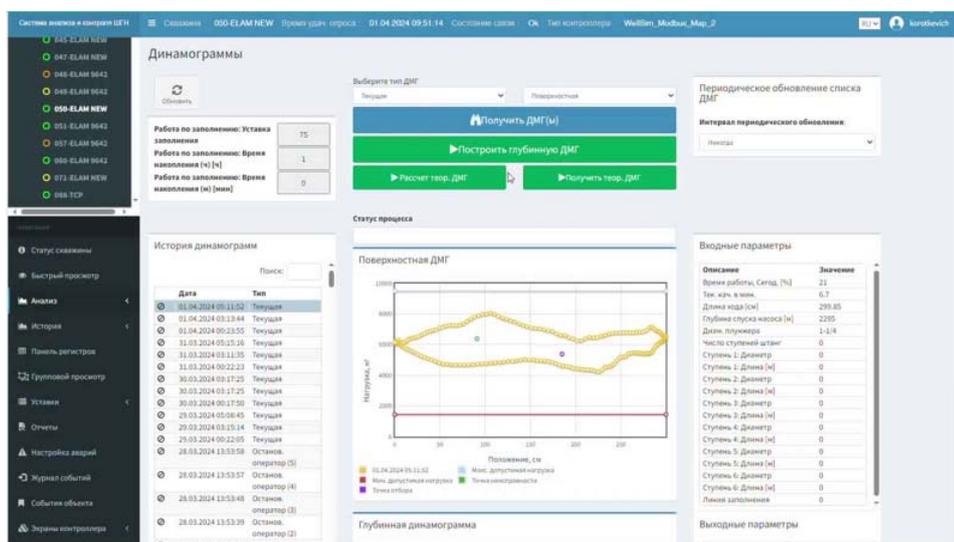


Рис. 1. Режим анализа работы скважины по данным оперативного контроля

При наблюдении за длительной эксплуатацией группы скважин анализ динамограммы используется для выбора режима их работы, обеспечивающего требуемый отбор жидкости при минимальных затратах энергии и максимальной эксплуатационной готовности. На ежедневной основе технологический персонал пользуется режимом анализа, и рабочий процесс сводится к переключению скважин по результатам сравнения динамограммы скважины с предыдущей или шаблонной. Такие манипуляции повторяются по всему фонду скважин ШГН. При этом вид динамограммы после выхода на режим остается практически неизменным. Однако необходимо учитывать возможные изменения, которые могут происходить в скважинах и изменять вид динамограммы из-за влияния газа, неполного заполнения плунжера, отказа в работе клапанов, обрыва или отворота штанг, выхода плунжера из цилиндра насоса, отложения парафина. Перечисленные процессы обычно приводят к изменению нормальной динамограммы в аварийную. Если не предпринять своевременные меры по восстановлению работоспособности оборудования, это вызовет преждевременный выход скважины из эксплуатации.

Таким образом, разработка статистической цифровой модели прогнозирования оптимального режима кратковременно-периодической эксплуатации скважин сводится к анализу для каждой динамограммы координаты нагрузки и сравнению ее с эталонным значением. В процессе мониторинга осуществляется определение процента отклонения координаты от базовой и сравнение с эталонной динамограммой. Эталон корректируется после изменения длины хода, замены датчика нагрузок и других манипуляций, после которых меняется динамограмма. Анализ полученных динамограмм проводится в программе для системы диспетчерского контроля NAFTASCADA в текущие сутки с 0 до 6 ч (временной интервал может меняться и настраивается), а полученные результаты приводятся в отчете, где отражаются динамограммы с выявленными отклонениями.

Все типовые динамограммы имеют повторяющуюся форму. Можно выделить следующие типовые варианты отклонений динамограммы от нормальной работы оборудования: влияние газа, утечки в приемной и нагнетательной частях, заклинивание плунжера, заклинивание насосных штанг, обрыв/отворот штанг. В нашем случае задача сводится к сравнению фактически имеющейся динамограммы с ее характерными видами. При этом базу типовых динамограмм для обучения сети можно набрать по имеющимся динамограммам отказов ШГН.

К настоящему времени собрана большая база динамограмм скважин Речицкого месторождения с помощью системы дистанционного линамометрирования (период наблюдения – 5 лет), на основе которой разработаны методика и алгоритм диагностики работы ШГН по анализу косвенных показателей. Исходя из этого строится цифровая модель скважины и в случае необходимости принимается решение по прогнозированию ремонта за 2 месяца до фактического, чтобы получить достаточно времени для принятия превентивных мер.

В связи с этим для прогнозирования режима работы механизированного фонда скважин необходимо проводить непрерывный мониторинг и анализ отклонений текущего его состояния с учетом изменения технологических параметров пласта.

Разработанная на основе статистических данных по динамометрированию скважин цифровая модель позволит проводить в режиме он-лайн прогнозирование оптимального режима эксплуатации скважин в условиях повышенного солеотложения, что в результате повысит их производительность.

Литература

1. Ясашин, В. А. Повышение эффективности добычи нефти за счет внедрения интеллектуального оборудования / В. А. Ясашин, А. А. Смирнова // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2019. – №. 3. – С. 17–22.
2. Шагиев, В. Р. Системы измерения технологических параметров механизированных нефтескважин / А. Р. Шагиев, М. И. Хакимьянов // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2015. – №. 2. – С. 5–9.
3. Фролов, В. В. Эффективность эксплуатации насосного оборудования нефтяных скважин в условиях повышенного солеотложения / В. В. Фролов, А. Б. Невзорова // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сб. науч. тр. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Ун-т им. Аджинкья Д. Я. Патила ; под ред. М. Н. Андриянчиковой. – Гомель, 2023. – С. 166–168.
4. Миловзоров, Г. В. Системы управления для интеллектуальных скважин, эксплуатируемых глубинно-насосным способом / Г. В. Миловзоров // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – №. 1. – С. 55–58.
5. Ковшов, В. Д. Динамометрирование, моделирование и диагностирование состояния глубинной штанговой насосной установки / В. Д. Ковшов, М. Е. Сидоров, С. В. Светлакова // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – №. 3. – С. 25–29.

УДК 550.84.08

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОСОДЕРЖАНИЯ ДИСТИЛЛЯЦИОННО-ЭКСТРАКЦИОННЫМ МЕТОДОМ НЕТРАДИЦИОННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ СКВАЖИНЫ 452 РЕЧИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**В. С. Далба, Е. Н. Ходьков, А. А. Цагельник**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

*Описан порядок проведения и результаты исследований в лабораторных условиях по моделированию остаточной водонасыщенности дистилляционно-экстракционным методом. Цель работы заключается в выявлении преимуществ и недостатков метода при определении количественного содержания пластовой воды в образцах керна в лабораторных условиях применительно к нетрадиционным породам-коллекторам. Отмечено, что данные исследования входят в число актуальных задач, решение которых обеспечивает высокую оценку надежности применяемых данных при подсчете запасов углеводородов.*

**Ключевые слова:** остаточная водонасыщенность, аппарат Закса, керн, экстрагирование, пористость.

**DETERMINATION OF WATER CONTENT BY DISTILLATION-EXTRACTION METHOD OF NON-CONVENTIONAL RESERVOIRS WELL 452 OF THE RECHITSA FIELD**

**V. S. Dalba, E. N. Khodkov, A. A. Cagelnik**

*BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*The procedure and results of laboratory studies on modeling residual water saturation using the distillation-extraction method are described. The purpose of the work is to identify the advantages and disadvantages of the method in determining the quantitative content of formation water in core samples in laboratory conditions, in relation to unconventional reservoirs. These studies*

*are among the current problems, the solution of which provides a high assessment of reliability when calculating hydrocarbon reserves.*

**Keywords:** residual water saturation, Sachs apparatus, core, extraction, porosity.

Образование залежи углеводородов сопровождается вытеснением поровой (пластовой) воды углеводородной фазой, при этом часть воды остается в порах горной породы вследствие действия поверхностно-молекулярных и капиллярных сил. Воду, содержащуюся вместе с нефтью или газом в залежи после ее формирования, в петрофизике принято называть остаточной водой, и характеризуется она величиной остаточной водонасыщенности (об. %) или остаточного водосодержания (мас. %) [1]. Лабораторные методы определения остаточного водосодержания нетрадиционных пород-коллекторов должны обеспечивать получение исходных данных для дальнейшего подсчета запасов и проектирования разработки месторождений углеводородов.

Образцы нетрадиционных пород-коллекторов из отложений петриковского и елецкого горизонтов Речицкого месторождения имеют слоисто-неоднородное строение, что при их первичной пробоподготовке к исследованиям (выбуривание, экстрагирование, сушка, насыщение и т. п.) часто приводит к их расслаиванию и последующему нарушению целостности образцов или разрушению [4].

Для определения остаточной водонасыщенности в лабораторных условиях существуют прямые и косвенные методы оценки остаточного водосодержания. Прямые методы основаны на непосредственном измерении количества извлеченной поровой воды из образцов керна путем теплового воздействия, выщелачивания органическим растворителем, например, толуолом, метанолом и др. Косвенные методы предусматривают определение остаточной воды после тщательной экстракции образца породы растворителями (толуолом, бензолом и т. д.), сушки при постоянной температуре, вновь насыщение флюидом (пластовой либо дистиллированной водой) с последующим моделированием остаточной водонасыщенности методами центрифугирования, полупроницаемой мембраны или капиллярной вытяжки. В процессе исследования значений остаточной водонасыщенности косвенными методами на образцах породы часто появляются трещины или они полностью утрачивают консолидацию (в результате воздействия центробежных сил или перепадов давлений) и становятся непригодными для дальнейших лабораторных исследований.

Как показали результаты лабораторных исследований нетрадиционных пород-коллекторов Речицкого месторождения, значения величины остаточной воды в породе, полученные косвенными методами (центрифугирования, полупроницаемой мембраны и капиллярной вытяжки) завышены в наиболее продуктивной части пород и слабодифференцированы по разрезу [4]. Поэтому для использования данных для подсчета запасов были рекомендованы и опробованы прямые замеры остаточной водонасыщенности на образцах породы, отобранных из герметизированного керна.

Для получения максимально корректных результатов по определению остаточной водонасыщенности исследования проводились дистилляционно-экстракционным методом. В качестве образцов использовались пробы породы (обломки), которые отбирались из центральных частей полноразмерного керна, где насыщенность порового пространства наименее подвержена изменению (исключалось влияния бурового раствора на характер насыщения).

Исследования по определению водонасыщенности дистилляционно-экстракционным методом и открытой пористости осуществлялись на выборке из двадцати образцов (обломков) (рис. 1) из керна скважины 452 Речицкого месторождения.



Рис. 1. Обломки керна скважины 452 Речицкого месторождения

Определение остаточной водонасыщенности выполнялось прямым (дистилляционно-экстракционным) методом на аппарате Закса ВН-2 (рис. 2).

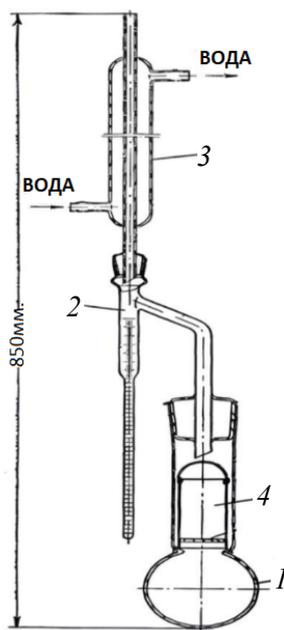


Рис. 2. Схема аппарата Закса ВН-2

Аппарат состоит из четырех частей: стеклянной круглодонной колбы 1, ловушки со шкалой 2, обратного стеклянного холодильника 3 и воронки Шотта 4. Колба, ловушка и холодильник соединяются между собой при помощи шлифов, затем собранный аппарат размещается на колбонагревателе.

Принцип работы аппарата Закса представлен следующим образом: в колбу 1 наливают до половины растворитель (толуол), затем устанавливают воронку Шотта 4 с предварительно взвешенным образцом в горловину колбы 1 и собирают весь прибор [2]. Установив циркуляцию воды в холодильнике, включается подогрев колбонагревателя. По мере закипания растворителя попавшая в колбу вода, содержащаяся в порах образца, вместе с толуолом поднимаются в холодильник, где происходит их конденсация. Конденсат воды, вытесняя толуол вследствие большего удельного веса, скапливается в нижней части ловушки, а растворитель – в верхней [3]. Окончание процесса устанавливают в момент, когда растворитель в ловушке и воронке Шотта становится совершенно прозрачным, а уровень воды стабилизируется. По окончании экстрагирования отключают колбонагреватель, аппарату дают остыть и затем, разобрав его, вынимают воронку Шотта с образцом, высушивают керн в сушильном шкафу до постоянного веса. Взвесив образец после экстрагирования и зная общую потерю в весе и ко-

личество воды, по разности определяют количество содержащейся в образце нефти [2]. После завершения определения количества воды также на испытуемых образцах породы проводилось измерение открытой пористости по ГОСТ 26450.1-85.

Проведенные исследования показали, что в среднем остаточная водонасыщенность по выборке исследуемых образцов составила 33,3 % (нефтенасыщенность – 67,7 %).

Зависимости остаточной водонасыщенности от пористости при этом не отмечается. Это свидетельствует о том, что полученные данные по содержанию остаточной воды отображают как матричную, так и слабоконсолидованную часть породы, в то время как для исследования по определению остаточной водонасыщенности косвенными методами отбираются образцы преимущественно из матричной части породы.

Следует отметить, что, используя эти данные при обосновании величины нефтенасыщенности пород-коллекторов, которая необходима при подсчете запасов, необходимо учитывать данные, полученные как прямыми, так и косвенными методами. При этом для получения больших статистических данных, рекомендуется проводить дополнительные исследования на герметизированном керне (и здесь для коллекторов, имеющих слоисто-неоднородное строение, отбирать более масштабную выборку образцов по количеству и исследовать как матричную, так слабоконсолидованную часть).

Таким образом, после проведенных исследований можно выделить преимущества и недостатки дистилляционно-экстракционного метода. Преимуществами метода являются:

– возможность использования пробы породы (обломка), отобранного из центральной части керна, где коллекторские свойства, характер насыщения и смачиваемость имеют наилучшую сохранность. В то время как при применении косвенных методов невозможно использовать слабоконсолидованные образцы, а также возможно изменение смачиваемости (в процессе пробоподготовки), что может напрямую влиять на значение остаточной водонасыщенности;

– простота пробоподготовки при отборе пробы породы и проведения опыта; возможно повторно использовать образец после определения остаточной водонасыщенности в последующих лабораторных испытаниях, таких как исследование фильтрационных емкостных свойств (использование микрообразцов для компьютерной томографии, пористость, капиллярная пропитка и пр.) [1]; определение минералогического состава.

К недостаткам метода можно отнести возможность незначительной потери части воды из-за конденсации в местах соединений прибора, что может повлиять на точность измеряемого параметра. Кроме проблем с точностью результатов к недостаткам относится длительное время эксперимента, которое может достигать до 3-х недель.

#### Литература

1. Казак, Е. С. Лабораторные методы определения водосодержания низкопроницаемых пород-коллекторов / Е. С. Казак, И. А. Родькина, Я. В. Сорокоумова // Вестник Московского университета. Серия 4, Геология. – 2022. – № 6. – С. 56–70.
2. Ковалева, Л. А. Физика нефтяного пласта / Л. А. Ковалева ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Башкир. гос. ун-т. – Уфа : РИЦ БашГУ, 2018. – 197 с. : ил.
3. Макфи, К. Лабораторные исследования керна: гид по лучшим практикам / К. Макфи, Дж. Рид, И. Зубизаретта. – Москва : Ин-т компьют. исслед., 2018. – 924 с.
4. Изучение дальнейшей перспективы освоения низкопроницаемых нетрадиционных пород-коллекторов отложений I–III пачки Речицкого месторождения : отчет о НИР / БелНИПИ-нефть, Гомель, 2022. – № 11-6.2021.

УДК 504.55.052

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО КОМПЛЕКСА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БУРОВОГО ШЛАМА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

А. В. Фурсевич, Е. И. Машечко

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение  
«Белоруснефть», г. Гомель*

*Отмечено, что исследование кернового материала – единственный на сегодняшний день прямой метод количественных измерений «естественных» характеристик пласта, позволяющий ответить на ряд актуальных вопросов в области нефтепромысловой геологии и разработки нефтяных и газовых месторождений. Вместе с тем сплошной отбор кернового материала при бурении скважин является одной из самых дорогостоящих операций в нефтяной отрасли. Также существует проблема, связанная с невозможностью отбора керна необходимого диаметра как по техническим, так и по геологическим причинам. Представлено, что частичным решением указанных выше проблем по нефтяным месторождениям Припятского прогиба стала разработка комплекса методических подходов в направлении отбора и проведения исследований бурового шлама в БелНИПИнефть в Центре обработки, исследования и хранения керна.*

**Ключевые слова:** керн, буровой шлам, лабораторные исследования, пробоподготовка, геофизические исследования скважин.

## DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CONDUCTING A MODERN COMPLEX OF LABORATORY STUDIES OF DRILLING SLUDGE – PRACTICAL APPLICATION

A. V. Fursevich, E. I. Mashechko

*BelNIPIneft RUF “Production Association “Belorusneft”, Gomel*

*Core material is currently the only direct method for quantitative measurements of the «natural» characteristics of the formation, which allows answering a number of topical issues in the field of oilfield geology and the development of oil and gas fields. At the same time, the continuous selection of core material during drilling one of the most expensive operations in the oil industry. There is also a problem associated with the inability to select a core of the required diameter for both technical and geological reasons. A partial solution to the above problems is the development of a set of methodological approaches in the direction of selecting and conducting studies of drilling sludge in the BelNIPIneft, Core Processing, Research and Storage Center.*

**Keywords:** core, drilling sludge, laboratory studies, sample preparation, geophysical studies of wells.

В процессе бурения шлам отбирается из продуктивной части разреза с шагом от десяти до двух метров, что позволяет получить измерения, близкие к профильным, и исследовать породу в пределах всего интервала, вплоть до полного покрытия интересующей зоны. Поэтому качественные результаты лабораторных исследований шлама могут играть одну из ключевых ролей при проектировании и осуществлении технологических операций, в которых используется информация о минералогическом и элементном составе горных пород.

В результате выполнения комплексных современных лабораторных исследований даже небольшое количество бурового шлама достаточной степени кондиционности способно охарактеризовать интересующий интервал в краткие сроки. Полученная

информация может дополнять имеющиеся результаты изучения кернового материала, а в некоторых случаях стать единственной информацией, полученной прямым методом по количественному определению основных петрофизических параметров перспективного разреза, необходимых для принятия оперативных решений.

Целью данной работы являлась разработка комплексных методических подходов отбора, пробоподготовки и лабораторных исследований бурового шлама, а также анализа полученных данных, направленных на практическое их применение.

Пробоподготовка и комплексные лабораторные исследования бурового шлама проводились в БелНИПИнефть на современной лабораторно-приборной базе Центра обработки, исследования и хранения керна. Для пробоподготовки, комплекса лабораторных исследований было отобрано более 783 образца бурового шлама из 8 бурящихся нефтяных скважин РУП «ПО «Белоруснефть».

Пробоподготовка бурового шлама к лабораторным исследованиям состоит из следующих этапов:

- Регистрация шлама, которая включает сортировку образцов шлама в порядке возрастания глубины, пересчет и регистрацию в сводной таблице Excel.

- Гидратация образцов: образцы помещают в стеклянные стаканы и заливают 100 мл дистиллированной воды на 4 ч. В начале и конце замачивания полученная суспензия перемешивается. В процессе замачивания происходит отделение водорастворимых частиц бурового раствора от частиц горной породы.

- Отмыв шлама: отмыв производится дистиллированной водой в объеме не менее 1 л до достижения прозрачности сливаемой жидкости. При этом происходит смыв частиц размером менее 100 мкм, представленных в основном гидратированными частицами бурового раствора.

- Сушка шлама: после мокрого отсева образец из сита переносится в выпарную фарфоровую чашу и помещается в сушильный шкаф на 4 ч при температуре 50 °С.

- Измельчение образцов: метод измельчения зависит от объема высушенного образца. Если объем составляет менее 10 мл, то измельчение производится ручным методом путем растирания молотком на стальной наковальне. Если объем образца – более 10 мл, то измельчение производится механическим методом с использованием планетарной мельницы.

Комплексные лабораторные исследования включают в себя рентгено-флуорисцентный анализ (изучение элементного состава породы), томографические исследования (изучение внутреннего строения и некоторых фильтрационно-емкостных свойств), рентгеноструктурный анализ (изучение минерального состава породы), пиролитические исследования (изучение количества и типа углеводородов, содержащихся в породе), привязку данных к геофизическим исследованиям скважин (ГИС) и анализ результатов, выдачу рекомендаций.

В результате проведенных исследований авторами изучены, сопоставлены и увязаны данные по образцам проб шлама в количестве 783 штук с результатами обработки ГИС по 8 скважинам Припятского прогиба. В результате установлено, что информация, полученная по пробам шлама при должной увязке с данными ГИС, способна существенно уточнить минералогическую модель сложнопостроенных и нетрадиционных пород-коллекторов, что, в свою очередь, позволяет более точно определять их фильтрационно-емкостные свойства, в частности, пористость.

В процессе обработки комплекса ГИС достоверно установлено, что породы в интервалах верхнесоленосной толщи в изученных скважинах представлены гали-

том, тогда как по результатам XRD по шламу фиксируется практически полное его отсутствие. Таким образом, показано, что при существующей методике бурения скважин и применяемых буровых растворах, а также методике пробоподготовки нецелесообразно в данных интервалах отбирать пробы пород из шлама для исследования методом XRD.

Ввиду того, что породы, составляющие шлам, во время проходки между собой перемешиваются, была разработана методика анализа сходимости результатов минералогии на буровом шламе и на образцах керна. При использовании данной методики максимально учитываются такие факторы, как сложность геологического строения, частое переслаивание различных литотипов, смешивание горных пород, составляющих пробу шлама. После применения разработанных расчетов преимущественно отмечается хорошая и отличная сходимость результатов, и лишь в редких случаях – средняя сходимость. Плохой сходимости не отмечается. Пример графиков сходимости представлен на рис. 1.

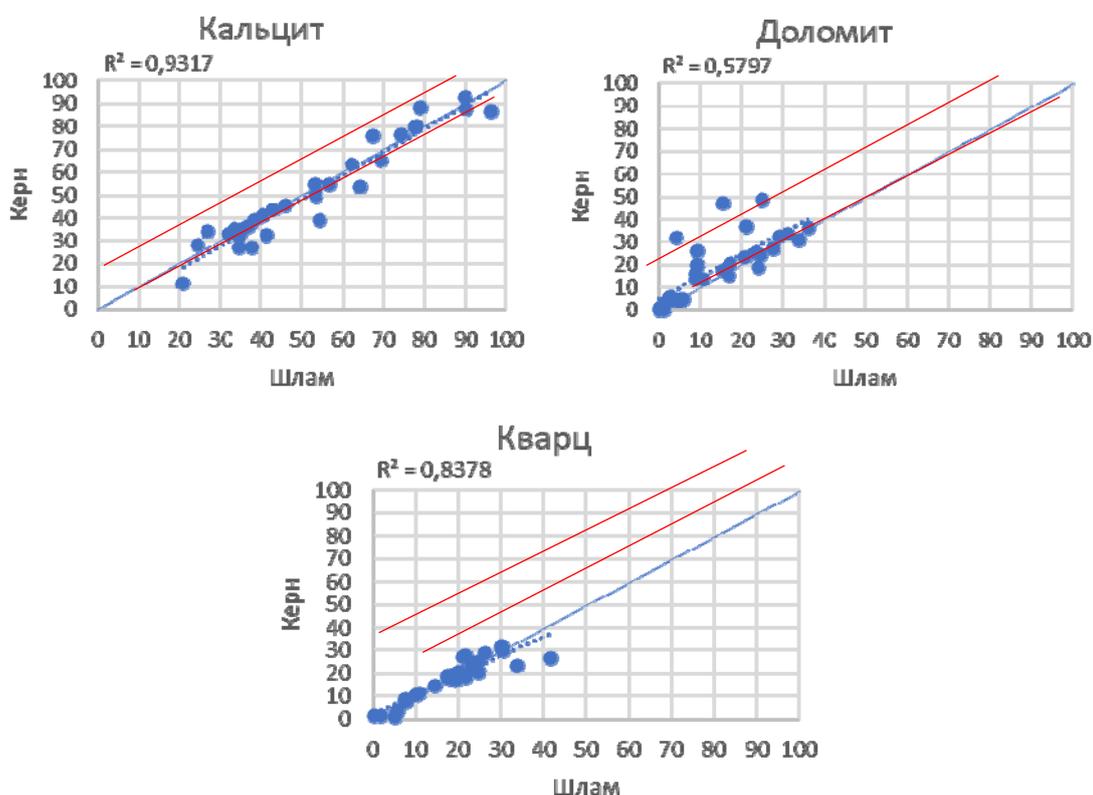


Рис. 1. Примеры графиков сходимости основных минералов, измеренных по шламу и рассчитанных из измеренных по керну (скважина Речицкая 19s3, отложения Петриковского горизонта)

Статистическая обработка результатов проведенного сопоставления позволила получить следующую информацию: среднюю разницу, среднее соотношение, процент образцов с соотношением менее 1.5, процент образцов с разницей менее 10 %, коэффициент сходимости.

Получение достоверных (в том числе оперативных) данных о свойствах горных пород из любой части разреза позволит более полно охарактеризовать разрез оса-

дочного чехла Припятского НГО, а также будет способствовать более качественному решению различных нефтепоисковых и нефтепромысловых практических задач. Для получения корректных результатов проводимых исследований буровому шламу нужно иметь необходимую степень кондиционности: шаг отбора проб шлама должен составлять 1–2 м, а количество пробы – быть достаточным для проведения комплекса лабораторных исследований. При этом следует учитывать, что образцы шлама, отобранные из скважин, бурящихся на буровых растворах на нефтяной и органоминеральной основе, не могут дать достоверную информацию о содержании легких углеводородов в породе.

В процессе бурения скважин и боковых стволов на нефть и газ могут наблюдаться различные осложнения, влияющие на время строительства скважины и соответственно – на ее себестоимость. Оперативный комплексный анализ шлама из «проблемного» места в некоторых случаях помогает установить минеральный и элементный состав пород в интервале осложнения. Кроме того, качественные исследования бурового шлама достаточной кондиционности позволят сократить отбор керна диаметром 40–45 мм из боковых стволов. При этом нужно иметь в виду, что шлам не является полноценной заменой керну, а лишь дополняет геологическую информацию в местах, где отбор керна невозможен или нецелесообразен по различным причинам.

## СЕКЦИЯ 7. ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

---

УДК 629.4.015:004.94

### АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**А. В. Ворожун**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет  
транспорта», г. Гомель*

*Проведено исследование торможения пассажирского поезда на прямом и криволинейном в профиле участке пути с разностью уклонов до 6 ‰, выполненное на основе аналитического расчета и компьютерного эксперимента в инженерном пакете MSC.ADAMS. Разработаны модели, учитывающие силы сопротивления движению, тормозные силы, силу от уклона пути и усилия, возникающие в межвагонных соединениях. Выполнена оценка сопоставимости результатов расчетов, проведенных двумя методами.*

**Ключевые слова:** подвижной состав, тормозной путь, переменный профиль пути, математическая модель, компьютерный эксперимент.

### ANALYSIS OF TRAIN DYNAMICS ON THE BASE OF THE MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

**A. U. Varazhun**

*Belarusian State University of Transport, Gomel*

*The paper considers the investigation of passenger train braking at straight and curved in plane track with the slope difference up to 6 ‰ based on the analytical calculation and computer simulation in the engineering software package. There are created the models taking into account resistance forces, braking forces, force from the track inclination and forces arising in the intercar connections. The assessment of comparability of the obtained by two methods results is performed.*

**Keywords:** rolling stock, distance of braking, variable track profile, mathematical model, computer simulation.

На динамические параметры подвижного состава существенное влияние оказывает профиль пути. Как правило, при математическом моделировании поезд принимается за материальную точку, а длина его тормозного пути определяется по интервалам скорости или интервалам времени [1, 2]. Некоторые авторы, например [3], рассматривают поезд как систему твердых тел, соединенных в продольном направлении упругими связями. Однако проведение расчетов таким методом для длинно-составного поезда ограничены производительностью вычислительной техники. Кроме того, составление математической модели для такого поезда может занять длительное время.

Поэтому целью представленной работы является изучение возможности проведения аналогичных расчетов на основе компьютерного моделирования. Задачи, обусловленные целью работы, включают разработку математической и компьютерной модели состава поезда, имеющего одинаковые характеристики, и оценка адекватности созданной компьютерной модели на основе сравнения результатов расчетов, полученных двумя способами.



жению соответственно локомотива и  $j$ -го вагона поезда, Н;  $Q_{л}$ ,  $Q_{вj}$  – силы от уклона пути локомотива и  $j$ -го вагона поезда, Н;  $\alpha_{л}$  – уклон пути локомотива;  $\alpha_{в}, \alpha_j, \alpha_n$  – уклон пути локомотива, первого,  $j$ -го,  $n$ -го вагона поезда.

Приняты следующие начальные условия: при  $t = 0$ :  $x(0) = 0$ ;  $\dot{x}(0) = v_0$ , где  $x(0)$  – величина перемещения поезда на участке пути, м;  $\dot{x}(0) = v_0$  – начальная скорость, соответствующая скорости движения поезда на момент включения торможения, м/с. Масса локомотива принята равной 128 т; масса каждого из 20 вагонов поезда принята равной 61 т; коэффициент инерции вращающихся масс для локомотива принят  $\gamma_{л} = 0,115$ , а для пассажирских вагонов  $\gamma_{в} = 0,042$  [1]; уклон профиля пути составляет 6 ‰. Численное интегрирование систем дифференциальных уравнений (1), (2) проводилось для скорости 120 км/ч на момент начала торможения поезда. Расчеты проведены в среде MathCAD.

В среде инженерного анализа MSC.ADAMS разработана компьютерная модель поезда (рис. 2), соответствующая расчетным схемам (рис. 1). При моделировании приняты следующие допущения: локомотив и вагоны считаются абсолютно твердыми телами, массы которых сосредоточены в их центрах масс; вертикальные колебания и угловые перемещения вагонов отсутствуют. Межвагонные соединения заменены аналоговыми пружинами с соответствующими коэффициентами жесткости и демпфирования, находящимися в начальный момент движения в ненагруженном состоянии.

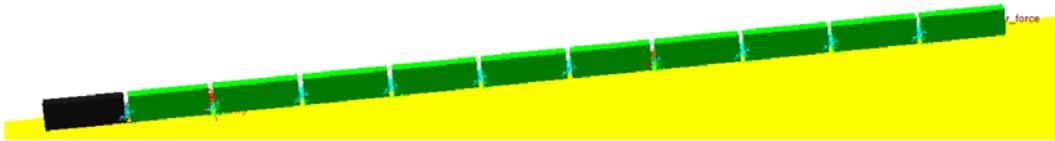


Рис. 2. Компьютерная модель поезда

Проведен сравнительный анализ с результатами, полученными аналитически и на основе компьютерного моделирования (рис. 3).

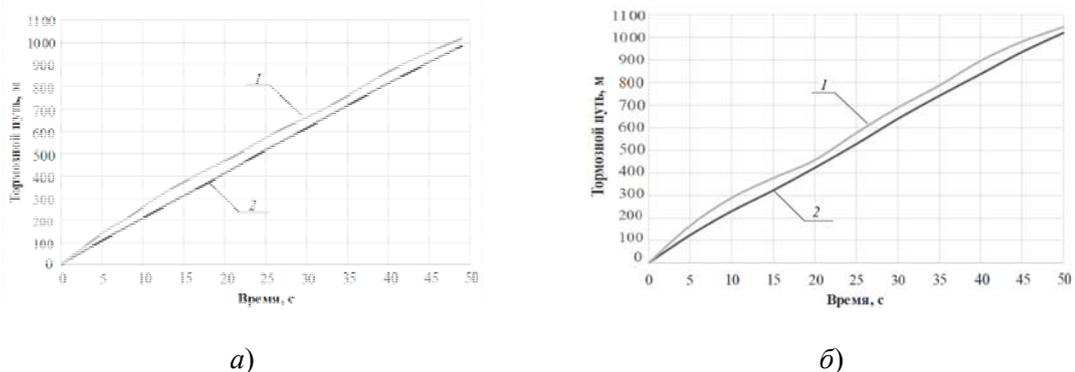


Рис. 3. Зависимости тормозного пути от времени для случая торможения поезда на прямолинейном (а) и криволинейном (б) пути, полученные на основе аналитического 1 и компьютерного 2 расчетов

Результаты расчетов тормозного пути при движении по прямолинейному и криволинейному в профиле участкам пути, полученные на основе аналитического

расчета и компьютерного моделирования, различаются соответственно на 2,3 и 3,5 %, что свидетельствует об адекватности разработанной компьютерной модели.

#### Л и т е р а т у р а

1. Вершинский, С. В. Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с.
2. Галай, Э. И. Тормозные системы железнодорожного транспорта. Расчет пневматических тормозов / Э. И. Галай, Е. Э. Галай, П. К. Рудов. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 271 с.
3. Varazhun, I. Determination of Longitudinal Forces in the Cars Automatic Couplers at Train Electrodynamic Braking / I. Varazhun, A. Shimanovsky, A. Zavarotny // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 415–421.

УДК 621.313

### АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РОТОРАХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д. В. Комнатный

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрен расчет электромагнитных полей в электродвигателях, в конструкциях которых используются композитные материалы. Записаны уравнения Максвелла и материальные уравнения для квазистационарных полей в композитных материалах. Приведены уравнения Максвелла и граничные условия для поля в двухслойной сфере металл–композит. Описан способ получения расчетных соотношений для составляющих электромагнитного поля.*

**Ключевые слова:** электрические двигатели, композитные материалы, уравнения Максвелла, материальные уравнения, граничные условия, двухслойная сфера металл–композит, ротор.

### METHODS OF ELECTROMAGNETIC FIELD ANALYSIS IN ELECTRIC MOTOR ROTORS, MANUFACTURED FROM COMPOSITE MATERIALS

D. V. Komnatny

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The electromagnetic fields calculation in electric motors, in which design composite materials are used, is discussed. Maxwell's equations, constructive relations for quasi-stationary electromagnetic fields in composite materials are recorded. The Maxwell's equations and boundary conditions for the field in two-layer metal-composite sphere are adduced. The method of calculation relations for electromagnetic field components obtaining is described.*

**Keywords:** electric motors, composite materials, Maxwell's equations, constructive relations, boundary conditions, two-layer metal-composite sphere, rotor.

В настоящее время широкое распространение получили индивидуальные средства электротранспорта: скутеры, катера, самокаты, дроны, автомобили. Для облегчения этих машин применяются электродвигатели с конструктивными элементами, изготовленными из композитных материалов. Такие материалы являются новыми для электромашиностроения, поэтому актуальной задачей является анализ электро-

магнитных полей в конструкциях таких двигателей с учетом того, что электрические свойства композитов значительно сложнее, чем проводников и диэлектриков.

Для решения этой задачи принято, что электромагнитное поле в электродвигателях является квазистационарным, иными словами пренебрегается токами смещения. Тогда уравнения Максвелла с учетом пренебрежимо малой проводимости композита имеют вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

Материальные уравнения композита имеют вид:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 k \vec{E}(t - t_1) + \xi \vec{H}(t - t_3), \\ \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H}(t - t_2) + \zeta \vec{E}(t - t_4), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $D$  – индукция электрического поля, Кл/м<sup>2</sup>;  $B$  – индукция магнитного поля, Т;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $k$ ,  $\xi$ ,  $\chi$ ,  $\zeta$  – постоянные, описывающие композитный материал;  $\mu_0$  – магнитная постоянная Гн/м;  $t$  – время, с;  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  – характерные времена, описывающие свойства композита, с.

Тогда после подстановки (2) в (1) и перехода к комплексному представлению получаются уравнения для электромагнитного поля в композите:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= j\omega \mu_k \vec{H}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mu_k = \mu_0 + \chi e^{j\omega t_2}$ ;  $\omega$  – круговая частота, рад/с.

Уравнения Максвелла (3) для электромагнитного квазистационарного поля в композитном материале дают возможность выполнить анализ поля в деталях конструкции двигателя средствами, разработанными к настоящему времени.

В качестве примера рассматривается анализ квазистационарного электромагнитного поля в двухслойной сфере, внешний слой которой металл, а внутренний – композитный материал. Такую конструкцию имеют роторы недавно разработанных двигателей фирмы Buddha Motors. Сфера находится во внешнем вращающемся магнитном поле, которое описывается выражением

$$\vec{B} = \frac{3}{2} B_m \vec{e}_x - j \frac{3}{2} B_m \vec{e}_y, \quad (4)$$

где  $B_m$  – амплитуда индукции магнитного поля, Тл;  $e_x$ ,  $e_y$  – орты декартовой системы координат с центром в центре сферы.

Электромагнитное поле в сфере является суперпозицией полей, созданных составляющими вращающегося магнитного поля. Для определения этих полей необхо-

димо записать уравнения Максвелла для трех областей: воздух вблизи ротора, металлический слой, композитная сфера.

Для воздуха уравнения Максвелла имеют вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -js\omega\mu_{a0}\vec{H}, \end{aligned} \quad (5)$$

– для металла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -js\omega\mu_{a1}\vec{H}, \end{aligned} \quad (6)$$

– для композита:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -js\omega\mu_{a2}\vec{H}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\mu_{a0}$  – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м,  $\mu_{a1}$  – магнитная проницаемость металла, Гн/м;  $\mu_{a2} = \mu_k$  – магнитная проницаемость композита, Гн/м.

В уравнениях (5)–(7) учтено наличие скольжения  $s$ , по причине которого частота поля ротора отличается от частоты вращающегося магнитного поля.

На границах раздела воздух–металл и металл–композит задаются классические граничные условия

$$\begin{aligned} B_{n,i+1} &= B_{n,i} \text{ или } \mu_{i+1}\mu_0 H_{n,i+1} = \mu_i\mu_0 H_{n,i}, \\ H_{\tau,i+1} &= H_{\tau,i}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $n, \tau$  – единичные векторы нормали и касательной.

Для сферы  $H_n = H_r$ ,  $H_\tau = H_\theta$ , где  $H_r, H_\theta$  – составляющие вектора напряженности магнитного поля в сферической системе координат.

Из уравнений (5)–(7) могут быть получены известные уравнения Гельмгольца для напряженности электрического поля в сферической системе координат:

– для воздуха

$$\nabla_\varphi^2 E_\varphi - \frac{E_\varphi}{r^2 \sin^2 \varphi} = 0; \quad (9)$$

– для металла

$$\nabla_\varphi^2 E_\varphi - \frac{E_\varphi}{r^2 \sin^2 \varphi} = \alpha^2 E_\varphi, \text{ где } \alpha = \sqrt{js\omega\mu_{a1}\gamma}; \quad (10)$$

– для композита

$$\nabla_{\varphi}^2 E_{\varphi} - \frac{E_{\varphi}}{r^2 \sin^2 \varphi} = 0, \quad (11)$$

где  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  – сферические координаты;  $E_{\varphi}$  – составляющая напряженности электрического поля в сферической системе координат;  $\gamma$  – удельная проводимость металла, См/м.

В литературных источниках показано, что решение уравнения (9) с учетом ограниченности на бесконечности имеет вид:

$$E_{\varphi} = C_{20} r^{-2} \sin \theta. \quad (12)$$

Решение уравнения (10) с учетом ограниченности в сферическом слое имеет вид:

$$E_{\varphi} = \left[ C_{11} \frac{1}{x} \left( \frac{\sin x}{x} - \cos x \right) + C_{21} \frac{1}{x} \left( \frac{\cos x}{x} + \sin x \right) \right] \sin \theta, \quad (13)$$

где

$$x = -jr \sqrt{j\omega s \mu_{a2}}.$$

Решение уравнения (11) с учетом ограниченности в начале координат имеет вид:

$$E_{\varphi} = C_{12} r \sin \theta. \quad (14)$$

Чтобы найти константы интегрирования  $C_{20}$ ,  $C_{11}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{12}$  в (12)–(14) следует удовлетворить граничным условиям (8). Для этого из уравнений (6)–(8), представленных в сферической системе координат, по соотношениям (12)–(14) находятся выражения для составляющих магнитного поля и подставляются в граничные условия (8). Получается система линейных алгебраических уравнений для постоянных интегрирования, в которую входит составляющая вращающегося магнитного поля.

Таким образом, показано, что анализ квазистационарного электромагнитного поля в композитном материале незначительно отличается от расчета такого же поля в диэлектрике. Отличие состоит, главным образом, в задании параметров композитного материала. Решение уравнений Максвелла сходно с уже полученными решениями в прикладной электродинамике.

Следовательно, анализ электромагнитного поля в электрических двигателях с элементами конструкций из композитных материалов может быть осуществлен на основе уже имеющихся наработок и хорошо апробированными методами. Это открывает широкие возможности для создания современных средств индивидуального транспорта с высокими техническими, экономическими и экологическими характеристиками.

УДК 548.24

**ДИСЛОКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ В СРАВНИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗЕ  
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПОДХОДОВ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРЫ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ****А. А. Рюмцев, О. М. Остриков***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Приведен обзор моделей описания процессов деформирования металлических стекол в условиях негомогенной пластичности для выявления наиболее адекватной и перспективной для дальнейших расчетов; дано обоснование применения такого понятия, как «квазидислокации» для описания процессов деформирования металлических стекол.*

**Ключевые слова:** металлическое стекло, негомогенная пластичность, полосы сдвига.

**DISLOCATION MODEL IN COMPARATIVE ANALYSIS  
OF ALTERNATIVE APPROACHES TO DESCRIPTION  
OF THE STRUCTURE OF METALLIC GLASSES****A. A. Ryumtsev, O. M. Ostrikov***Sukhoi Gomel State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The article provides an overview of models for describing the processes of deformation of metallic glasses under conditions of inhomogeneous plasticity to identify the most adequate and promising for further calculations; a rationale for the use of such a concept as "quasidislocations" to describe the processes of deformation of metallic glasses is given.*

**Keywords:** metallic glass, inhomogeneous plasticity, shear bands.

Ввиду новизны открытия такого материала, как металлическое стекло, его физические свойства остаются предметом активного исследования. Обладая высокими прочностными и антикоррозионными свойствами, этот материал находит все большее распространение в машиностроении и приборостроении. Однако сложность изготовления изделий из металлического стекла, обусловленная технологией быстрого охлаждения расплавленного материала, со скоростью, превышающей скорость кристаллизации, а также недостаточная изученность ограничивает применяемость перспективного материала. Физические процессы, происходящие при механическом деформировании металлических стекол, были описаны несколькими моделями, предложенными такими учеными, как Д. Д. Гилман, С. Г. Зайченко, В. Т. Борисов, Р. К. Моррис, М. Н. Верещагин, В. Г. Шепелевич, О. М. Остриков. В данной статье предлагается исследование моделей на принятие решения о наиболее адекватной и перспективной, обосновывается применение термина «квазидислокация» для описания деформационных процессов.

Пластическая деформация в аморфных материалах может протекать как по гомогенному сценарию, когда деформирование происходит при высокой температуре, близкой к температуре кристаллизации, и негомогенным образом, что для реальных условий эксплуатации более распространено и представляет большой научный и практический интерес.

Процесс деформации материалов с кристаллической решеткой происходит по известным механизмам двойникования и скольжения. В аморфных материалах реализуется иной канал сдвиговой пластической деформации – полосы сдвига – негомогенная пластическая деформация. При этом негомогенная пластичность протекает в

полосах сдвига практически без упрочнения материала [1]. Структура полосы сдвига изображена на рис. 1.



Рис. 1. Структура полосы сдвига [1]

Следует отметить, что условием к негетогенному течению МС являются низкие температуры и высокие значения приложенных напряжений [1] и наблюдается данный вид пластической деформации при растяжении, сжатии, прокатке, волочении и иных способах деформации [1].

Для металлических стекол характерным путем протекания пластической деформации является полоса сдвига. Именно такие полосы при деформировании материала развиваются в трещины [1].

В ходе исследования структуры металлических стекол была предложена теория описания линейных дефектов в виде дисклинаций. Согласно [3] такой подход объясняется тем, что появление дисклинаций обусловлено процессом неупорядоченного заполнения трехмерного пространства структурными единицами, представляющими собой, в частности, геометрически правильные тетраэдры для моделей с монокристаллической структурой МС (металлических стекол), и полиэдров для полиатомных структур МС. В данной модели описания структуры металлических стекол применяется теория клиновидных дислокаций [4]. Такой подход предполагает зарождение напряжений в материале и упругие деформации в эквивалентном значении напряжениям и деформации, которые вызываются клиновидными дислокациями.

В достоинствах этой модели можно отметить возможность определения с ее помощью средней плотности избыточной в сравнении с кристаллическим состоянием, упругой энергии в МС, а также высокий уровень внутренних напряжений, значительные деформирующие напряжения и их независимость от степени деформации. Высокая степень адекватности данной модели выражается и в том, что она верно описывает отсутствие дальнего порядка.

В развитии данной теории появилась дисклинационно-дислокационная модель Морриса. Данная модель описывает структуру материала как содержащую трехмерную сеть дисклинаций смешанного типа, представляющих собой ступенчатые линии, соединенных между собой в своих ступенях дислокационными отрезками. Так получается дислокационная подсистема, развивающаяся при нарастании напряжений. Согласно данной модели, дислокационные конфигурации являются результатом пересечения краевых дислокаций с клиновидными дисклинациями. Здесь основным препятствием развития дислокация выступают дисклинации.

Очередной моделью описания структуры металлических стекол стала доработанная Зайченко и Борисовым модель Морриса. Она учитывала испускание и поглощение дислокаций клиновидными дисклинациями, которые и моделируют структуру металлического стекла.

Еще одним подходом к описанию структуры металлических стекол является дефектно-полиэдрический подход [3]. При таком подходе структура металлического стекла представляется ее «полиэдрическими» дисклинационными ансамблями. Они подразделяются на «упорядоченные», которые характерны как для кристаллического, так и для аморфного состояния металлического сплава, и «неупорядоченные», которые свойственны только сплаву с аморфной структурой. В данной модели принимается, что дисклинации из «неупорядоченного» ансамбля, именуемые «избыточными», и формируют специфические свойства металлических стекол. Согласно [3] были выявлены аналогии предложенной модели с моделью дислокации Гилмана. Приведенные работы основаны на простейших модельных представлениях, что не позволяет в полной степени представить особенности гетерогенной деформации металлических стекол.

В исследовании гетерогенной деформации металлических стекол [3] были проведены численно аналитические количественные анализы приведенных выше конфигураций в рамках теории упругости. Так, в частности, рассматривается случай пересечения краевой дисклинации с клиновой дисклинацией, когда прямолинейная краевая дислокация с вектором Бюргера пересекается с прямолинейной клиновой дисклинацией с вектором Франка.

Проведенные в работе [1] аналогии в процессах зарождения полос сдвига в аморфных материалах, в частности, металлических стеклах, с дислокационными процессами формирования двойникования и скольжения, позволило обосновать возможность применения дислокационного подхода в решении задачи о развитии в аморфных материалах двумерных дефектов. Также в работе [1] выдвинуто предположение, что полоса сдвига является каналом разгрузки упругой энергии у конденсатора, что имеет своим результатом кратковременное уменьшение сопротивления аморфной матрицы проникновению в нее индентора. Этот процесс сопровождается уменьшением микротвердости. Отмечено, что как таковых дислокаций, как линейных дефектов кристаллической решетки, не существует в аморфных материалах, но для математического моделирования теория дислокаций изотропных сред удобна для описания напряженно-деформированного состояния металлических стекол, которые и относятся именно к изотропным средам.

Пример применения квазидислокационного подхода продемонстрирован в работе [5], где автор применил его для расчета напряженно-деформированного состояния металлических стекол у криволинейной полосы сдвига, находящейся у поверхности аморфного материала. Согласно данной работе напряжения, создаваемые криволинейной полосой сдвига, определяются с помощью криволинейного интеграла:

$$\sigma_{ij} = \int_{L_{AB}} \rho \sigma_{ij}^{(0)} ds,$$

где  $L_{AB}$  – задает профиль полосы сдвига;  $\rho$  – плотность дислокаций, формирующих полосу сдвига;  $\sigma_{ij}^{(0)}$  – напряжения, создаваемые единичной дислокацией.

Данная модель представления структуры металлических стекол позволяет объемно описать напряженное и напряженно-деформированное состояние этого аморфного материала. Дальнейшее развитие теории, построенной на квазидислокационном подходе, связано с исследованием напряженно-деформированного состояния металлических стекол при случайной и закономерной неравномерности распределения квазидислокаций в теле материала, призвано описать напряженно-деформированное состояние при деформировании образцов различными типами нагрузки. Также ква-

зидислокационный подход способен описать напряженное и напряженно-деформированное состояние в системе «полоса сдвига – трещина». Таким образом, данная модель в виду своей перспективности, адекватности и универсальности является наиболее подходящей для дальнейших исследований.

#### Литература

1. Верещагин, М. Н. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа: монография / М. Н. Верещагин, В. Г. Шепелевич, О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2004. – 134 с.
2. Гуткин, М. Ю. Дефекты и механизмы пластичности наноструктурных и некристаллических материалах / М. Ю. Гуткин, И. А. Овидько. – Санкт-Петербург: Янус, 2000.
3. Металлические стекла / под ред. Д. Д. Гильмана, Х. Д. Лими – Москва : Metallurgia, 1984. – 264 с.
4. Татарина, Л. И. Структура твердых аморфных и жидких веществ / Л. И. Татарина. – Москва : Наука, 1983. – 149 с.
5. Верещагин М. Н. Дислокационная модель полос сдвига в аморфных материалах / М. Н. Верещагин, О. М. Остриков, С. Н. Цыбранкова // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2004. – № 4. – С. 98–105.

УДК 539.12

### ВКЛАДЫ КВАРКОВ И АНТИКВАРКОВ В СПИН НУКЛОНА ИЗ АСИММЕТРИЙ ГЛУБОКОНЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРИНО НА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НУКЛОНАХ

С. И. Тимошин, Е. С. Тимошин

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Выражения для вкладов кварковых ароматов  $(\Delta u + \Delta \bar{u})$ ,  $(\Delta d + \Delta \bar{d})$ ,  $(\Delta s + \Delta \bar{s})$  и валентных кварков  $(\Delta u_v + \Delta d_v)$  в спин нуклона получены из измеряемых асимметрий инклюзивного и полунклюзивного глубоконеупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на поляризованных протонах и нейтронах.*

**Ключевые слова:** нуклон, нейтрино, спин.

### THE CONTRIBUTIONS OF THE QUARKS AND ANTIQUARKS IN THE SPIN OF NUCLEON FROM THE ASYMMETRIES OF THE DEEP INELASTIC SCATTERING THE NEUTRINO ON THE POLARIZED NUCLEONS

S. I. Timoshin, E. S. Timoshin

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The expressions were obtained for the contributions quark flavours  $(\Delta u + \Delta \bar{u})$ ,  $(\Delta d + \Delta \bar{d})$ ,  $(\Delta s + \Delta \bar{s})$  and the valence quarks  $(\Delta u_v + \Delta d_v)$  in the nucleon spin from the measurable asymmetries inclusive and semi-inclusive deep inelastic scattering the neutrino and antineutrino on the polarized protons and neutrons.*

**Keywords:** nucleon, neutrino, spin.

Для решения проблемы спина нуклона важное значение имеет ароматовое разделение вкладов кварков и антикварков [1].

В настоящее время отдельно  $\Delta q$  и  $\Delta \bar{q}$  получают из полуинклюзивного  $IN$ - ГНР [2]. Однако здесь данные существенно зависят от функций фрагментации, что вносит в них дополнительные неопределенности. Разделение  $\Delta q$  и  $\Delta \bar{q}$  возможно в процессах ГНР нейтрино и антинейтрино на поляризованных мишенях с заряженным током [3, 4].

Однако проведение нейтринных экспериментов с поляризованными мишенями связано с техническими трудностями, главная из которых – огромная масса мишени, необходимая для сбора нужной статистики. Светимость существующих нейтринных пучков потребует мишеней размером несколько метров, которые не могут быть поляризованы.

В то же время имеется перспектива [5, 6] получать высокофокусированные нейтринные пучки от распадов мюонов [7, 8] (нейтринные фабрики), для которых уже можно создать поляризованные мишени. В таком случае проведение нейтринных экспериментов с поляризованными мишенями представляется возможным в будущем.

Рассмотрим инклюзивные

$$v(\bar{v}) + N \rightarrow v(\bar{v}) + X \quad (1)$$

и полуинклюзивные

$$v(\bar{v}) + N \rightarrow v(\bar{v}) + \pi + X \quad (2)$$

процессы ГНР (анти) нейтрино на поляризованных нуклонах.

Дифференциальные сечения инклюзивных процессов (1) получены в следующем виде:

$$\sigma_{v,\bar{v}} = \sigma_{v,\bar{v}}^a + P_N \sigma_{v,\bar{v}}^p, \quad (3)$$

где  $\sigma = \frac{d^2\sigma}{dx dy}$ ,  $P_N$  – степень продольной поляризации нуклона. В (3)  $\sigma_{v,\bar{v}}^a$  и  $\sigma_{v,\bar{v}}^p$  – неполяризованная и поляризационная части сечения, которые для протона равны:

$$\sigma_{v,\bar{v}}^a = \frac{x\sigma_0}{2} \left[ \sum_q (y_1^+ a_q \pm 2y_1^- b_q) q(x) + \sum_q (y_1^+ a_q \mp 2y_1^- b_q) \bar{q}(x) \right], \quad (4)$$

$$\sigma_{v,\bar{v}}^p = \frac{x\sigma_0}{2} \left[ \sum_q (2y_1^+ b_q \pm y_1^- a_q) \Delta q(x) + \sum_q (-2y_1^+ b_q \pm y_1^- a_q) \Delta \bar{q}(x) \right], \quad (5)$$

$$\sigma_0 = \frac{G^2}{\pi} ME, \quad a_q = (g_V^2 + g_A^2)_q, \quad b_q = (g_V g_A)_q; \quad q = u, d, s; \quad g_{Vu} = \frac{1}{2} - \frac{4}{3} \sin^2 \Theta_W, \quad g_{Au} = \frac{1}{2},$$

$$g_{Vd} = g_{Vs} = \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \sin^2 \Theta_W, \quad g_{Ad} = g_{As} = -\frac{1}{2}, \quad \Theta_W - \text{угол Вайнберга.}$$

$y_1^\pm = 1 \pm y_1^2$ ,  $y_1 = 1 - y$ ,  $M$  – масса мишени (нуклона),  $E$  – энергия начального нейтрино (антинейтрино),  $G$  – константа Ферми;  $x, y$  – скейлинговые переменные;

$q(x)(\bar{q}(x))$  и  $\Delta q(x)(\Delta\bar{q}(x))$  – функции распределения неполяризованных и поляризованных кварков (антикварков) соответственно.

Поляризационные асимметрии определим следующим образом:

$$A_{\pm} = \frac{(\sigma_v^{\downarrow\uparrow} \pm \sigma_v^{\uparrow\downarrow}) - (\sigma_v^{\downarrow\downarrow} \pm \sigma_v^{\uparrow\uparrow})}{(\sigma_v^{\downarrow\uparrow} \pm \sigma_v^{\uparrow\downarrow}) + (\sigma_v^{\downarrow\downarrow} \pm \sigma_v^{\uparrow\uparrow})}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) сечения (3), получаем для асимметрий:

$$A_{\pm} = \frac{\sigma_v^p \pm \sigma_v^{\bar{p}}}{\sigma_v^a \pm \sigma_v^{\bar{a}}}. \quad (7)$$

С учетом (4) и (5) эти асимметрии равны:

$$A_{-p} = \frac{a_u [\Delta u(x) + \Delta\bar{u}(x)] + a_d [\Delta d(x) + \Delta\bar{d}(x)] + a_s [\Delta s(x) + \Delta\bar{s}(x)]}{2[b_u u_v(x) + b_d d_v(x)]}, \quad (8)$$

$$A_{+p} = \frac{2[b_u \Delta u_v(x) + b_d \Delta d_v(x)]}{a_u [u(x) + \bar{u}(x)] + a_d [d(x) + \bar{d}(x)] + a_s [s(x) + \bar{s}(x)]}. \quad (9)$$

Поляризационные асимметрии  $A_{\pm}$  (6), (7) получим для полуинклюзивных процессов (2) на основе сечений (4) и (5) с учетом замены:

$$\begin{aligned} \sigma &\rightarrow \sigma^{\pi^+ - \pi^-}, \\ q(x)(\bar{q}(x)) &\rightarrow q(x)D_q^{\pi^+ - \pi^-}(z)(\bar{q}(x)D_{\bar{q}}^{\pi^+ - \pi^-}(z)), \\ \Delta q(x)(\Delta\bar{q}(x)) &\rightarrow \Delta q(x)D_q^{\pi^+ - \pi^-}(z)(\Delta\bar{q}(x)D_{\bar{q}}^{\pi^+ - \pi^-}(z)), \end{aligned}$$

где  $\sigma^{\pi^+ - \pi^-} = \sigma^{\pi^+} - \sigma^{\pi^-}$ ,  $D^{\pi^+ - \pi^-} = D^{\pi^+} - D^{\pi^-}$ ,  $D_{q,\bar{q}}^{\pi}(z)$  – функции фрагментации кварка  $q$  (антикварка  $\bar{q}$ ) в  $\pi$ -мезон.

В результате имеем:

$$A_{+p}^{\pi^+ - \pi^-} = \frac{2[b_u (\Delta u(x) + \Delta\bar{u}(x)) - b_d (\Delta d(x) + \Delta\bar{d}(x))]}{a_u u_v(x) - a_d d_v(x)}, \quad (10)$$

$$A_{-p}^{\pi^+ - \pi^-} = \frac{a_u \Delta u_v(x) - a_d \Delta d_v(x)}{2[b_u (u(x) + \bar{u}(x)) - b_d (d(x) + \bar{d}(x))]}; \quad (11)$$

Отметим, что инклюзивная асимметрия  $A_{-p}$  (8) и полуинклюзивная  $A_{+p}^{\pi^+ - \pi^-}$  (10) содержат партонные распределения  $(\Delta q(x) + \Delta\bar{q}(x))$ , первые моменты которых равны вкладам соответствующих кварков и антикварков в спин нуклона. Поэтому, пе-

реходя в (8), (10) к первым моментам функций распределения кварков (антикварков) и используя

$$a_3 = (\Delta u + \Delta \bar{u}) - (\Delta d + \Delta \bar{d}), \quad (12)$$

получаем для этих вкладов:

$$\Delta u + \Delta \bar{u} = \frac{\frac{1}{2} \int_0^1 A_{+p}^{\pi^+ - \pi^-} [a_u u_V(x) - a_d d_V(x)] dx - a_3 b_d}{b_u - b_d},$$

$$\Delta d + \Delta \bar{d} = \frac{\frac{1}{2} \int_0^1 A_{+p}^{\pi^+ - \pi^-} [a_u u_V(x) - a_d d_V(x)] dx - a_3 b_u}{b_u - b_d},$$

$$\Delta s + \Delta \bar{s} = \frac{\frac{a_u + a_d}{2} \int_0^1 A_{+p}^{\pi^+ - \pi^-} [a_u u_V(x) - a_d d_V(x)] dx - 2(b_u - b_d) \int_0^1 A_{-p} [b_u u_V(x) + b_d d_V(x)] dx - a_3 (a_d b_u + a_u b_d)}{b_d - b_u}.$$

Асимметрии  $A_{+p}$  и  $A_{-p}^{\pi^+ - \pi^-}$  дают доступ к поляризации валентных кварков:

$$\Delta u_V = \frac{\frac{a_d}{2} \int_0^1 A_{+p} \left[ \sum_{q=u,d,s} a_q (q(x) + \bar{q}(x)) \right] dx + 2b_d \int_0^1 A_{-p}^{\pi^+ - \pi^-} \left[ b_u (u(x) + \bar{u}(x)) - b_d (d(x) + \bar{d}(x)) \right] dx}{a_d b_u + a_u b_d};$$

$$\Delta d_V = \frac{\frac{a_u}{2} \int_0^1 A_{+p} \left[ \sum_{q=u,d,s} a_q (q(x) + \bar{q}(x)) \right] dx - 2b_u \int_0^1 A_{-p}^{\pi^+ - \pi^-} \left[ b_u (u(x) + \bar{u}(x)) - b_d (d(x) + \bar{d}(x)) \right] dx}{a_d b_u + a_u b_d}.$$

Рассмотрим процессы (1) и (2) для рассеяния на поляризованных нейтронах. Для асимметрий  $A_{\pm}$  в этом случае получены выражения:

$$A_{-n} = \frac{a_d [\Delta u(x) + \Delta \bar{u}(x)] + a_u [\Delta d(x) + \Delta \bar{d}(x)] + a_s [\Delta s(x) + \Delta \bar{s}(x)]}{2[b_d u_V(x) + b_u d_V(x)]}; \quad (13)$$

$$A_{+n} = \frac{2[b_d \Delta u_V(x) + b_u \Delta d_V(x)]}{a_d [u(x) + \bar{u}(x)] + a_u [d(x) + \bar{d}(x)] + a_s [s(x) + \bar{s}(x)]}; \quad (14)$$

$$A_{+n}^{\pi^+ - \pi^-} = \frac{2[-b_d (\Delta u(x) + \Delta \bar{u}(x)) + b_u (\Delta d(x) + \Delta \bar{d}(x))]}{a_u d_V(x) - a_d u_V(x)}; \quad (15)$$

$$A_{-n}^{\pi^+ - \pi^-} = \frac{a_u \Delta d_V(x) - a_d \Delta u_V(x)}{2[b_u (d(x) + \bar{d}(x)) - b_d (u(x) + \bar{u}(x))]} \quad (16)$$

Из  $A_{-n}$  (13),  $A_{+n}^{\pi^+ - \pi^-}$  (15) и  $a_3$  (12) получаем вклады кварковых ароматов ( $u, d, s$ ) в нуклонный спин

$$\Delta u + \Delta \bar{u} = \frac{\frac{1}{2} \int_0^1 A_{+n}^{\pi^+ - \pi^-} [a_u d_V(x) - a_d u_V(x)] dx + a_3 b_u}{b_u - b_d},$$

$$\Delta d + \Delta \bar{d} = \frac{\frac{1}{2} \int_0^1 A_{+n}^{\pi^+ - \pi^-} [a_u d_V(x) - a_d u_V(x)] dx + a_3 b_d}{b_u - b_d},$$

$$\Delta s + \Delta \bar{s} = \frac{\frac{a_u + a_d}{2} \int_0^1 A_{+n}^{\pi^+ - \pi^-} [a_u d_V(x) - a_d u_V(x)] dx - 2(b_u - b_d) \int_0^1 A_{-n} [b_d u_V(x) + b_u d_V(x)] dx + a_3 (a_u b_d + b_u a_d)}{a_3 (b_d - b_u)}.$$

Из инклюзивной асимметрии  $A_{+n}$  и полуинклюзивной асимметрии  $A_{-n}^{\pi^+ - \pi^-}$  находим вклады валентных кварков в спин нуклона:

$$\begin{aligned} \Delta u_V &= \frac{\frac{a_u}{2} \int_0^1 A_{+n} [a_d (u(x) + \bar{u}(x)) + a_u (d(x) + \bar{d}(x)) + a_s (s(x) + \bar{s}(x))] dx}{a_u b_d + a_d b_u} - \\ &\quad - \frac{2b_u \int_0^1 A_{-n}^{\pi^+ - \pi^-} [b_u (d(x) + \bar{d}(x)) - b_d (u(x) + \bar{u}(x))] dx}{a_u b_d + a_d b_u}, \\ \Delta d_V &= \frac{2b_d \int_0^1 A_{-n}^{\pi^+ - \pi^-} [b_u (d(x) + \bar{d}(x)) - b_d (u(x) + \bar{u}(x))] dx}{a_u b_d + a_d b_u} + \\ &\quad + \frac{\frac{a_d}{2} \int_0^1 A_{+n} [a_d (u(x) + \bar{u}(x)) + a_u (d(x) + \bar{d}(x)) + a_s (s(x) + \bar{s}(x))] dx}{a_u b_d + a_d b_u}. \end{aligned}$$

Таким образом, из измеряемых инклюзивной  $A_{-p}$  ( $A_{-n}$ ) и полуинклюзивной  $A_{+p}^{\pi^+ - \pi^-}$  ( $A_{+n}^{\pi^+ - \pi^-}$ ) асимметрий ГНР нейтрино и антинейтрино на поляризованных протонах (нейтронах) получены выражения для вкладов кварков и антикварков  $(\Delta u + \Delta \bar{u})$ ,  $(\Delta d + \Delta \bar{d})$ ,  $(\Delta s + \Delta \bar{s})$  в спин нуклона. Асимметрии  $A_{+p}$  ( $A_{+n}$ ) и  $A_{-p}^{\pi^+ - \pi^-}$  ( $A_{-n}^{\pi^+ - \pi^-}$ ) дают доступ к вкладам валентных кварков  $\Delta u_V$  и  $\Delta d_V$ .

#### Литература

1. The Electron-Ion Collider: Assessing the Energy Dependence of Key Measurements / E. C. Aschenauer, S. Fazio, J. H. Lee – ArXiv: 1708.01527 [nucl-ex].
2. Ball, R. D. The Proton Spin, Semi-inclusive processes, and a future Electron-Ion Collider / R. D. Ball, A. Deshpande. – ArXiv: 1801.04842 [hep-ph].
3. Forte, S. Polarized parton distribution from charged – current deep-inelastic scattering and future neutrino factories / S. Forte, M. L. Mangano, G. Ridolfi // Nucl. Phys. – 2001. – Vol. B602. – P. 585–621.

4. King, B. J. High rate neutrino detectors for neutrino factories / B. J. King // Nucl. Instrum. Meth. – 2000. – Vol. A451. – P. 198–206.
5. Kaur, J. Spin distribution in the quark-parton model / J. Kaur // Nucl. Phys. – 1977. – Vol. B128. – P. 219–251.
6. Schwienhorst, R. Colliding neutrino beams / R. Schwienhorst // Mod. Phys. Lett. – 2008. – Vol. A23. – P. 2751–2761.
7. Kaplan, D. M. Muon collider / neutrino factory: status and prospects / D. M. Kaplan // Nucl. Instrum. Meth. – 2000. – Vol. A453. – P. 37–48.
8. Mezzetto, M. Beta beams / M. Mezzetto // Nucl. Phys. Proc. Suppl. – 2005. – Vol. 143. – P. 309–316.

УДК 539.12

### КВАРКОВЫЙ ВКЛАД В СПИН НУКЛОНА ИЗ НЕЙТРИННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ДЕЙТРОНАХ

Е. С. Тимошин, С. И. Тимошин

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Вклады валентных кварков  $(\Delta u_V + \Delta d_V)$ , кваркового моря  $(\Delta \bar{u} + \Delta \bar{d})$  и  $(\Delta s + \Delta \bar{s})$  получены из поляризационных асимметрий инклюзивного и полунклюзивного глубоконеупругого рассеяния (анти) нейтрино на поляризованных дейтронах с нейтральным током.*

**Ключевые слова:** нуклон, нейтрино, спин.

### THE QUARK CONTRIBUTION IN THE SPIN NUCLEON FROM NEUTRINO EXPERIMENTS ON THE POLARIZED DEUTERONS

E. S. Timoshin, S. I. Timoshin

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The contributions of the valence quarks  $(\Delta u_V + \Delta d_V)$ , the quark sea  $(\Delta \bar{u} + \Delta \bar{d})$  and  $(\Delta s + \Delta \bar{s})$  were obtained from the polarized asymmetries inclusive and semi-inclusive deep inelastic scattering (anti) neutrino on the polarized deuterons with the neutral current.*

**Keywords:** nucleon, neutrino, spin.

Нейтринное ГНР на поляризованных мишенях имеет важное значение для изучения спиновой структуры нуклона [1, 2]. Поляризационные нейтринные эксперименты еще не проводились, поскольку для набора необходимой статистики требовались поляризованные мишени больших размеров, что технически невозможно.

Высокофокусированные нейтринные пучки можно получать от нейтринных фабрик [3–5] с помощью мюонного коллайдера.

В таком случае нейтринные эксперименты с поляризованными мишенями станут возможными, поскольку мишень массой порядка 20 кг будет обеспечивать хорошую статистику.

Здесь мы рассмотрим инклюзивные

$$v(\bar{\nu}) + \vec{N} \rightarrow v(\bar{\nu}) + X \quad (1)$$

и полуинклюзивные

$$v(\bar{\nu}) + \vec{N} \rightarrow v(\bar{\nu}) + \pi + X \quad (2)$$

процессы ГНР нейтрино и антинейтрино на продольно поляризованных мишенях с нейтральным слабым током. Дифференциальные сечения инклюзивных процессов (1) получены в следующем виде:

$$\sigma_{v,\bar{\nu}} = \sigma_{v,\bar{\nu}}^a + P_N \sigma_{v,\bar{\nu}}^p, \quad (3)$$

где  $\sigma = \frac{d^2\sigma}{dx dy}$ ,  $P_N = \pm 1$  – степень продольной поляризации частицы – мишени,  $\sigma_{v,\bar{\nu}}^a$

и  $\sigma_{v,\bar{\nu}}^p$  – неполяризованная и поляризационная части.

В (3) для протона имеем:

$$\sigma_{v,\bar{\nu}}^a = \frac{x\sigma_0}{2} \left[ \sum_q (y_1^+ a_q \pm 2y_1^- b_q) q(x) + \sum_q (y_1^+ a_q \mp 2y_1^- b_q) \bar{q}(x) \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_{v,\bar{\nu}}^p = \frac{x\sigma_0}{2} \left[ \sum_q (2y_1^+ b_q \pm y_1^- a_q) \Delta q(x) + \sum_q (-2y_1^+ b_q \pm y_1^- a_q) \Delta \bar{q}(x) \right], \quad (5)$$

$$\sigma_0 = \frac{G^2}{\pi} ME, \quad a_q = (g_V^2 + g_A^2)_q, \quad b_q = (g_V g_A)_q; \quad q = u, d, s; \quad g_{Vu} = \frac{1}{2} - \frac{4}{3} \sin^2 \Theta_W, \quad g_{Au} = \frac{1}{2},$$

$$g_{Vd} = g_{Vs} = \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \sin^2 \Theta_W, \quad g_{Ad} = g_{As} = -\frac{1}{2}, \quad \Theta_W - \text{угол Вайнберга.}$$

$y_1^\pm = 1 \pm y_1^2$ ,  $y_1 = 1 - y$ ,  $M$  – масса мишени (нуклона),  $E$  – энергия начального нейтрино (антинейтрино),  $G$  – константа Ферми;  $x, y$  – скейлинговые переменные;  $q(x)$  ( $\bar{q}(x)$ ) и  $\Delta q(x)$  ( $\Delta \bar{q}(x)$ ) – функции распределения неполяризованных и поляризованных кварков (антикварков) соответственно.

Поляризационные асимметрии определим, как следующие комбинации сечений (3):

$$A_{v,\bar{\nu}} = \frac{\sigma_{v,\bar{\nu}}^{\downarrow\uparrow,\uparrow\uparrow} - \sigma_{v,\bar{\nu}}^{\downarrow\downarrow,\uparrow\downarrow}}{\sigma_{v,\bar{\nu}}^{\downarrow\uparrow,\uparrow\uparrow} + \sigma_{v,\bar{\nu}}^{\downarrow\downarrow,\uparrow\downarrow}}; \quad (6)$$

$$A_\pm = \frac{(\sigma_v^{\downarrow\uparrow} \pm \sigma_{\bar{\nu}}^{\uparrow\uparrow}) - (\sigma_v^{\downarrow\downarrow} \pm \sigma_{\bar{\nu}}^{\uparrow\downarrow})}{(\sigma_v^{\downarrow\uparrow} \pm \sigma_{\bar{\nu}}^{\uparrow\uparrow}) + (\sigma_v^{\downarrow\downarrow} \pm \sigma_{\bar{\nu}}^{\uparrow\downarrow})}. \quad (7)$$

Первая стрелка соответствует спиральности нейтрино ( $\downarrow$ ) или антинейтрино ( $\uparrow$ ), а вторая – направлению спина частицы-мишени  $\uparrow$  ( $P_N = +1$ ) и  $\downarrow$  ( $P_N = -1$ ). Подставляя в (6), (7) сечения (3) получаем для асимметрий:

$$A_{v,\bar{v}} = \frac{\sigma_{v,\bar{v}}^p}{\sigma_{v,\bar{v}}^a}; \quad (8)$$

$$A_{\pm} = \frac{\sigma_v^p \pm \sigma_{\bar{v}}^p}{\sigma_v^a \pm \sigma_{\bar{v}}^a}. \quad (9)$$

Рассмотрим процессы (1) и (2) для рассеяния на поляризованных дейтронах ( $d$ ). Сечения рассеяния (3) в этом случае будут определяться через сечения рассеяния на протонах ( $p$ ) и нейтронах ( $n$ ), получаемых из (4) и (5), следующим образом:

$$\sigma_{v,\bar{v}}^{ad} = \frac{\sigma_{v,\bar{v}}^{ap} + \sigma_{v,\bar{v}}^{an}}{2}, \quad \sigma_{v,\bar{v}}^{pd} = \frac{\sigma_{v,\bar{v}}^{pp} + \sigma_{v,\bar{v}}^{pn}}{2}(1-1,5\omega), \quad (10)$$

где  $\omega = 0,05$  – вероятность  $D$ -состояния в волновой функции дейтрона.

Для сечений (10) имеем:

$$\sigma_{v,\bar{v}}^{pd} = \frac{x\sigma_0}{4} \left[ 2y_1^+ (b_u + b_d) (\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x)) \pm \right. \\ \left. \pm y_1^- \left( (a_u + a_d) (\Delta u(x) + \Delta \bar{u}(x) + \Delta d(x) + \Delta \bar{d}(x)) + 2a_s (\Delta s(x) + \Delta \bar{s}(x)) \right) \right] (1-1,5\omega), \quad (11)$$

$$\sigma_{v,\bar{v}}^{ad} = \frac{x\sigma_0}{4} \left[ y_1^+ \left( (a_u + a_d) (u(x) + \bar{u}(x) + d(x) + \bar{d}(x)) + 2a_s (s(x) + \bar{s}(x)) \right) \pm \right. \\ \left. \pm 2y_1^- (b_u + b_d) (u_V(x) + d_V(x)) \right].$$

Подставляя (11) в (8), получаем инклюзивные асимметрии  $A_{vd}$  и  $A_{\bar{v}d}$ :

$$A_{vd} = \frac{Q_1^- [\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x)] + y_1^- \left[ (a_u + a_d) (\Delta \bar{u}(x) + \Delta \bar{d}(x)) + a_s (\Delta s(x) + \Delta \bar{s}(x)) \right]}{y_1^+ S(x) + Q_1^+ V(x)} (1-1,5\omega); \quad (12)$$

$$A_{\bar{v}d} = \frac{Q_2^- [\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x)] - y_1^- \left[ (a_u + a_d) (\Delta \bar{u}(x) + \Delta \bar{d}(x)) + a_s (\Delta s(x) + \Delta \bar{s}(x)) \right]}{y_1^+ S(x) + Q_2^+ V(x)} (1-1,5\omega). \quad (13)$$

Из (9) и (11) получаем асимметрии  $A_{\pm}$  для дейтрона:

$$A_{+d} = \frac{R [\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x)]}{(a_u + a_d) V(x) + 2S(x)} (1-1,5\omega); \quad (14)$$

$$A_{-d} = \frac{(a_u + a_d) [\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x)] + 2 \left[ (a_u + a_d) (\Delta \bar{u}(x) + \Delta \bar{d}(x)) + a_s (\Delta s(x) + \Delta \bar{s}(x)) \right]}{RV(x)} (1-1,5\omega). \quad (15)$$

В формулах (12)–(15):

$$S(x) = (a_u + a_d)(\bar{u}(x) + \bar{d}(x)) + a_s(s(x) + \bar{s}(x)), \quad V(x) = u_V(x) + d_V(x),$$

$$Q_1^\pm = R + y_1^\pm \frac{10}{9} \sin^4 \Theta_W, \quad Q_2^\pm = y_1^2 R \pm y_1^\pm \frac{10}{9} \sin^4 \Theta_W, \quad R = 1 - 2 \sin^2 \Theta_W.$$

Сечения полуинклюзивных процессов (2) ГНР на поляризованных дейтронах с рождением  $\pi$ -мезонов получим соответственно из (3)–(5) и (10) с помощью замен:

$$\begin{aligned} \sigma &\rightarrow \sigma^{\pi^+ - \pi^-}, \\ q(x)(\bar{q}(x)) &\rightarrow q(x)D_q^{\pi^+ - \pi^-}(z) \left( \bar{q}(x)D_{\bar{q}}^{\pi^+ - \pi^-}(z) \right), \\ \Delta q(x)(\Delta \bar{q}(x)) &\rightarrow \Delta q(x)D_q^{\pi^+ - \pi^-}(z) \left( \Delta \bar{q}(x)D_{\bar{q}}^{\pi^+ - \pi^-}(z) \right), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\sigma^{\pi^+ - \pi^-} = \sigma^{\pi^+} - \sigma^{\pi^-}$ ,  $D^{\pi^+ - \pi^-} = D^{\pi^+} - D^{\pi^-}$ ,  $D_{q, \bar{q}}^{\pi}(z)$  – функции фрагментации кварка  $q$  (антикварка  $\bar{q}$ ) в  $\pi$ -мезон.

Для полуинклюзивных асимметрий применяются формулы (8) и (9) с учетом замен (16). В результате для них получены следующие выражения:

$$A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-} = \frac{R_1^- [\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x)] - y_1^+ [\Delta \bar{u}(x) + \Delta \bar{d}(x)]}{R_1^+ V(x) - y_1^- L(x)} (1 - 1, 5\omega); \quad (17)$$

$$A_{\bar{v}d}^{\pi^+ - \pi^-} = \frac{R_2^+ [\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x)] + y_1^+ [\Delta \bar{u}(x) + \Delta \bar{d}(x)]}{R_2^- V(x) - y_1^- L(x)} (1 - 1, 5\omega); \quad (18)$$

$$A_{+d}^{\pi^+ - \pi^-} = \frac{R [\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x)]}{V(x) + 2L(x)} (1 - 1, 5\omega); \quad (19)$$

$$A_{-d}^{\pi^+ - \pi^-} = \frac{\Delta u_V(x) + \Delta d_V(x) + 2 [\Delta \bar{u}(x) + \Delta \bar{d}(x)]}{RV(x)} (1 - 1, 5\omega), \quad (20)$$

где  $R_1^\pm = y_1^\pm \sin^2 \Theta_W - 1$ ,  $R_2^\pm = y_1^2 \pm y_1^\mp \sin^2 \Theta_W$ ,  $L(x) = \bar{u}(x) + \bar{d}(x)$ .

Инклюзивные и полуинклюзивные асимметрии  $v(\bar{v})d$  – ГНР содержат распределения поляризованных кварков и антикварков, первые моменты которых  $\Delta q(\Delta \bar{q}) = \int_0^1 \Delta q(x)(\Delta \bar{q}(x))dx$  есть вклад кварка  $q$  (антикварка  $\bar{q}$ ) в спин нуклона. Поэтому измеряемые инклюзивные и полуинклюзивные асимметрии дают доступ к вкладам кварков и антикварков в нуклонный спин. Совместное применение  $A_{vd}$  (12),  $A_{\bar{v}d}^{\pi^+ - \pi^-}$  (17) и октетного заряда  $a_8$ :

$$a_8 = (\Delta u + \Delta \bar{u}) + (\Delta d + \Delta \bar{d}) - 2(\Delta s + \Delta \bar{s}) \quad (21)$$

позволяет получить выражения для вкладов валентных кварков  $(\Delta u_V + \Delta d_V)$ , антик-

варков  $(\Delta\bar{u} + \Delta\bar{d})$  и странного моря  $(\Delta s + \Delta\bar{s})$ :

$$\begin{aligned} \Delta u_V + \Delta d_V &= \frac{y_1^+ \left[ \int_0^1 \frac{A_{vd}}{1-1,5\omega} (y_1^+ S(x) + Q_1^+ V(x)) dx - \frac{a_8 y_1^-}{2} (a_u + a_d) \right]}{y_1^+ \left( Q_1^- + \frac{y_1^- a_s}{2} \right) + R_1^- y_1^- (a_u + a_d + a_s)} + \\ &+ \frac{y_1^- (a_u + a_d + a_s) \left[ \int_0^1 \frac{A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-}}{1-1,5\omega} (R_1^+ V(x) - y_1^- L(x)) dx + \frac{a_8 y_1^+}{2} \right]}{y_1^+ \left( Q_1^- + \frac{y_1^- a_s}{2} \right) + R_1^- y_1^- (a_u + a_d + a_s)}, \\ \Delta\bar{u} + \Delta\bar{d} &= \frac{R_1^- \left[ \int_0^1 \frac{A_{vd}}{1-1,5\omega} (y_1^+ S(x) + Q_1^+ V(x)) dx - a_8 Q_1^- \right]}{y_1^+ \left( Q_1^- + \frac{y_1^- a_s}{2} \right) + R_1^- y_1^- (a_u + a_d + a_s)} - \\ &- \frac{\left( Q_1^- + \frac{y_1^- a_s}{2} \right) \left[ \int_0^1 \frac{A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-}}{1-1,5\omega} (R_1^+ V(x) - y_1^- L(x)) dx - a_8 R_1^- \right]}{y_1^+ \left( Q_1^- + \frac{y_1^- a_s}{2} \right) + R_1^- y_1^- (a_u + a_d + a_s)}, \\ \Delta s + \Delta\bar{s} &= \frac{\left[ \int_0^1 \frac{A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-}}{1-1,5\omega} (R_1^+ V(x) - y_1^- L(x)) dx - a_8 R_1^- \right] \left[ \frac{y_1^- (a_u + a_d)}{2} - Q_1^- \right]}{y_1^+ \left( Q_1^- + \frac{y_1^- a_s}{2} \right) + R_1^- y_1^- (a_u + a_d + a_s)} + \\ &+ \frac{\left( R_1^- + \frac{y_1^+}{2} \right) \left[ \int_0^1 \frac{A_{vd}}{1-1,5\omega} (y_1^+ S(x) + Q_1^+ V(x)) dx - a_8 Q_1^- \right]}{y_1^+ \left( Q_1^- + \frac{y_1^- a_s}{2} \right) + R_1^- y_1^- (a_u + a_d + a_s)}. \end{aligned}$$

На основе  $A_{vd}$  (13),  $A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-}$  (18) и  $a_8$  (21) тоже можно получить вклады кварков и антикварков в спин нуклона. В результате имеем:

$$\Delta u_V + \Delta d_V = \frac{y_1^+ \left[ \int_0^1 \frac{A_{vd}}{1-1,5\omega} (y_1^+ S(x) + Q_2^+ V(x)) dx - \frac{y_1^- a_8 a_s}{2} \right]}{y_1^- (a_u + a_d + a_s) R_2^+ + y_1^+ \left( Q_2^- - \frac{y_1^- a_s}{2} \right)} +$$

$$\begin{aligned}
& \frac{y_1^- (a_u + a_d + a_s) \int_0^1 \frac{A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-}}{1 - 1,5\omega} (R_2^- V(x) - y_1^- L(x)) dx}{y_1^- (a_u + a_d + a_s) R_2^+ + y_1^+ \left( Q_2^- - \frac{y_1^- a_s}{2} \right)}, \\
\Delta \bar{u} + \Delta \bar{d} &= \frac{\left( Q_2^- - \frac{y_1^- a_s}{2} \right) \int_0^1 \frac{A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-}}{1 - 1,5\omega} (R_2^- V(x) - y_1^- L(x)) dx}{y_1^- (a_u + a_d + a_s) R_2^+ + y_1^+ \left( Q_2^- - \frac{y_1^- a_s}{2} \right)} - \\
& - \frac{R_2^+ \left[ \int_0^1 \frac{A_{vd}}{1 - 1,5\omega} (y_1^+ S(x) + Q_2^+ V(x)) dx - \frac{y_1^- a_8 a_s}{2} \right]}{y_1^- (a_u + a_d + a_s) R_2^+ + y_1^+ \left( Q_2^- - \frac{y_1^- a_s}{2} \right)}, \\
\Delta s + \Delta \bar{s} &= \frac{\left( R_2^+ - \frac{y_1^+}{2} \right) \left[ Q_2^- a_8 - \int_0^1 \frac{A_{vd}}{1 - 1,5\omega} (y_1^+ S(x) + Q_2^+ V(x)) dx \right]}{y_1^- (a_u + a_d + a_s) R_2^+ + y_1^+ \left( Q_2^- - \frac{y_1^- a_s}{2} \right)} - \\
& - \frac{\left( Q_2^- + \frac{y_1^- (a_u + a_d)}{2} \right) \left[ R_2^+ a_8 - \int_0^1 \frac{A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-}}{1 - 1,5\omega} (R_2^- V(x) - y_1^- L(x)) dx \right]}{y_1^- (a_u + a_d + a_s) R_2^+ + y_1^+ \left( Q_2^- - \frac{y_1^- a_s}{2} \right)}.
\end{aligned}$$

Асимметрия  $A_{+d}$  (14) определяет вклад валентных кварков в нуклонный спин:

$$\Delta u_V + \Delta d_V = \frac{1}{R} \int_0^1 A_{+d} [(a_u + a_d) V(x) + 2S(x)] dx.$$

Из совместного анализа  $A_{-d}$  и  $A_{-d}^{\pi^+ - \pi^-}$  можно получить  $(\Delta s + \Delta \bar{s})$ :

$$\Delta s + \Delta \bar{s} = \frac{R}{2a_s (1 - 1,5\omega)} \int_0^1 [A_{-d} - A_{-d}^{\pi^+ - \pi^-} (a_u + a_d)] V(x) dx.$$

Таким образом, из поляризационных асимметрий  $A_{vd}$ ,  $A_{\pm d}$ ,  $A_{\pm d}^{\pi^+ - \pi^-}$  инклюзивного и  $A_{vd}^{\pi^+ - \pi^-}$ ,  $A_{\pm d}^{\pi^+ - \pi^-}$ ,  $A_{\pm d}^{\pi^+ - \pi^-}$  полуинклюзивного ГНР нейтрино и антинейтрино на продольно поляризованных дейтронах получены выражения для поляризации валентных кварков  $(\Delta u_V + \Delta d_V)$ , кварков моря легких кварков  $(\Delta \bar{u} + \Delta \bar{d})$  и странного моря  $\Delta s + \Delta \bar{s}$ .

Асимметрии  $A_{+d}$ ,  $A_{-d}$ ,  $A_{-d}^{\pi^+\pi^-}$  определяют  $(\Delta u_\nu + \Delta d_\nu)$  и  $(\Delta s + \Delta \bar{s})$  без дополнительных измеряемых величин, например,  $a_8$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. Forte, S. Polarized parton distribution from charged – current deep-inelastic scattering and future neutrino factories / S. Forte, M. L. Mangano, G. Ridolfi // Nucl. Phys. – 2001. – Vol. B602. – P. 585–621.
2. King, B. J. High rate neutrino detectors for neutrino factories / B. J. King // Nucl. Instrum. Meth. – 2000. – Vol. A451. – P. 198–206.
3. Bonesini, M. Perspectives for Muon Colliders and Neutrino Factories / M. Bonesini // Frascati Phys. Ser. – 2016. – Vol. 11. – P. 11–16.
4. Kaplan, D. M. Muon colliders and Neutrino Factories / D. M. Kaplan // Eur. Phys. J. Web. Conf. – 2015. – Vol. 95. – P. 03019.
5. Prospects of Heavy Neutrino Searches at Future Lepton Colliders / S. Banerjee, P. S. Bhupal Dev, A. Jbarra [et al.] // Phys. Rev. – 2015. – Vol. D92. – P. 075002.

УДК 539.12

### НОВОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ ГИПЕРГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ${}_3F_2(1)$

**В. И. Лашкевич, А. А. Садовский, О. П. Соловцова**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Получено новое представление для обобщенной гипергеометрической функции  ${}_3F_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2}+z; 1\right)$ , которое позволяет сделать аналитическое продолжение этой функции в левую полуплоскость. Это выражение может использоваться при вычислении интегралов по теореме Коши о вычетах.*

**Ключевые слова:** гипергеометрическая функция, аналитическое продолжение.

### NEW EXPRESSION FOR HYPERGEOMETRIC FUNCTION ${}_3F_2(1)$

**V. I. Lashkevich, A. A. Sadouski, O. P. Solovtsova**

*State Technical University named after P. O. Sukhoi, the Republic of Belarus*

*A new representation is obtained for the generalized hypergeometric function  ${}_3F_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2}+z; 1\right)$ , which allows us to make an analytical continuation of this function into the left half-plane. This expression can be used when calculating integrals using Cauchy's theorem on residues.*

**Keywords:** hypergeometric function, analytic continuation.

**Мотивация.** При решении ряда задач квантовой теории поля с использованием интегрального представления Меллина–Барнса возникает необходимость аналитического продолжения подынтегральной функции из одной полуплоскости в другую с последующим нахождением полюсов и применением теоремы Коши о вычетах. При таком переходе, если, например, в подынтегральном выражении содержится полигамма-функция  $\psi^{(1)}(z)$ , то используется соотношение, упрощающее такой переход: при отри-

цательном аргументе  $\psi^{(1)}(z)$  удобно воспользоваться выражением

$$\psi^{(1)}(z) = -\psi^{(1)}(-z) + \frac{1}{z^2} + \frac{\pi^2}{\sin^2(\pi z)},$$

где  $\psi^{(1)}(-z = n)$  не имеет особенностей при положительных аргументах.

Для аналитического продолжения гипергеометрической функции  ${}_2F_1(a, b, c; 1)$  удобно воспользоваться формулой

$${}_2F_1(a, b; c; 1) = \frac{\Gamma(c)\Gamma(c-a-1)}{\Gamma(c-a)\Gamma(c-b)}, \quad c \neq 0, -1, -2, \dots, \operatorname{Re}(c-a-b) > 0.$$

Приведенные выше соотношения мы успешно применяли при нахождении аналитических выражений для вкладов в аномальный магнитный момент лептонов  $a_L$  от поляризации вакуума лептонными петлями. В задаче, связанной с вычислением вкладов в  $a_L$  от поляризации вакуума от диаграмм смешанного типа (лептонная петля с фотонными вставками), возникает обобщенная гипергеометрической функция  ${}_3F_2$ , а именно:

$${}_3F_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2} + z; 1\right), \quad (1)$$

которая не определена в левой полуплоскости. В связи с этим целью настоящей работы является аналитическое продолжение функции (1) для отрицательных  $\operatorname{Re}z$ .

**Теоретическое рассмотрение.** Исходное выражение, приводящее к (1), имеет вид:

$$F(z) = \int_0^1 (1-y^2)^z \frac{1}{y} \ln\left(\frac{1-y}{1+y}\right) dy. \quad (2)$$

Действительно, разложив логарифм в ряд

$$\ln\left(\frac{1-y}{1+y}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} -\frac{2y^{2k+1}}{2k+1}$$

и просуммировав по  $k$  возникшие интегралы, получаем, что

$$\int_0^1 (1-y^2)^z \frac{1}{y} \ln\left(\frac{1-y}{1+y}\right) dy = -\frac{\sqrt{\pi}\Gamma(1+z) {}_3F_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2} + z; 1\right)}{\Gamma\left(z + \frac{3}{2}\right)}. \quad (2a)$$

Найдем выражение для  $F(z)$  другим способом. Для этого подынтегральное выражение в (2) представим в виде

$$(1-y^2)^z \frac{1}{y} \ln\left(\frac{1-y}{1+y}\right) = (1-y^2)^{z-1} \frac{1}{y} \ln\left(\frac{1-y}{1+y}\right) - y(1-y^2)^{z-1} \ln\left(\frac{1-y}{1+y}\right).$$

Очевидно, что интеграл от первого слагаемого есть  $F(z - 1)$ , а интеграл от второго слагаемого, после вычисления по частям, окажется равным

$$\int_0^1 y(1-y^2)^{z-1} \ln\left(\frac{1-y}{1+y}\right) dy = -\int_0^1 \frac{1}{z}(1-y^2)^{z-1} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2z} \frac{\Gamma(z)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}+z\right)}.$$

Тогда для интеграла (2) возникает функциональное уравнение

$$F(z) = F(z-1) + \frac{\sqrt{\pi}}{2z} \frac{\Gamma(z)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}+z\right)}. \tag{3}$$

Для того чтобы решить уравнение (3), сделаем замену  $z = n$  и получим рекуррентное соотношение для последовательности  $F(n)$ :

$$F(n) = F(n-1) + \frac{\sqrt{\pi}}{2n} \frac{\Gamma(n)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}+n\right)}. \tag{3a}$$

Решая это рекуррентное соотношение, находим:

$$F(n) = F(0) + \sum_{k=1}^n \frac{\sqrt{\pi}}{2k} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}+k\right)}, \tag{4}$$

где

$$F(0) = -\frac{\pi^2}{4},$$

а сумма равна:

$$\sum_{k=1}^n \frac{\sqrt{\pi}}{2k} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}+k\right)} = \frac{\pi^2}{4} - \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(n+1) {}_3F_2\left(1, 1+n, 1+n; \frac{3}{2}+n, 2+n; 1\right)}{2(1+n)\Gamma\left(\frac{3}{2}+n\right)}. \tag{5}$$

В результате получаем выражение

$$F(n) = -\frac{\sqrt{\pi}\Gamma(n+1) {}_3F_2\left(1, 1+n, 1+n; \frac{3}{2}+n, 2+n; 1\right)}{2(1+n)\Gamma\left(\frac{3}{2}+n\right)}, \tag{6}$$

из которого, переходя от  $n$  к переменной  $z$ , следует:

$$F(z) = -\sqrt{\pi}\Gamma(z+1) {}_3F_2\left(1, 1+z, 1+z; \frac{3}{2}+z, 2+z; 1\right) / 2(1+z)\Gamma\left(\frac{3}{2}+z\right). \quad (6a)$$

Это выражение для  $F(z)$ , в отличие от (1), определено в левой полуплоскости. Связь между гипергеометрической функцией (1) и содержащейся в (6a), имеет вид:

$$F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2}+z; 1\right) = \frac{F\left(1, 1+z, 1+z; \frac{3}{2}+z, 2+z; 1\right)}{2(z+1)}. \quad (7)$$

При нахождении полюсов гипергеометрической функции, входящей в (6a), нужно воспользоваться явным представлением  ${}_3F_2$  в виде бесконечного ряда:

$${}_3F_2\left(1, 1+z, 1+z; \frac{3}{2}+z, 2+z; 1\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(z+n)}{\Gamma(z)} \frac{z+1}{n+z+1} \frac{\Gamma\left(z+\frac{3}{2}\right)}{\Gamma\left(n+z+\frac{3}{2}\right)}. \quad (8)$$

Если функция в левой части (7) определена лишь при  $\text{Re}z > -1$ , то функция (8) определена на всей комплексной плоскости за исключением  $z$ , в которых она имеет простые полюсы при целых отрицательных  $z$  и полуцелых отрицательных  $z$ .

Таким образом, получено новое представление для обобщенной гипергеометрической функции  $\left({}_3F_2 \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2}+z; 1\right)$ , которое позволяет сделать аналитическое продолжение этой функции в левую полуплоскость. Это выражение может быть использовано при вычислении интегралов по теореме Коши о вычетах, в частности, при нахождении точных аналитических выражений для вкладов в аномальный магнитный момент лептонов  $a_L$  от поляризации вакуума лептонными петлями.

УДК 539.12

## РОЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКОВ ДЛЯ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ЧАСТИЦ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ

А. А. Бабич

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрен потенциал экспериментов на линейных электрон-позитронных коллайдерах с поляризованными пучками для детального изучения свойств частиц и их взаимодействий в физике микромира. Показано, что поляризация электронных и позитронных пучков в сочетании с другими замечательными особенностями линейных электрон-позитронных коллайдеров (чистота экспериментов, возможность управления энергией столкновений) позволяет значительно повысить чувствительность экспериментов к эффектам динамики частиц. В частности, структура и особенности взаимодействий скалярных и псевдоскалярных частиц может быть обнаружена и исследована только в случае столкновений пучков с двойной поляризацией.*

**Ключевые слова:** электрослабые взаимодействия, Стандартная Модель, линейные коллайдеры, поляризация пучков.

## THE ROLE OF BEAMS POLARIZATION FOR DETAILED STUDYING OF PARTICLES PROPERTIES AND THEIR INTERACTIONS AT LC

A. A. Babich

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Potential of experiments at LC with polarized beams for precisely unraveling the structure of the underlying physics is discussed. It is shown that positron polarization combined with other remarkable features of LC such as the clean experiment environment and tunable collision energy allows to strongly improve the sensitivity of experiments to effects of particles dynamics. In particular, the scalar-scalar or pseudo scalar-pseudo scalar interactions structure can be detectable only if both electron and positron beams are polarized.*

**Keywords:** electro-weak interactions, Standard Model, linear colliders, beam polarization.

Открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере (LHC) в 2012 г., безусловно, является знаменательным триумфом физики. Вместе с тем до сих пор остается ряд неразрешенных вопросов, касающихся как истинной природы открытой скалярной частицы, так и самой Стандартной Модели (СМ). В частности, обладает ли открытая частица точно такими свойствами (масса, константы связи), которые предсказываются СМ, является ли она единственной частицей, ответственной за генерацию масс элементарных частиц, является ли она элементарной или составной? Ответы на эти и другие вопросы микромира физики надеются найти в экспериментах на линейных электрон-позитронных коллайдерах (LC).

Линейный коллайдер обладает уникальными возможностями для проведения прецизионных измерений и поиска сигналов новой физики (физики, выходящей за рамки СМ). Отличительными особенностями LC являются: чистота экспериментов и экспериментальной среды, регулируемая энергия столкновений, возможность поляризации сталкивающихся пучков, расширение набора наблюдаемых, повышение точности измерений. Здесь следует отметить, что в недавнем прошлом именно возможность поляризации электронного пучка на установке SLC (SLAC Linear Collider) позволила компенсировать недостаток энергии столкновений по сравнению с экспериментами на циклотронном коллайдере LEP.

В работе обсуждается значимость проведения экспериментов с поляризованными пучками для изучения динамических характеристик элементарных частиц.

**Формализм.** Основным типом процессов, которые будут изучаться на LC, является процесс аннигиляции электронов и позитронов [1, 2]:

$$e^-(p_{e^-}, \lambda_{e^-})e^+(p_{e^+}, \lambda_{e^+}) \rightarrow X. \quad (1)$$

Здесь  $p_{e^\pm}$  – импульсы сталкивающихся пучков,  $\lambda_{e^\pm}$  – их спиральности, а  $X$  – конечные состояния. Спиральные амплитуды могут быть записаны как

$$F_{\lambda_{e^-}\lambda_{e^+}} = \bar{v}(p_{e^+}, \lambda_{e^+})\Gamma u(p_{e^-}, \lambda_{e^-}), \quad (2)$$

где  $\Gamma = \sum_k \Gamma_k A_k$ ,  $\dots$   $\Gamma_k = (\gamma_u, \gamma_\mu, \gamma_s, I, \gamma_5, \sigma_{\mu\nu}) \equiv (V, A, S, P, T)$ ,  $A_k$  – амплитуды перехода, конкретный вид которой зависит от конечного состояния.

Вероятность перехода определяется как

$$|M|^2 = \sum \lambda_e - \lambda_e + \lambda'_e - \lambda'_e + P\lambda_e - \lambda'_e - P_{\lambda_e - \lambda_{e^+}} \bar{F}\lambda'_e - \lambda'_{e^+}. \quad (3)$$

Полный вид сечения для процессов парного рождения фермионов в общем случае (произвольная поляризация сталкивающихся пучков) приведен в обзоре [1]. Сечение с продольно-поляризованными пучками имеет вид:

$$\sigma_{pe-pc^+} = \frac{1}{4} \left\{ (1+P_{e^-})(1+P_{e^+})\sigma_{RR} + (1+P_{e^-})(1-P_{e^+})\sigma_{LL} + (1+P_{e^-})(1-P_{e^+})\sigma_{RL} + (1-P_{e^-})(1+P_{e^+})\sigma_{LR} \right\}, \quad (4)$$

где  $P_{e^\pm}$  – степени поляризации электронного и позитронного пучков. При анализе поляризационных наблюдаемых удобно ввести эффективную поляризацию  $P_{eff}$  и эффективную светимость  $L_{eff}$ :

$$P_{eff} = \frac{p_c - p_{c^+}}{1 - p_c + p_{c^+}}; \quad (5)$$

$$L_{eff} = \frac{1}{2}(1 - P_e - P_{e^+})L. \quad (6)$$

Тогда, используя лево-правую асимметрию:

$$A_{LR} = \frac{\sigma_{LK} - \sigma_{KL}}{\sigma_{LK} + \sigma_{KL}}, \quad (7)$$

полное сечение СМ процессов можно записать как

$$\sigma_{pe-pc^+} = 2\sigma_0 \left( \frac{L_{eff}}{L} \right) \left[ 1 - P_{eff} A_{LR} \right]. \quad (8)$$

Следует отметить, что в чисто аннигиляционных (s-канальных) диаграммах спиральности сталкивающихся пучков скоррелированы между собой. В то же время особенностью диаграмм обменного типа (t- и u-канальных) является тот факт, что спиральности сталкивающихся пучков определяют конфигурацию спиральностей конечных частиц.

Возможность проведения экспериментов с поперечно-поляризованными пучками, включая и поляризационные конфигурации смешенного типа (один пучок поляризован продольно, а второй – поперечно) позволяет исследовать взаимодействия любой структуры.

В таблице указана зависимость сечений аннигиляционных процессов парного рождения фермионов от типа поляризации сталкивающихся пучков для скалярного (S), псевдоскалярного (PS), векторного (V), аксиально-векторного (A) и тензорного (T) типов взаимодействий в пределе  $m_e \rightarrow 0$ .

Структура взаимодействий		Продольная поляризация		Поперечная поляризация		Продольно-поперечная поляризация
$\Gamma_k$	$\Gamma_l$	Двойная	Одиночная	Двойная	Одиночная	Смешанная
$S$	$S$	$\sim P_e - P_e^+$	–	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	–	–
$S$	$PS$	–	$\sim P_e^\pm$	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	–	–
$S$	$V, A$	–	–	–	$\sim P_{e^\pm}^T$	$\sim P_e \pm P_{e^\pm}^T$
$S$	$T$	$\sim P_e - P_e^+$	$P_e^\pm$	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	–	–
$PS$	$PS$	$\sim P_e - P_e^+$	–	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	–	–
$PS$	$V, A$	$\sim P_{e^\pm} - P_{e^\pm}^+$	$P_e^\pm$	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	$\sim P_{e^\pm}^T$	$\sim P_e \pm P_{e^\pm}^T$
$PS$	$V, A$	$\sim P_{e^\pm} - P_{e^\pm}^+$	$P_e^\pm$	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	$\sim P_{e^\pm}^T$	$\sim P_e \pm P_{e^\pm}^T$
$PS$	$T$	$\sim P_{e^\pm} - P_{e^\pm}^+$	$P_e^\pm$	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	–	–
$V, A$	$V, A$	$\sim P_{e^\pm} - P_{e^\pm}^+$	$P_e^\pm$	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	–	–
$V, A$	$V, A$	$\sim P_{e^\pm} - P_{e^\pm}^+$	$P_e^\pm$	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	–	–
$V, A$	$T$	–	–	–	$\sim P_{e^\pm}^T$	$\sim P_e \pm P_{e^\pm}^T$
$T$	$T$	$\sim P_{e^\pm} - P_{e^\pm}^+$	$P_e^\pm$	$\sim P_e^T - P_{e^+}^T$	–	–

Из анализа таблицы можно сделать следующие выводы:

- 1) полный потенциал линейного коллайдера может быть реализован только с использованием поляризованных пучков;
- 2)  $S-S$  или  $PS-PS$  структура взаимодействия может быть обнаружена только в экспериментах с двойной поляризацией пучков;
- 3) в случае  $V, A$  – взаимодействий в пределе  $m_e \rightarrow 0$  эффекты поперечной поляризации пучков будут проявляться только при одновременной поляризации сталкивающихся пучков;
- 4) двойная поляризация пучков повышает статистику и снижает доминирование систематических погрешностей в косвенных поисках физических эффектов;
- 5) опции с поперечно-поляризованными пучками предоставляют возможность измерения новых наблюдаемых, чувствительных к возможным эффектам новой физики (источники СР нарушения, эффекты массивных гравитонов, модели с дополнительными измерениями и т. п.).

#### Литература

1. Moortgat-Pick, G. The role of polarized positrons and electrons in revealing fundamental interactions at the linear collider / G. Moortgat-Pick, T. Abe, A. A. Babich // Phys. Rept. – 2008. – Vol. 460 – P. 131–243.
2. Renard, F. M. Basic of electron positron collisions / F. M. Renard // Dreux, France: Editions Frontieres. – 1981. – 238 p.
3. Haber, H. E. / In «Spin structure in high energy processes», Stanford, 1993. – P. 231–272.
4. Hikasa, K. I. Transverse-polarization effects in  $e^+e^-$  collisions: the role of chiral symmetry / K. I. Hikasa // Phys. Rev. – 1986. – Vol. D33. – P. 3203–3223.

УДК 621.9.015

**ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
КАЧЕСТВА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ**

**М. И. Лискович, Р. М. Лискович, Д. А. Шатон**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Описано моделирование магнитно-абразивной обработки внутренней сферической поверхности. Рассмотрено влияние геометрических параметров магнитопровода на магнитную индукцию в рабочем зазоре, что существенно влияет на производительность и стабильность обработки. Моделирование проводилось в ANSYS.*

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, моделирование магнитных полей, геометрические параметры индуктора, сферическая поверхность, финишная обработка.

**OPTIMIZATION OF MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING:  
MODELING OF MAGNETIC FIELDS TO IMPROVE THE QUALITY  
OF FINISHING PARTS**

**M. I. Liskovich, R. M. Liskovich**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*This paper describes the modeling of magnetic-abrasive machining of an internal spherical surface. The influence of the geometric parameters of the magnetic circuit on the magnetic induction in the working gap is considered, which significantly affects the performance and stability of the machining process. The modeling was conducted in ANSYS.*

**Keywords:** Magnetic-abrasive machining, magnetic field modeling, geometric parameters of the inductor, spherical surface, finishing.

Качество финишной обработки деталей гидравлического оборудования критично для их функциональности и надежности. Традиционные методы доводки или шлифования показывают низкую эффективность в паре трения плунжер–подпятник аксиально-поршневых гидромашин. Наиболее приемлемым методом является магнитно-абразивная обработка (МАО), где используются абразивные смеси под воздействием магнитного поля. Величина магнитной индукции влияет на жесткость абразивной щетки и интенсивность съема металла.

Магнитно-абразивная обработка представляет собой процесс, в котором абразивные частицы, находящиеся в магнитном поле, образуют жесткую щетку, способную эффективно обрабатывать поверхности различных форм. Этот метод позволяет достигать высокой точности и качества обработки, что особенно важно для деталей с высокими требованиями к шероховатости и геометрической точности [1].

Целью данного исследования является разработка математических моделей индукторов с использованием ANSYS и анализ влияния геометрических параметров индуктора на магнитную индукцию в схеме МАО для достижения шероховатости  $Ra = 0,63$ . Это исследование позволит оптимизировать процесс обработки и улучшить его производительность.

Основой для моделирования служит схема индуктора, предложенная Ю. М. Бароном [2] для полирования внутренних беговых дорожек шарикоподшипников. Индуктор состоит из магнитопровода и обмотки, создающей магнитное поле.

Подпятник АЗ-100 (рис. 1) изготовлен из немагнитного материала (бронза Бр АЖ 9–4), что позволяет избежать влияния его магнетизма на процесс обработки.

В качестве абразива используется порошок Ж-15КТ с зернистостью 25–50 мкм, состоящий из 85 % Fe и 15 % TiC. Такой состав обеспечивает необходимую жесткость и эффективность обработки. Исследование показало, что использование различных типов абразивов также может влиять на результаты обработки.

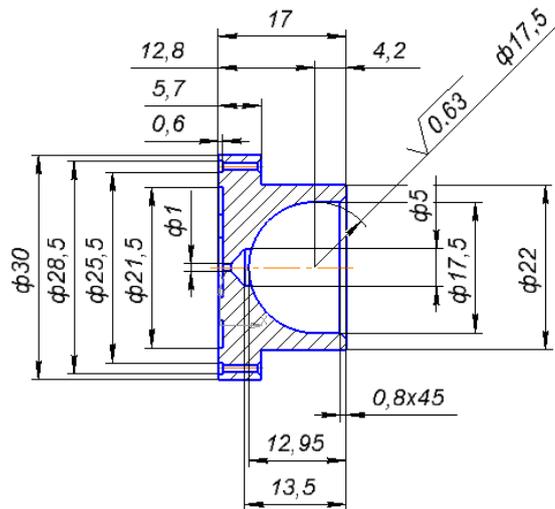


Рис. 1. Чертеж подпятника АЗ-100

Схема МАО сферической поверхности подпятника показана на рис. 2.

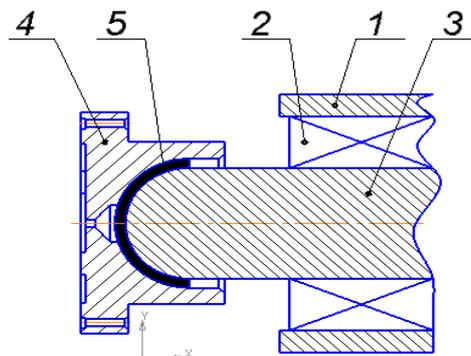


Рис. 2. Схема обработки внутренней сферической поверхности подпятника:  
 1 – корпус электромагнита; 2 – обмотка электромагнита;  
 3 – обрабатывающий полюс электромагнита; 4 – обрабатываемый подпятник;  
 5 – магнитно-абразивный порошок

Моделирование проводилось в среде ANSYS, которая позволяет проводить численные расчеты магнитных полей с высокой точностью. В рамках моделирования были изучены различные конфигурации магнитопровода и их влияние на распределение магнитной индукции в рабочем зазоре.

Геометрические параметры индуктора, такие как форма и размеры магнитопровода играют ключевую роль в создании эффективного магнитного поля. Изменение этих параметров может привести к значительным изменениям в величине маг-

нитной индукции и, следовательно, в качестве обработки [3].

Моделирование показало, что параметры магнитопровода существенно влияют на магнитную индукцию. При изменении геометрии индукторов наблюдаются следующие результаты:

1. Изменение формы магнитопровода: при переходе от цилиндрической формы к более сложным геометрическим формам (например, с закруглениями или выемками) наблюдается увеличение концентрации магнитного потока в определенных зонах, что приводит к повышению жесткости абразивной щетки.

2. Размеры магнитопровода: увеличение размеров магнитопровода ведет к увеличению общей силы магнитного поля, однако при этом необходимо учитывать возможные затраты на материалы и размеры оборудования.

3. Положение обмотки: расположение обмотки также влияет на распределение магнитного поля. Оптимизация положения может привести к более равномерному распределению индукции по всей рабочей поверхности.

4. Интенсивность съема металла: увеличение магнитной индукции прямо пропорционально увеличивает интенсивность съема металла, что подтверждает важность оптимизации геометрических параметров для повышения производительности.

Эти результаты подтверждают гипотезу о том, что правильный выбор геометрии индуктора может значительно улучшить качество обработки.

Полученные данные подчеркивают важность детального анализа магнитных полей при проектировании оборудования для MAO. Оптимизация геометрических параметров индуктора не только улучшает качество обработки, но и позволяет снизить затраты на производство и эксплуатацию оборудования.

Кроме того, необходимо учитывать влияние других факторов, таких как скорость вращения детали и состав абразивной смеси. Эти параметры могут существенно изменить результаты обработки и требуют дальнейшего изучения.

Моделирование магнитных полей в процессе MAO позволяет оптимизировать параметры оборудования и улучшить качество финишной обработки деталей. Будущие исследования должны быть направлены на интеграцию полученных результатов в практическое применение и разработку новых методов повышения эффективности MAO.

В дальнейшем предполагается исследовать влияние различных типов абразивов на эффективность процесса обработки и провести эксперименты по тестированию моделей в реальных условиях. Также стоит обратить внимание на автоматизацию процессов MAO и внедрение современных технологий контроля качества для достижения максимальной эффективности.

#### Л и т е р а т у р а

1. Петров, А. И. Современные методы финишной обработки / А. И. Петров. – СПб.: СПбГТУ, 2018.
2. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная обработка / Ю. М. Барон. – Москва : МГТУ, 2015.
3. Кузнецов, В. Н. Инновационные технологии в машиностроении / В. Н. Кузнецов. – Минск : БГТУ, 2019.

УДК 621.01

### КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАТУННЫХ ТОЧЕК МЕХАНИЗМА АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ГРУППОЙ АССУРА IV КЛАССА

Д. Г. Кроль, Н. В. Иноземцева, М. О. Прядко

*Учреждение образования Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Представлены результаты кинематического исследования плоского рычажного механизма IV класса аналитическим методом. Представлены формулы, позволяющие определить линейные скорости и ускорения точек механизма.*

**Ключевые слова:** плоский рычажный механизм, группа Ассур IV класса, скорость точки, ускорение точки.

### KINEMATIC CHARACTERISTICS OF CONNECTING ROD POINTS OF THE MECHANISM BY ANALYTICAL METHOD WITH ASSUR GROUP IV CLASS

D. G. Krol, N. V. Inozemtseva, M. O. Pryadko

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The paper presents the results of a kinematic study of a flat lever mechanism of class IV by an analytical method. Formulas are presented that allow determining the linear velocities and accelerations of the mechanism points.*

**Keywords:** flat lever mechanism, Assur group IV class, point velocity, point acceleration.

Одной из задач современного машиностроения является создание новых, перспективных машин и механизмов, в состав которых входят структурные группы Ассур высших классов (III, IV и далее). Связано это прежде всего со сложностью получения необходимых точных траекторий движения рабочих органов машины для обеспечения выполнения технологического процесса. Кинематика таких механизмов описывается системами нелинейных уравнений, имеющих не менее шести вариантов решений (по числу возможных сборок механизма). Поэтому разработка методов кинематического анализа механизмов высоких классов является весьма актуальной задачей. Цель работы – получить аналитические выражения, позволяющие определять положение, скорость и ускорение шатунных точек плоского рычажного механизма высокого класса, содержащего группу Ассур IV класса.

В данной работе будем изучать простейший механизм, содержащий одну группу Ассур IV класса с вращательными кинематическими парами. Такая структурная группа состоит из четырех звеньев 3, 4, 5 и 6 (рис. 1). Входными параметрами для кинематического анализа механизма являются длины звеньев  $l_{OA}$ ,  $l_{AB}$ ,  $l_{AC}$ ,  $l_{BC}$ ,  $l_{BD}$ ,  $l_{CE}$ ,  $l_{DE}$ ,  $l_{FD}$ ,  $l_{FE}$ ,  $x_F$ ,  $y_E$  (рис. 1) и кинематические параметры входного звена 2.

Для определения кинематических параметров звеньев 3, 4, 5 и 6 выделим два векторных контура  $OABDFO$  и  $OACEFO$  (рис. 1). Векторные уравнения этих контуров имеют вид:

$$\vec{r}_A + \vec{r}_{AB} + \vec{r}_{BD} = \vec{r}_F + \vec{r}_{FD}, \vec{r}_A + \vec{r}_{AC} + \vec{r}_{CE} = \vec{r}_F + \vec{r}_{FE}. \quad (1)$$

Проецируем векторные уравнения (1) на координатные оси  $x$  и  $y$ . В результате получим систему четырех нелинейных уравнений с неизвестными углами  $\psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_6$ :

$$\begin{aligned} x_A + l_{AB}\cos\psi_3 + l_{BD}\cos\psi_4 &= x_F + l_{FD}\cos\psi_6, & y_A + l_{AB}\sin\psi_3 + l_{BD}\sin\psi_4 &= y_F + l_{FD}\sin\psi_6, \\ x_A + l_{AC}\cos\psi_3 + l_{CE}\cos(\psi_5) &= x_F + l_{FE}\cos\psi_6, & y_A + l_{AC}\sin\psi_3 + l_{CE}\sin(\psi_5) &= y_F + l_{FE}\sin\psi_6. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $x_A = l_{OA}\cos\varphi_2$ ,  $y_A = l_{OA}\sin\varphi_2$ ,  $\psi_3 = 2\pi - \angle BAC + \psi_3$ ,  $\psi_6 = \angle DFE + \psi_6$ ,  $\angle BAC = \arccos\left\{\frac{(l_{AB}^2 + l_{AC}^2 - l_{BC}^2)}{(2l_{AB}l_{AC})}\right\}$ .

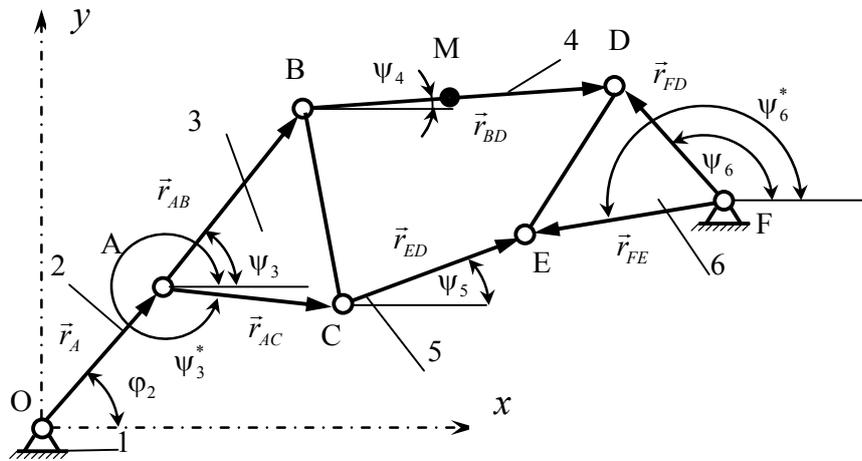


Рис. 1. Схема механизма и расположение двух контуров

Решение системы нелинейных уравнений (2) было найдено численными методами с помощью математического пакета MathCad. Так как данная группа Ассура имеет шесть возможных сборок [4], то выбор единственного верного решения определялся корректным заданием начального значения углов  $\psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_6$ . Начальное приближение положений звеньев механизма было получено с помощью метода геометрических мест [4].

Для определения аналогов угловых скоростей и аналогов угловых ускорений звеньев воспользуемся системой уравнений (2). Продифференцируем данную систему по  $\varphi_2$  (здесь данные уравнения не приводятся) и получим систему четырех линейных алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными аналогами скоростей:

$$\frac{d\psi_3}{d\varphi_2}, \frac{d\psi_4}{d\varphi_2}, \frac{d\psi_5}{d\varphi_2}, \frac{d\psi_6}{d\varphi_2}.$$

Решаем полученную систему с помощью математического пакета MathCad и определяем аналоги скоростей. Продифференцировав еще раз систему уравнений по  $\varphi_2$ , получим систему четырех линейных алгебраических уравнений с четырьмя аналогами ускорений:

$$\frac{d^2\psi_3}{d\varphi_2^2}, \frac{d^2\psi_4}{d\varphi_2^2}, \frac{d^2\psi_5}{d\varphi_2^2}, \frac{d^2\psi_6}{d\varphi_2^2},$$

которые определяем с помощью математического пакета Mathcad.

**Определение кинематических параметров шатунных точек.** Шатунными точками являются точки, принадлежащие звеньям, которые совершают сложное

плоско-параллельное движение: звено 3, 4 и 5 в нашем механизме. Здесь, для примера, приведем результаты расчета для точки  $M$  принадлежащей четвертому звену (рис. 1). Координаты точки  $M$  определяем по формулам:

$$x_M = x_A + l_{AB} \cos \psi_3 + l_{BM} \cos \psi_4, \quad y_M = y_A + l_{AB} \sin \psi_3 + l_{BM} \sin \psi_4. \quad (3)$$

Продифференцируем по  $\varphi_2$  систему уравнений (3), получим формулы, определяющие неизвестные проекции аналога скорости точки  $M$  на координатные оси:

$$\begin{aligned} \frac{dx_M}{d_2} &= \frac{dx_A}{d_2} - l_{AB} \sin \psi_3 \frac{d\psi_3}{d_2} - l_{BM} \sin \psi_4 \frac{d\psi_4}{d_2}, \\ \frac{dy_M}{d_2} &= \frac{dy_A}{d_2} + l_{AB} \cos \psi_3 \frac{d\psi_3}{d_2} + l_{BM} \cos \psi_4 \frac{d\psi_4}{d_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Продифференцируем по  $\varphi_2$  систему уравнений (4) получим формулы, определяющие неизвестные проекции аналога ускорения точки  $M$  на координатные оси:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_M}{d_2^2} &= \frac{d^2 x_A}{d_2^2} - l_{AB} \cos \psi_3 \left( \frac{d\psi_3}{d\varphi_2} \right)^2 - l_{AB} \sin \psi_3 \frac{d^2 \psi_3}{d_2^2} - l_{BM} \cos \psi_4 \left( \frac{d\psi_4}{d_2} \right)^2 - l_{BM} \sin \psi_4 \frac{d^2 \psi_4}{d_2^2} \\ \frac{d^2 y_M}{d_2^2} &= \frac{d^2 y_A}{d_2^2} - l_{AB} \sin \psi_3 \left( \frac{d\psi_3}{d\varphi_2} \right)^2 + l_{AB} \cos \psi_3 \frac{d^2 \psi_3}{d_2^2} - l_{BM} \sin \psi_4 \left( \frac{d\psi_4}{d_2} \right)^2 + l_{BM} \cos \psi_4 \frac{d^2 \psi_4}{d_2^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Приведем здесь (рис. 2) некоторые результаты кинематического расчета механизма при следующих входных параметрах:  $\varphi_2 = 50^\circ$ ,  $l_{OA} = 0,12$  м,  $l_{AB} = 0,6$  м,  $l_{AC} = 0,6$  м,  $l_{BC} = 0,6$  м,  $l_{CE} = 0,8$  м,  $l_{BD} = 1,2$  м,  $l_{FD} = 0,7$  м,  $l_{FE} = 0,7$  м,  $l_{DE} = 1,0$  м,  $x_F = 1,9$  м,  $y_F = 0,28$  м.

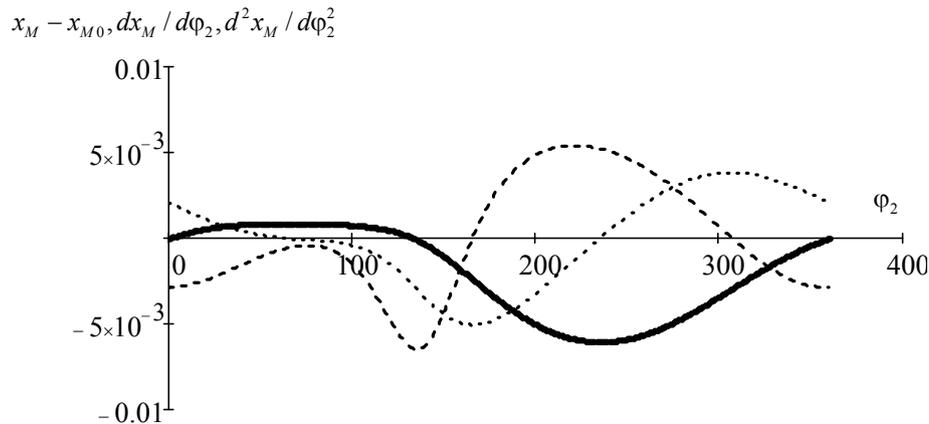


Рис. 2. Кинематические параметры точки  $M$  в проекции на ось  $x$ : координата  $x_M - x_{M0}$  (сплошная линия), аналог скорости  $dx_M/d\varphi_2$  (пунктирная линия), аналог ускорения  $\frac{d^2 x_M}{d\varphi_2^2}$  (штриховая линия)

Таким образом, в статье представлен алгоритм и математическая модель кинематического анализа плоского рычажного механизма с группой Ассура IV класса. Получены числовые значения линейных скоростей и линейных ускорений точек шатуна. Данные результаты могут применяться при проведении силового и динамического расчета механизма.

#### Литература

1. Теория механизмов и машин : учеб. пособие для вузов / М. З. Коловский, А. Н. Евграфов, Ю. А. Семенов, А. В. Слоущ. – 2-е изд., испр. – Москва : Академия, 2008. – 558 с.
2. Hroncová, Darina Kinematical Analysis of Crank Slider Mechanism with Graphical Method and by Computer Simulation / Hroncová Darina, Frankovský Peter, Bettes Gabriel // American Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 4, N 7. – P. 329–343.
3. Yamamoto, Tatsuya. Automated Kinematic Analysis of Closed-Loop Planar Link Mechanisms / Tatsuya Yamamoto, Nobuyuki Iwatsuki and Ikuma Ikeda // Machines. – 2020. – № 8, 41. –P. 1–16.
4. Джолдасбеков, У. А. Графо-аналитические методы анализа и синтеза механизмов высоких классов / У. А. Джолдасбеков. – Алма-Ата, 1983. – 256 с.

УДК 548.232.4

### УСТОЙЧИВЫЕ РЕЖИМЫ ВОЗМУЩЕНИЯ ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО РАСПЛАВА

И. А. Концевой, А. А. Бугримов

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Изучено влияние переохлаждения расплава на кинетические параметры фронта высокоскоростной кристаллизации чистого металла. Расчеты выполнены для меди.*

**Ключевые слова:** высокоскоростная кристаллизация, неустойчивость линии роста, кривизна фазовой границы, дендритный рост.

### STABLE MODES OF PHASE BOUNDARY PERTURBATION HIGH-SPEED CRYSTALLIZATION OF SUPERCOOLED MELT

I. A. Kontsevov, A. A. Bugrimov

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The effect of melt supercooling on the kinetic parameters of the high-speed crystallization front of pure metal is studied. Calculations are performed for copper.*

**Keywords:** high-speed crystallization, growth line instability, phase boundary curvature, dendritic growth.

Рассмотрим высокоскоростной дендритный рост кристалла из глубоко переохлажденного расплава чистого вещества. В настоящее время экспериментально достигнуты скорости роста 20–70 м/с в расплавах, переохлажденных до 300 К [1]. Прикладное значение этих исследований связано с технологиями получения материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Вопрос о морфологической устойчивости линии роста дендрита рассматривался в [2, 3]. Цель данной работы – выполнить анализ кинетических свойств фазовой границы кристаллизации (ФГК) в чистом расплаве меди (переохлаждение  $\Delta T, K \in [180, 230]$ ).

**Теплоотвод от твердой фазы.** Уравнение роста дендрита при глубоких переохлаждениях расплава получено в [4, 5] с учетом локально-неравновесных свойств теплопереноса. Анализ этого уравнения показывает, что объемный сток энергии  $q_v < 0$ , который моделирует отвод тепла от кристалла, определяется следующей зависимостью:

$$|q_v| = \frac{L_1}{\gamma} + N_m \left( K_0 L_1 + \frac{c}{\gamma \mu} \right) + K_0 N_m^2 \frac{c}{\mu}, \quad (1)$$

$$L_1 = L_* + K_0 U_2, \quad L_* = L - c_* \Delta T, \quad U_1 = U / L, \quad U_2 = c T_c U_1.$$

Обозначения здесь такие же, как в [4, 5]. При проведении расчетов применяются полуэмпирические зависимости [6] для скорости роста  $N_m = N_m(\Delta T)$  и кинетического коэффициента  $\mu = \mu(\Delta T)$ . Выполнен анализ возмущения ФГК вида  $f(y, t) / H = \exp(-rt) \cos(ky)$ , где  $H$  – малая постоянная первого порядка малости;  $t$  – время;  $y$  – координата, поперечная направлению роста;  $r$  – параметр затухания;  $k$  – частота. Обнаружено, что режим аperiodической устойчивости наблюдается в интервале  $r^{(1)} < r < r^{(2)}$ , где левая и правая границы (подробная запись не приводится) зависят от физических параметров процесса [см. формулу (1)] и от величины переохлаждения  $\Delta T$ . В соответствии с этим интервалом устойчивости получена верхняя граница значений кривизны  $K_f$  вершины дендрита, при которых линия роста морфологически устойчива: не возникает складка, являющаяся предвестником боковой ветви.

**Границы морфологически устойчивого роста.** Расчеты выполнены для меди при  $K_0 = 10^7 \text{ м}^{-1}$ . Значения теплофизических параметров расплава и кристалла приведены в [6]. Зависимости  $|q_v|$  и  $K_f$  от переохлаждения  $\Delta T$  даны на рис. 1 в размерных величинах.

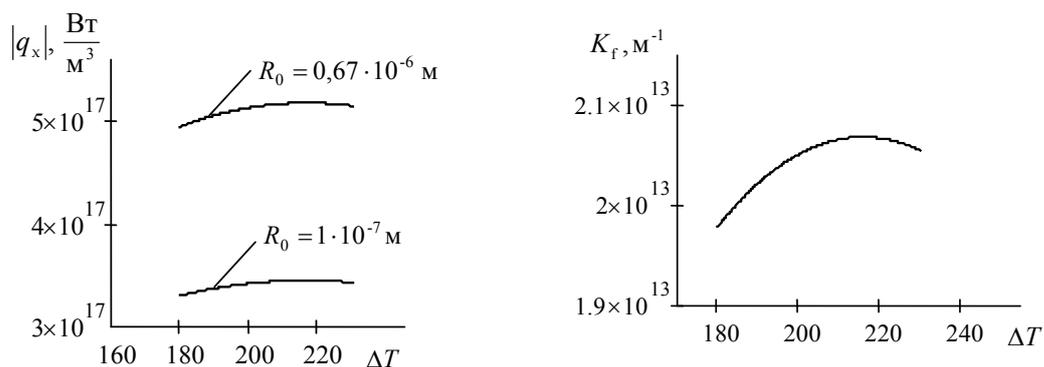


Рис. 1. Свойства теплоотвода  $|q_v|$  и верхней границы  $K_f$  значений кривизны вершины дендрита и от величины переохлаждения

Полученные в результате расчетов числовые значения  $K_f(\Delta T)$  говорят о том, что аperiodический режим (2) устойчив: верхняя граница  $K_f$  в данных условиях не

достигается. В безразмерном виде на рис. 2 показаны границы  $r^{(1)}$ ,  $r^{(2)}$  интервала устойчивости; на рис. 3 – полупериод колебаний по координате  $y$ . Масштабы величин:  $y_b = 10^{-6}$  м,  $t_b = 10^{-7}$  с.

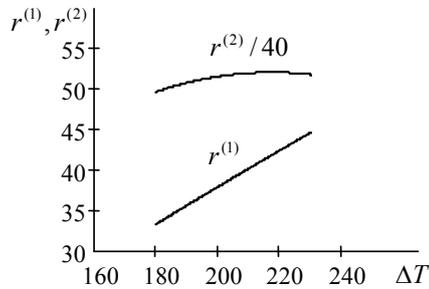


Рис. 2. Влияние переохлаждения расплава на границы интервала аperiodической устойчивости фазовой границы кристаллизации

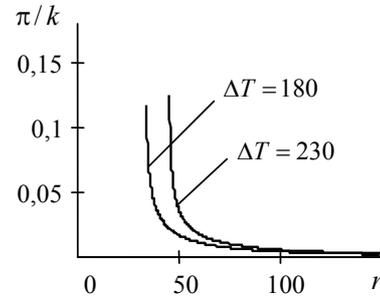


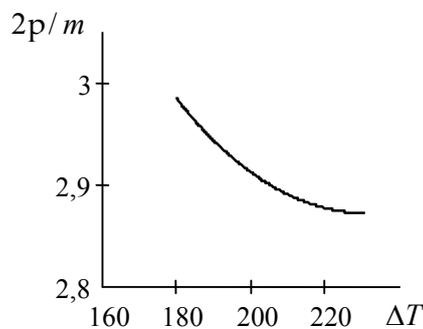
Рис. 3. Корреляция «параметр затухания по времени – параметр пространственной неоднородности возмущения»

**Волновой режим возмущения.** Незатухающая стоячая волна возмущения имеет вид:

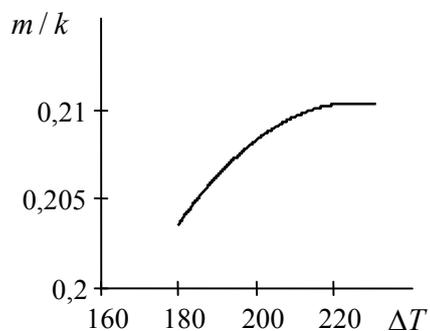
$$f(y, t)/H = \cos ky \sin mt, \quad t \geq 0, \quad y \in [0, y_1]; \quad (2)$$

$$k^2 = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad m^2 = \frac{\beta_1 \beta_3}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad w_2 = m/k = (v_3/v_2)^{1/2},$$

где  $m/k$  – скорость стоячей волны, перемещающейся со скоростью звука  $w_2$ ;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  – безразмерные коэффициенты, зависящие от переохлаждения расплава посредством функций  $N_m = N_m(\Delta T)$ ,  $\mu = \mu(\Delta T)$ . Результаты расчета этого режима возмущения приведены на рис.4.



а)



б)

Рис. 4. Незатухающая стоячая волна возмущения: а – период колебаний во времени; б – скорость волны

Стоячая волна, затухающая с течением времени, определяется решением:

$$f(y, t)/H = \exp(-rt) \cos ky \sin mt. \quad (3)$$

Некоторые результаты расчетов этого режима приведены на рис. 5. При  $r = 0$  данное решение принимает вид (2).

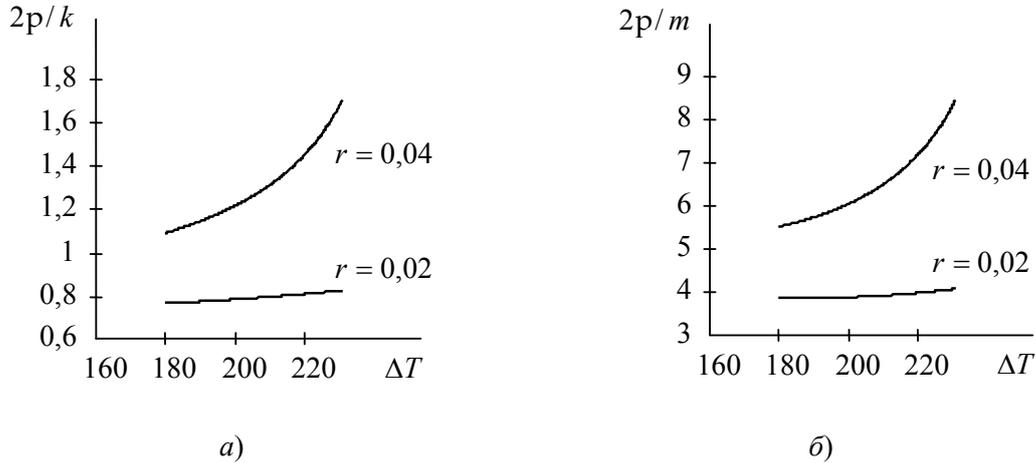


Рис. 5. Затухающая стоячая волна возмущения:  
 а – период колебаний по координате  $y$ ; б – период колебаний во времени

Таким образом, кинетические свойства фазовой границы высокоскоростной кристаллизации чистого расплава в значительной степени обусловлены локальной неравновесностью теплопереноса в твердой фазе. Выполнен анализ свойств возмущенной фазовой границы кристаллизации меди. Получены свойства теплоотвода  $q_v(\Delta T)$  от твердой фазы и значения верхней границы кривизны  $K_f$ , обеспечивающей устойчивость аperiодического возмущения. Стоячая волна возмущения рассмотрена в незатухающем и затухающем режимах. Показано, что параметр затухания оказывает значительное влияние на пространственно-временные свойства возмущенного состояния вершины дендрита.

*Работа выполнена под научным руководством профессора О. Н. Шабловского.*

Литература

1. Herlach, D. M. Metastable Solids from Undercooled Melts / D. M. Herlach, P. Galenko, D. Holland-Moritz. – Oxford : Pergamon, 2007. – 448 p.
2. Шабловский, О. Н. Тепловая градиентная катастрофа и рост двумерного свободного дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2007. – № 3. – С. 29–37.
3. Шабловский, О. Н. Производство энтропии на фазовой границе кристаллизации / О. Н. Шабловский // Поверхность, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – № 12. – С. 81–87.
4. Шабловский, О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть 1. Уравнение фазовой границы кристаллизации / О. Н. Шабловский // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, № 6. – С. 680–685.
5. Шабловский, О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть II. Аналитическая структура возмущений линии роста / О. Н. Шабловский // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 12–17.

6. Шабловский, О. Н. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 189–202.

УДК 004.942+616.74

### ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ АРТЕРИИ ПРИ РАСКРЫТИИ СТЕНТА

А. И. Столяров, Е. В. Зайцев

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Выполнен расчет напряжений и деформаций в артерии и бляшке при раскрытии стента.*

**Ключевые слова:** артерия, атеросклеротическая бляшка, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, стент.

### ASSESSMENT OF THE STRESSED STATE OF THE ARTERY DURING STENT OPENING

A. I. Stolyarov, E. V. Zaitsev

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*In this work, the stresses and deformations in the artery and plaque were calculated when the stent was opened.*

**Keywords:** stent, artery, stress-strain state, finite element method.

Одним из наиболее распространенных сосудистых заболеваний является атеросклероз, который может привести к сужению и блокировке артерий. Для восстановления нормального кровотока применяются эндоваскулярные методы лечения, среди которых особое место занимает стентирование. Основной целью этой процедуры является устранение стенозов – сужений сосудов, которые ограничивают кровоток к сердечной мышце. Этот метод предполагает введение в артерию специального устройства – стента, которое позволяет удерживать стенки сосуда открытыми и восстанавливать проходимость.

Открытие стента вызывает изменения в напряженном состоянии стенки артерии, что, в свою очередь, может влиять на его функциональность и долговечность. Напряженное состояние стенки артерии в процессе раскрытия стента подвергается влиянию целого ряда факторов, таких как материал, из которого изготовлен стент, его геометрия, а также механические свойства артериальной стенки. Эти взаимодействия имеют значение для предотвращения таких осложнений, как рестеноз (вторичное сужение артерии) и тромбообразование.

Цель данной работы – провести оценку напряженного состояния артерии при раскрытии стента. Для достижения этой цели использован метод конечных элементов, позволяющий детализировать и визуализировать распределение напряжений и деформаций в артерии во время процесса раскрытия стента. Основное внимание в данной работе уделено анализу влияния на напряженное состояние конструкции стента и механических свойств атеросклеротической бляшки, а также выявлению критических точек, где возможно возникновение неблагоприятных последствий.

Предполагали, что артерия и бляшка изотропны и гиперупруги. Модель артерии была структурно разделена на три слоя: интима, медиа и адвенция. Для описания механического поведения артерии и бляшки приняли модели Ogden и Mooney-Rivlin соответственно. Параметры модели Mooney-Rivlin для стенозированной бляшки [1]:  $C_{10} = -0,49596$ ;  $C_{01} = 0,50661$ ;  $C_{20} = 1,1935$ ;  $C_{11} = 3,6378$ ;  $C_{02} = 4,7373$ ; кальцинированной бляшки [2]: модуль упругости  $E = 2,19$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,49$ ; значения параметров модели Ogden для слоев артерии приняли в соответствии с работой [3].

На рис. 1 показана физическая модель системы «артерия – бляшка – стент».

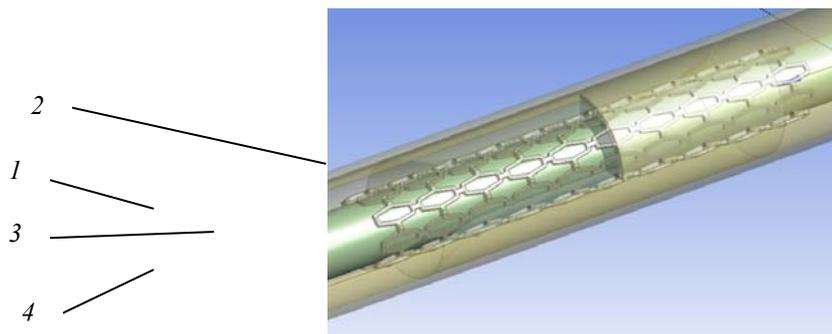


Рис. 1. Физическая модель системы «артерия–бляшка–стент»:  
1 – артерия; 2 – бляшка; 3 – стент; 4 – баллон

Материал стента – нержавеющая сталь 12Х18Н10. Физико-механические свойства стали: модуль упругости  $E = 1,98 \cdot 10^5$  МПа; плотность  $\rho = 7920$  кг/м<sup>3</sup>; предел прочности  $\sigma_b = 550\text{--}650$  МПа, условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 225\text{--}315$  МПа [4]. Приняли, что начальные напряжения в стенте отсутствуют, нагрузка равномерно распределена по внутренней поверхности баллона.

Рабочее давление задавали на внутреннюю стенку дилатационного баллона, который, для упрощения модели, представлен в виде жесткой цилиндрической оболочки.

В результате расчета были получены значения напряжений и деформаций. На рис. 2 показаны эквивалентные напряжения в артерии и бляшке: 2, а, в – кальцинированная бляшка; 2, б, г – стенозирующая бляшка.

Из рис. 2 видно, что после раскрытия стента возникают значительные локальные напряжения, которые могут привести к повреждению бляшки и эндотелия. При этом уровень напряжений в стенозирующей бляшке  $\sigma_{\text{экв}} = 4,2\text{--}5,4$  МПа значительно больше, чем в кальцинированной  $\sigma_{\text{экв}} = 1,2\text{--}1,5$  МПа. Очевидно, что сама бляшка будет повреждена. Наибольшее значение эквивалентных напряжений в стенте по варианту 1 составляет  $\approx 500$  МПа, а для стента по варианту 2 – 330–400 МПа, что не превышает предел прочности для материала стента.

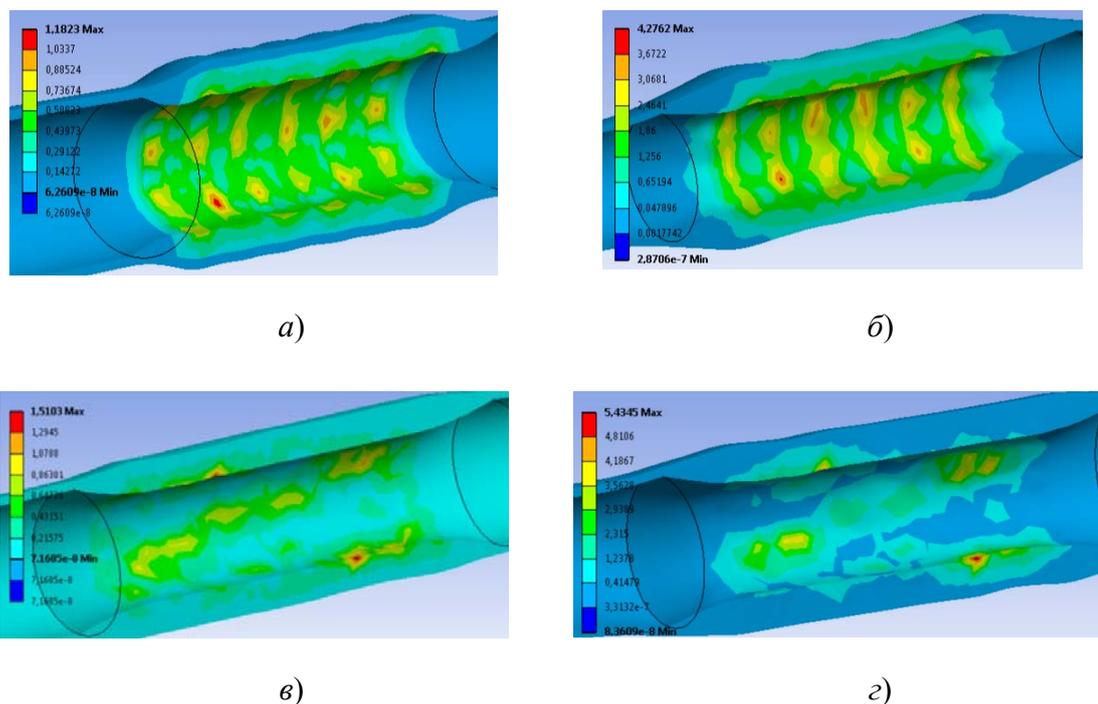


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений в стенке артерии и бляшке по Мизесу, МПа:  
*a, б* – стент по варианту 1; *в, з* – стент по варианту 2

Нужно отметить, что выбранные для анализа напряженного состояния стенки артерии конструкции стентов не являются оптимальными при данных размерах бляшки и ее стенозированном состоянии.

Оценка напряженно-деформированного состояния артерии при раскрытии стента является важным аспектом в кардиологии и ангиологии. Она требует комплексного подхода, объединяющего клинические наблюдения, современные методы визуализации и вычислительные модели.

#### Литература

1. Zahedmanesh, H. Determination of the influence of stent strut thickness using the finite element method: implications for vascular injury and in-stent restenosis, *Medical and Biological Engineering and Computing* / H. Zahedmanesh, C. Lally. – 2009. – Vol. 47. – P. 385–393.
2. Lally, C. Cardiovascular stent design and vessel stresses: a finite element analysis / C. Lally, F. Dolan, P. J. Pendergrast // *Journal of Biomechanics*. – 2005. – N 38. – P. 1574–1581.
3. Wei L, Leo H. L., Chen Q. and Li Z. Structural and Hemodynamic Analyses of Different Stent Structures in Curved and Stenotic Coronary Artery. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 7:366. – DOI 10.3389/fbioe.2019.00366.
4. Марочник сталей и сплавов / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский [и др.] ; под общ. ред. Ю. Г. Драгунова и А. С. Зубченко. – 4-е изд., переработ. и доп. – М. : Машиностроение, 2014. – 1216 с. : ил.

УДК 539.12

## АЛГЕБРА МАТРИЦ ДИРАКА В СЛУЧАЕ РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ $d \neq 4$

В. Ю. Гавриш, А. Д. Тамков

Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

*Кратко изложена методика расчета произведений матриц Дирака в случае размерности пространства-времени  $d \neq 4$ , используемая в прикладных квантово-полевых расчетах. Показано, что антикоммутационное соотношение может быть использовано для расчета свертки любого числа матриц Дирака.*

**Ключевые слова:** размерность пространства-времени, матрица Дирака, квантовая электродинамика.

## DIRAC'S MATRIX ALGEBRA IN $d \neq 4$ SPACE-TIME DIMENSION

A. D. Tamkov, V. Yu. Haurysh

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

*The work briefly describes the methodology for Dirac matrices product calculation in the case of space-time dimension  $d \neq 4$ , used in quantum field theory applications. It is shown that the anticommutation relation can be used for any number of Dirac matrices product calculation.*

**Keywords:** space-time dimension, Dirac matrix, QED.

Известно [1, 2], что квантовая электродинамика (далее – КЭД) успешно описывает взаимодействие фотонов с электронами. Однако прямые расчеты КЭД в высших порядках теории возмущений невозможны в силу наличия расходимостей. Указанная особенность привела к разработке специальных методов расчета, в том числе для вычисления произведений матриц Дирака.

Работа носит методический характер: изложены элементарные соотношения для расчета произведений матриц Дирака в случае размерности пространства-времени  $d \neq 4$ , используемые в прикладных задачах КЭД [3, 4]. Авторами показано, что базового антикоммутационного соотношения достаточно для указанных выкладок.

**Случай размерности пространства-времени  $d \neq 4$ .** Ниже определим основные соотношения алгебры матриц Дирака [3]. Известно, что в случае размерности пространства-времени  $d = 4$  комбинации  $\gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \dots \gamma_\mu$ , где  $\hat{A}_i = (A_\alpha \gamma^\alpha)_i$  – свертка 4-вектора  $A_\alpha$  с матрицами Дирака, используются для расчета процессов КЭД в различных порядках теории возмущений. Для обобщения случая  $d \neq 4$  будем использовать базовое антикоммутационное соотношение

$$\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}, \quad (1)$$

которое должно выполняться для любой размерности пространства-времени. Из соотношения (1) определим значение  $\gamma_\mu \gamma^\mu$ :

$$\gamma^\mu \gamma_\mu = \gamma^\mu g_{\mu\nu} \gamma^\nu = g_{\mu\nu} (2g^{\mu\nu} - \gamma^\nu \gamma^\mu) = 2g_{\mu\nu} g^{\mu\nu} - \gamma_\mu \gamma^\mu, \quad (2)$$

откуда  $\gamma^\mu \gamma_\mu = g_{\mu\nu} g^{\mu\nu}$ , или с учетом структуры метрического тензора [2, 3] оконча-

тельно получаем  $\gamma^\mu \gamma_\mu = d$ . Последнее соотношение будет использовано ниже для расчета конструкций  $\gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \dots \gamma_\mu$  в случае  $\gamma^\mu \gamma_\mu = d \neq 4$ .

**Вычисление сверток матриц Дирака.** В разделе вычислим конструкции вида  $\gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \dots \gamma_\mu$  с использованием соотношений (1), (2). Для конструкции вида  $\gamma_\mu \hat{A} \gamma^\mu$  получаем:

$$\gamma^\mu \hat{A} \gamma_\mu = A_\nu \gamma^\mu \gamma^\nu \gamma_\mu = A_\nu (2g^{\mu\nu} - \gamma^\nu \gamma^\mu) \gamma_\mu = 2A_\nu g^{\mu\nu} \gamma_\mu - A_\nu \underbrace{\gamma^\nu \gamma_\mu}_d = 2\hat{A} - \hat{A}d = \hat{A}(2-d). \quad (3)$$

Отметим, что если ответ выражения (3) записать в виде  $\hat{A}(2-d) = -2\hat{A} + (4-d)\hat{A}$ , то при  $d=4$  получаем известное соотношение  $\gamma^\mu \hat{A} \gamma_\mu = -2\hat{A}$  [2].

По аналогии определим  $\gamma_\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \gamma^\mu$ :

$$\begin{aligned} \gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \gamma_\mu &= \gamma^\mu \hat{A}_1 (2(A_2)_\mu - \gamma_\mu \hat{A}_2) = 2\hat{A}_2 \hat{A}_1 - \gamma^\mu \hat{A}_1 \gamma_\mu \hat{A}_2 = \\ &= 2\hat{A}_2 \hat{A}_1 - 2\hat{A}_1 \hat{A}_2 + d \hat{A}_1 \hat{A}_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношение (4) может быть записано в виде:

$$\gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \gamma_\mu = 2\hat{A}_2 \hat{A}_1 - 2\hat{A}_1 \hat{A}_2 + d \hat{A}_1 \hat{A}_2 = 4(A_1 \cdot A_2) + (d-4)\hat{A}_1 \hat{A}_2, \quad (5)$$

что соответствует  $\gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \gamma_\mu = 4(A_1 \cdot A_2)$  для случая размерности пространства-времени  $d=4$ .

Наконец вычислим комбинацию  $\gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 \gamma_\mu$ , которая достаточно часто используется при расчетах однопетлевых поправок КЭД. По аналогии с (3), (4) заметим, что

$$\begin{aligned} \gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 \gamma_\mu &= (A_1)_\nu (A_2)_\rho (A_3)_\sigma \gamma^\mu \gamma^\nu \gamma^\rho \gamma^\sigma \gamma_\mu = (A_1)_\nu (A_2)_\rho (A_3)_\sigma \left( (2g^{\mu\nu} - \gamma^\nu \gamma^\mu) \gamma^\rho \gamma^\sigma \gamma_\mu \right) = \\ &= (A_1)_\nu (A_2)_\rho (A_3)_\sigma \left( 2\gamma^\rho \gamma^\sigma \gamma^\nu - \gamma^\nu \underbrace{\gamma^\mu \gamma^\rho \gamma^\sigma \gamma_\mu}_{T^{\rho\sigma}} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где тензор  $T^{\rho\sigma}$  вычисляется аналогично выражению (5). С учетом последнего для тензора  $T^{\rho\sigma}$  получаем:

$$T^{\rho\sigma} = 4g^{\rho\sigma} + (d-4)\gamma^\rho \gamma^\sigma, \quad (7)$$

откуда выражение (6) упростится до

$$\begin{aligned} \gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 \gamma_\mu &= (A_1)_\nu (A_2)_\rho (A_3)_\sigma \left( 2\gamma^\rho \gamma^\sigma \gamma^\nu - \gamma^\nu (4g^{\rho\sigma} + (d-4)\gamma^\rho \gamma^\sigma) \right) = \\ &= (A_1)_\nu (A_2)_\rho (A_3)_\sigma \left( 2\gamma^\rho \gamma^\sigma \gamma^\nu - 4g^{\rho\sigma} \gamma^\nu - (d-4)\gamma^\nu \gamma^\rho \gamma^\sigma \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Для придания компактной формы выражения (8) запишем слагаемое  $2\gamma^\rho\gamma^\sigma\gamma^\nu$  в следующем виде:

$$2\gamma^\rho\gamma^\sigma\gamma^\nu = 2(2g^{\rho\sigma} - \gamma^\sigma\gamma^\rho)\gamma^\nu = 4g^{\rho\sigma}\gamma^\nu - 2\gamma^\sigma\gamma^\rho\gamma^\nu; \quad (9)$$

с учетом (7)–(9) для (6) окончательно получаем:

$$\begin{aligned} \gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 \gamma_\mu &= (A_1)_\nu (A_2)_\rho (A_3)_\sigma (4g^{\rho\sigma}\gamma^\nu - 2\gamma^\sigma\gamma^\rho\gamma^\nu - 4g^{\rho\sigma}\gamma^\nu - (d-4)\gamma^\nu\gamma^\rho\gamma^\sigma) = \\ &= -2\hat{A}_3\hat{A}_2\hat{A}_1 - (d-4)\hat{A}_1\hat{A}_2\hat{A}_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Отметим, что в случае размерности пространства-времени  $d = 4$  выражение (10) упростится до  $\gamma^\mu \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_3 \gamma_\mu = -2\hat{A}_3\hat{A}_2\hat{A}_1$ , что совпадает с известным выражением [4, 5]. Полученные в разделе выражения могут быть использованы для расчета произведений  $\gamma$  – матриц Дирака, в том числе с матрицей  $\gamma_5$ .

В работе представлены элементарные соотношения из алгебры матриц Дирака для случая размерности пространства-времени  $d \neq 4$ . Полученные в работе соотношения могут быть использованы как при расчете поляризации вакуума, так и для других расчетов поправок в вершинную функцию.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. Т. 4. Квантовая электродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд. испр. – Москва : Наука, 1989. – 728 с.
2. Пенскин, М. Введение в квантовую теорию поля / М. Пенскин, Д. Шредер. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 784 с.
3. Romao, J. C. Modern techniques for one-loop calculation / J. C. Romao. – Departamento de Fisica, Instituto Superior Tecnico, Portugal, 2004. – 81 p.
4. Grozin, A. Lectures on QED and QCD: practical calculation and renormalization of one- and multi-Loop feynman diagrams / A. Grozin // World Scientific Publishing Company, 2007. – 236 p.
5. Ахиезер, А. И. Квантовая электродинамика / А. И. Ахиезер, В. Б. Берестецкий. – 4-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1981. – 432 с.

УДК 539.12

## РАСЧЕТ ОДНОПЕТЛЕВОГО ИНТЕГРАЛА ЭЛЕКТРОННОЙ ЛИНИИ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

В. Ю. Гавриш, А. Д. Тамков

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Кратко продемонстрирована методика расчета петлевых интегралов квантовой электродинамики на примере однопетлевой диаграммы электронной линии. Показано, что процедура параметризации Фейнмана с последующей размерной регуляризацией может быть использована для подобных вычислений.*

**Ключевые слова:** квантовая электродинамика, петлевой интеграл, параметризация Фейнмана, размерная регуляризация.

## ONE-LOOP INTEGRAL CALCULATION ELECTRON LINE QUANTUM ELECTRODYNAMICS

V. Yu. Haurysh, A. D. Tamkov

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The paper briefly demonstrates a method for quantum electrodynamics loop integrals calculating for one-loop diagram of an electron line example. It is shown that the Feynman parameterization procedure with subsequent dimensional regularization can be used for such calculations.*

**Keywords:** quantum electrodynamics, loop integral, Feynman parameterization, dimensional regularization.

**Введение.** На сегодняшний день квантовая электродинамика (далее – КЭД) является успешной теорией, описывающей взаимодействие фотонов с электронами. Классические процессы КЭД, такие как комптоновское рассеяние, аннигиляция электрон-позитронной пары и другие стали базовыми при изучении КЭД [1, 2]. Однако расчеты КЭД в высших порядках теории возмущений осложнены математически. Известно, что прямые расчеты петлевых интегралов приводят к расходящимся результатам. Указанная особенность привела к альтернативным методам, среди которых выделим подход, основанный на размерной регуляризации интегралов Фейнмана.

Работа носит методический характер: кратко продемонстрирована процедура размерной регуляризации на примере расчета однопетлевой диаграммы электронной линии [1–3]. Авторами показано, что процедура параметризации Фейнмана с последующим переходом к размерности пространства-времени  $d \neq 4$  приводит к известным результатам [3].

**Постановка задачи.** Графическое изображение поправки к электронной линии КЭД в простейшем случае примет вид, представленный на рис. 1.

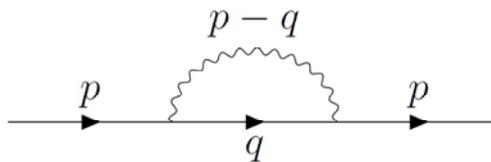


Рис. 1. Диаграмма Фейнмана поправки к электронной линии КЭД

Соответствующий рис. 1 матричный элемент с использованием правил Фейнмана [1–3] запишется в виде:

$$-i\Sigma(\hat{p}) = (-ie)^2 \int \frac{d^4 q}{(2\pi)^4} \gamma^\mu \frac{i(\hat{q} + m)}{q^2 - m^2} \gamma^\nu \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p - q)^2}. \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что интеграл расходится в пределе  $q \rightarrow \infty$ , поскольку степень числителя больше. Для дальнейшего вычисления объединим знаменатели выражения (1) с использованием параметризации Фейнмана [3]:

$$\frac{1}{ab} = \int_0^1 dx \frac{1}{(ax + b(1-x))^2}. \quad (2)$$

С использованием (2) знаменатель выражения (1) может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{q^2 - m^2} \frac{1}{(p - q)^2} &= \int_0^1 dx \frac{1}{\left(x(p - q)^2 + (1 - x)(q^2 - m^2)\right)^2} = \\ &= \int_0^1 dx \frac{1}{\left(q^2 - 2x(pq) + xp^2 - m^2 + xm^2\right)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Дальнейшие вычисления проведем с использованием подстановки  $\ell = q - xp$ . С учетом последнего выражение (3) примет вид:

$$\int_0^1 dx \frac{1}{\left(q^2 - 2x(pq) + xp^2 - m^2 + xm^2\right)^2} = \int_0^1 dx \frac{1}{\left(\ell^2 - a^2\right)^2}, \quad (4)$$

где определена вспомогательная величина  $a^2 = (1 - x)(m^2 - xp^2)$ . Подстановка (4) в выражение (1) после некоторых дополнительных вычислений приводит к

$$-i\Sigma(\hat{p}) = (-ie)^2 \int_0^1 dx \int \frac{d^4 \ell}{(2\pi)^4} \gamma^\mu \frac{(\hat{\ell} + x \hat{p} + m)}{(\ell^2 - a^2)^2} \gamma_\mu. \quad (5)$$

Дальнейшие вычисления выражения (5) проведем с использованием процедуры размерной регуляризации.

**Размерная регуляризация петлевого интеграла.** Вычисление свертки матриц Дирака выражения (5) проведем с использованием соотношений:

$$\gamma^\mu \gamma_\mu = d, \quad \gamma^\mu \hat{A} \gamma_\mu = \hat{A}(2 - d), \quad (6)$$

определенных в  $d \neq 4$  размерном пространстве-времени. Полагая  $d = 4 - \varepsilon$ , получаем:

$$\gamma^\mu (\hat{\ell} + x \hat{p} + m) \gamma_\mu = -(2 - \varepsilon)(\hat{\ell} + x \hat{p}) + (4 - \varepsilon)m, \quad (7)$$

откуда

$$-i\Sigma(\hat{p}) = -e^2 \mu^\varepsilon \int_0^1 dx \int \frac{d^d \ell}{(2\pi)^d} \frac{-(2 - \varepsilon)(\hat{\ell} + x \hat{p}) + (4 - \varepsilon)m}{(\ell^2 - a^2)^2}, \quad (8)$$

где параметр  $\mu$  введен для сохранения размерности. Поскольку линейные по  $\hat{\ell}$  слагаемые при интегрировании не дадут вклад [1–4], выражение (8) примет вид:

$$-i\Sigma(\hat{p}) = -e^2 \mu^\varepsilon \int_0^1 dx \int \frac{d^d \ell}{(2\pi)^d} \frac{-(2 - \varepsilon)x \hat{p} + (4 - \varepsilon)m}{(\ell^2 - a^2)^2}. \quad (9)$$

Выполняя поворот Вика [4] в выражении (9), получаем:

$$\mu^\varepsilon \int \frac{d^d \ell}{(2\pi)^d} \frac{1}{(\ell^2 - a^2)^2} \rightarrow i\mu^\varepsilon \int \frac{d^d \ell_E}{(2\pi)^d} \frac{1}{(\ell_E^2 + a^2)^2}; \quad (10)$$

непосредственное вычисление с использованием специальных функций приводит к

$$i\mu^\varepsilon \int \frac{d^d \ell_E}{(2\pi)^d} \frac{1}{(\ell_E^2 + a^2)^2} = i\mu^\varepsilon \frac{\pi^{d/2}}{(2\pi)^d} \Gamma(\varepsilon/2) \frac{1}{(a^2)^{\varepsilon/2}}. \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показывает, что при  $\varepsilon = 0$  расходимость обусловлена наличием полюса Гамма-функции Эйлера. Подстановка (11) в (9) окончательно приводит к

$$-i\Sigma(\hat{p}) = -ie^2 \frac{\mu^\varepsilon}{(4\pi)^{d/2}} \int_0^1 dx \Gamma(\varepsilon/2) \frac{(4-\varepsilon)m - (2-\varepsilon)x\hat{p}}{((1-x)(m^2 - x p^2))^{\varepsilon/2}}. \quad (12)$$

Дальнейшие расчеты выражения (12) связаны с разложением в ряды по малым степеням  $\varepsilon$ . Так, к примеру

$$\Gamma(\varepsilon/2) = \frac{2}{\varepsilon} - \gamma_E + O(\varepsilon), \quad (13)$$

где  $\gamma_E$  – постоянная Эйлера–Маскерони (подробные вычисления изложены в [3]). С использованием (12), (13) а также условий:

$$\Sigma(\hat{p} = m) = 0, \quad \left. \frac{d\Sigma(\hat{p})}{d\hat{p}} \right|_{\hat{p}=m} = 0, \quad (14)$$

проводят процедуру перенормировки массы электрона, однако указанные вычисления довольно громоздки [4, 5].

В работе проведено вычисление однопетлевой поправки к электронной линии квантовой электродинамики. В ходе работы авторами изложены метод параметризации Фейнмана, а также процедура размерной регуляризации для расчета петлевого интеграла. Полученные в работе выражения используются для расчета контрчленов  $\delta$  КЭД.

#### Литература

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. Т. 4. Квантовая электродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд., испр. – Москва : Наука, 1989. – 728 с.
2. Пенскин, М. Введение в квантовую теорию поля / М. Пенскин, Д. Шредер. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 784 с.
3. Romao, J. C. Modern techniques for one-loop calculation / J. C. Romao. – Departamento de Fisica, Instituto Superior Tecnico, Portugal, 2004. – 81 p.
4. Grozin, A. Lectures on QED and QCD: practical calculation and renormalization of one- and multi-Loop feynman diagrams / A. Grozin // World Scientific Publishing Company, 2007. – 236 p.
5. Ахиезер, А. И. Квантовая электродинамика / А. И. Ахиезер, В. Б. Берестецкий. – 4-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1981. – 432 с.

УДК 621.822.1

## АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА И ВЫБОРА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

С. И. Прач, О. А. Лапко

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Важное значение с точки зрения повышения долговечности гидродинамических подшипников скольжения имеет расчет толщины смазочного слоя. Исследованы методики расчета и выбора гидродинамических подшипников скольжения. Приведен оптимальный расчет гидродинамических подшипников скольжения в зависимости от толщины смазочного слоя.*

**Ключевые слова:** гидродинамический подшипник скольжения, толщина смазочного слоя, долговечность.

## ANALYSIS OF METHODS OF CALCULATION AND SELECTION OF HYDRODYNAMIC SLIDING BEARINGS

S. I. Prach, O. A. Lapko

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The calculation of the thickness of the lubricating layer is important from the point of view of increasing the durability of hydrodynamic plain bearings. The methods of calculation and selection of hydrodynamic sliding bearings are investigated. An optimal calculation of hydrodynamic sliding bearings is given depending on the thickness of the lubricating layer.*

**Keywords:** hydrodynamic sliding bearing, thickness of the lubricating layer, durability.

В настоящее время проблема повышения долговечности подшипников скольжения приобретает все большую актуальность в связи с непрерывным повышением нагрузочных, скоростных и температурных условий в контакте трения [1].

Актуальными являются проблемы, связанные с эксплуатацией гидродинамических подшипников скольжения. Связано это с тем, что в гидродинамическом подшипнике отсутствует прямой контакт между трущимися поверхностями, так как зазор между ними под действием гидродинамических сил заполняется смазывающей жидкостью.

Для работы гидродинамического подшипника необходимо создание гидродинамического слоя смазки, для этого нужно обеспечить следующие условия: смазывающая жидкость должна удерживаться в зазоре (например, между валом и корпусом подшипника); смазывающей жидкости должно поддерживаться давление, достаточное для уравновешивания нагрузки; жидкость должна полностью разделять скользящие поверхности, а, значит, ее слой должен быть выше, чем сумма шероховатостей поверхностей; толщина слоя жидкости должна быть больше минимального значения.

Достоинства гидродинамических подшипников скольжения: высокий ресурс, низкий уровень шума, малые вибрации при работе, демпфирование ударных нагрузок.

Одной из проблем использования гидродинамических подшипников является повышение рабочей температуры, которое приводит к повышению коэффициента трения и выхода их из строя. В связи с этим важное значение с точки зрения повышения долговечности гидродинамических подшипников скольжения имеет расчет толщины смазочного слоя.

Целью исследования был анализ существующих методик расчета по выбору гидродинамических подшипников скольжения и их характеристик: тепловой расчет, расчет смазки подшипника, расчет работоспособности подшипника.

В данной работе рассматриваем общий расчет гидродинамического подшипника скольжения на основе гидродинамической теории смазки [1–3], так как он включает в себя все анализируемые методики. Особенностью расчета подшипника является необходимость уточнений значений температуры и вязкости смазки в подшипнике.

1. Задаются исходные данные:  $d$  – диаметр вала, мм;  $l$  – длина подшипника, мм;  $g$  – диаметральный зазор, мм;  $d_o$  – диаметр маслоподводящего отверстия, мм;  $b$  – ширина маслоподводящего канала,  $b = (0,05–0,7)l$ , мм;  $F_r$  – радиальная нагрузка, Н;  $n$  – частота вращения вала подшипника, об/мин;  $S_m$  – сорт масла;  $p_e$  – давление подачи смазки, 0,05–0,2 МПа;  $T_0$  – температура масла, подаваемого в подшипник, °С;  $T_{об}$  – температура окружающего воздуха, °С;  $\alpha_b$  – коэффициент теплового расширения материала вала;  $\alpha_n$  – коэффициент теплового расширения материала подшипника;  $K$  – коэффициент теплоотдачи,  $K = 15–20$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

2. Рассчитываются параметры: среднее давление в смазке, МПа:

$$p_m = \frac{F_r}{ld}; \quad (1)$$

– угловая скорость, рад/с:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}; \quad (2)$$

– окружная скорость, м/с:

$$V = \frac{d\omega}{2}; \quad (3)$$

– относительная длина:

$$\lambda = \frac{l}{d}; \quad (4)$$

– относительный диаметральный зазор, при нормальных условиях (температура подшипника 20 °С):

$$\psi_0 = \frac{g}{d}. \quad (5)$$

3. Принимается средняя температура подшипника  $T_n$  больше или равной температуре масла  $T_0$ :  $T_n \geq T_0$ .

4. Принимается средняя температура масла в подшипнике  $T$  больше или равной средней температуре подшипника  $T_n$ :  $T \geq T_n$ .

5. Определяется в зависимости от принятой средней температуры масла в подшипнике  $T$  вязкость масла  $\mu$ .

6. Рассчитываются параметры:

– изменение диаметрального зазора от температуры:

$$\Delta\psi = (\alpha_n - \alpha_b)(T_n - 20); \quad (6)$$

– относительный диаметральный зазор с учетом температурного расширения:

$$\psi = \psi_0 + \Delta\psi; \quad (7)$$

– число Зоммерфельда:

$$S_0 = \frac{P_m \psi^2}{\mu \omega}. \quad (8)$$

7. В зависимости от  $S_0$  и  $\lambda$  определяется значение относительного эксцентриситета  $\chi$ .

8. Рассчитываются параметры:

– коэффициенты трения нагруженной и ненагруженной:

$$f = (f/\psi)\psi \text{ и } f' = (f'/\psi)\psi, \quad (9)$$

где  $f/\psi$  и  $f'/\psi$  – характеристики сопротивления вращению в нагруженной и ненагруженной зонах смазочного слоя, определяемые в зависимости от  $\chi$  и  $\lambda$ ;

– общие потери на трение в подшипнике с учетом трения в нагруженной и ненагруженной зонах:

$$P_f = fF_r V \text{ и } P = f'F_r V; \quad (10)$$

– общий расход смазки в подшипнике:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (11)$$

где  $Q_1$  – величина расхода смазки из нагруженной зоны:

$$Q_1 = \psi d^2 \omega q_1, \quad (12)$$

где  $q_1$  – коэффициент расхода из нагруженной зоны, определяемый в зависимости от  $\chi$  и  $\lambda$ ;  $Q_2$  – величина расхода смазки из ненагруженной зоны, обусловленная давлением подачи:

$$Q_2 = \frac{g^3 p_e}{\mu} q_2, \quad (13)$$

где  $q_2$  – коэффициент расхода из ненагруженной зоны, определяемый, при наличии смазочного кармана по формуле

$$q_2 = \frac{\pi (1 + \chi)^3}{6 \ln\left(\frac{l}{b}\right) q_p}, \quad (14)$$

где

$$q_p = 1,188 + 1,582\left(\frac{b}{l}\right) - 2,585\left(\frac{b}{l}\right)^2 + 5,563\left(\frac{b}{l}\right)^3; \quad (15)$$

– средняя температура подшипника, °С:

$$T_{\Pi} = 0,5(T_{\text{вых}} + T_0), \quad (16)$$

где  $T_{\text{вых}}$  – средняя температура смазки на выходе, °С:

$$T_{\text{вых}} = \frac{2P + 2c\rho QT_0 + K\pi dl(2T_{\text{об}} - T_0)}{2c\rho Q + K\pi dl}, \quad (17)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,

$$c = 1940(1 + 1,33 \cdot 10^{-3}(T_{\Pi} - 20)); \quad (18)$$

$\rho$  – плотность смазки,

$$\rho = 900(1 - 0,75 \cdot 10^{-3}(T_{\Pi} - 20)); \quad (19)$$

– средняя температура смазки в подшипнике, °С:

$$T' = T_1 + 0,5\Delta T, \quad (20)$$

где  $\Delta T$  – приращение температуры в нагруженной зоне смазочного слоя, определяемое по формуле

$$\Delta T = \frac{P_f}{c\rho Q_1}; \quad (21)$$

$T_1$  – температура в начале области трения:

$$T_1 = T_0 + 0,5\Delta T', \quad (22)$$

где  $\Delta T'$  – приращение температуры в начале нагруженной зоны от смешивания с потоками горячего масла, определяемое по формуле

$$\Delta T' = \frac{Q_x}{Q_1} \Delta T, \text{ если } Q_x \leq Q_c; \quad \Delta T' = \frac{Q_c}{Q_1} \Delta T, \text{ если } Q_x > Q_c, \quad (23)$$

где  $Q_x$  – количество горячего масла на выходе из нагруженной зоны, определяемое приближенной зависимостью:

$$Q_x = 0,125\psi d^3 \omega(1 - \chi); \quad (24)$$

$Q_c$  – количество масла, переносимое поверхностью вращающегося вала, определяемое приближенно по формуле

$$Q_c = 0,75d^2 \sqrt{\frac{\mu\omega}{\rho}}. \quad (25)$$

9. Сравниваются температуры смазки  $T$  и  $T'$ . Если вычисляемое значение отличается от принятого более чем на 1 °С, то принимается уточненное значение  $T$ , среднее между ранее принятым и рассчитанным значениями, и выполняется пересчет п. 5–8.

Если вычисляемое значение отличается от принятого менее чем на 1 °С, то определяется значение минимальной толщины смазочного слоя:

$$h_{\min} = \frac{d}{2} \psi(1 - \chi), \quad (26)$$

которое должно быть не меньше критического, выбираемого в зависимости от  $V$  и  $d$ .

В результате проведенного анализа был предложен оптимальный вариант расчета и выбора гидродинамических подшипников скольжения в зависимости от толщины смазочного слоя.

#### Литература

1. Справочник по триботехнике : в 3 т. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1990. – 416 с.
2. Расчет опорных подшипников скольжения : справочник / Е. И. Квитницкий, Н. Ф. Кириач, Ю. Д. Полтавский, А. Ф. Савин. – Москва : Машиностроение, 1979. – 70 с.
3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун [и др.] ; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.

УДК 621.31

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКИ

А. Ю. Савченко, О. П. Мурашко

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрено использование инженерной графики для решения задач электроэнергетики. Приведены примеры применения инженерной графики для проектирования электрических схем, анализа электрических цепей и оптимизации распределения электроэнергии. Исследование показывает, что использование инженерной графики позволяет значительно повысить эффективность проектирования и анализа систем электропитания.*

**Ключевые слова:** инженерная графика, электроэнергетика, электрические схемы, методы расчета, электроэнергетическая сеть.

### SOLVING PROBLEMS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY USING ENGINEERING GRAPHICS

A. U. Savchenko, O. P. Murashko

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Engineering graphics in the electric power industry is a universal language of power engineers. The process of solving any problem in the electric power industry is inextricably linked with the formation of a particular type of model. The use of engineering graphics in this industry allows you to perform various tasks in this industry: to depict electrical circuits and, based on them, calculate the parameters of elements of electrical networks: voltage, current, resistance in resistors, etc.*

**Keywords:** engineering graphics, electric power industry, electrical circuits, calculation methods, electric power grid.

Инженерная графика в электроэнергетике представляет собой универсальный язык инженеров-энергетиков. Процесс решения в электроэнергетике любой задачи неразрывно связан с формированием того или иного вида модели. Использование

инженерной графики в данной отрасли позволяет выполнить различные задачи в этой отрасли: изобразить электрические схемы и на их основе рассчитать параметры элементов электрических сетей: напряжение, силу тока, сопротивление в резисторах и многое другое в данных схемах. Правильность, точность, четкость построений – основа инженерной графики в электроэнергетике. Использование электрических схем позволяет понять устройство реального объекта, его структуру, свойства и т. д.

Энергетика является одной из ключевых отраслей, обеспечивающих население электроэнергией. С развитием технологий и увеличением потребления электро-энергии возникает необходимость в создании эффективных и надежных систем электроснабжения. В этом контексте инженерная графика является полезным инструментом для проектирования и анализа различных систем электроснабжения [2].

Одним из примеров применения инженерной графики в электроэнергетике является проектирование электрических цепей. Электрические схемы – это графическое представление элементов электрической схемы и их взаимосвязей. Инженерная графика позволяет создавать точные и наглядные схемы, что упрощает процесс проектирования и снижает вероятность возникновения проектных ошибок [1].

В данной статье будет показан один из методов решения задач в электротехнике с помощью инженерной графики.

Для решения любой задачи электроэнергетики используется электрическая схема, без которой невозможно рассчитать ее основные параметры. На основе этой схемы производится анализ соединения различных элементов электрической сети в токах. В зависимости от построения схемы могут быть применены следующие основные методы расчета параметров (силы тока, напряжения, сопротивления в резисторах): преобразования цепи; контурных токов; узловых потенциалов; наложения; эквивалентного генератора. Метод преобразования цепи позволяет рассчитать параметры цепи, если несколько последовательно и/или параллельно включенных сопротивлений заменить одним, при этом распределение токов в электрической цепи не изменится. Метод контурных токов заключается в том, что вместо действительных токов в ветвях вначале определяются на основании второго закона Кирхгофа так называемые контурные токи, замыкающиеся в независимых контурах, число уравнений равно числу независимых контуров. Метод узловых потенциалов заключается в том, что, используя первый закон Кирхгофа и закон Ома, можно определить потенциалы узлов цепи, а затем и токи ветвей. При этом потенциал одного из узлов принимают равным нулю. Метод наложения подразумевает, что токи в ветвях определяются как алгебраическая сумма их составляющих от каждого источника. Метод эквивалентного генератора используется при расчете схем, где одна ветвь выделяется в качестве сопротивления нагрузки, и требуется исследовать и получить зависимость токов в цепи от величины сопротивления нагрузки.

Рассмотрим один из методов расчета электрической цепи – метод преобразования цепи. Для решения данной задачи электроэнергетики используется электрическая схема, без которой невозможно рассчитать удельное и внешнее сопротивление тока в резисторах, силу тока в цепи, напряжение в цепи и т. д. На основе этой схемы производится анализ соединения различных элементов электрической сети в токах. Если на схеме резисторы соединены параллельно (рис. 1), то применяются формулы расчета общего сопротивления, общей силы тока и напряжения для параллельного соединения [(см. формулы (1)–(3)]:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (1)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – сопротивление резисторов в цепи.

$$I_{\text{общ}} = \sum I_i, \quad (2)$$

где  $I_i$  – сила тока резисторов в цепи.

$$U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n, \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение резисторов в цепи.

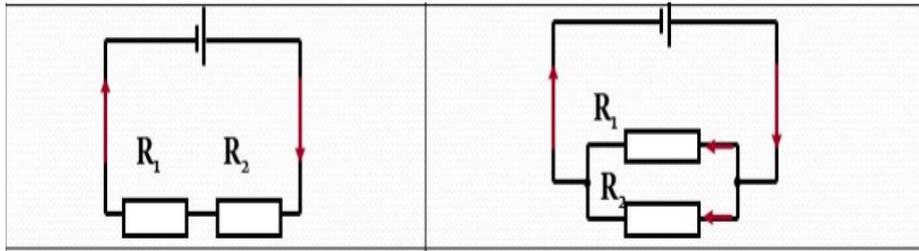


Рис. 1. Параллельное и последовательное соединение резисторов в цепи

Если резисторы на схеме соединены последовательно (рис. 1), то применяются следующие формулы расчета [см. формулы (4)–(6)]:

$$R_{\text{общ}} = \sum R_i, \quad (4)$$

где  $R_i$  – сопротивление резисторов в цепи.

$$I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n, \quad (5)$$

где  $I$  – сила тока резисторов в цепи.

$$U_{\text{общ}} = \sum U_i, \quad (6)$$

где  $U_i$  – напряжение резисторов в цепи.

Также с помощью электрической цепи можно посчитать ЭДС для каждого соединения (рис. 2):

– для параллельного соединения [см. формулу (7)]:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_n, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_n$  – ЭДС катушки в цепи;

– для последовательного соединения [см. формулу (8)]:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n. \quad (8)$$

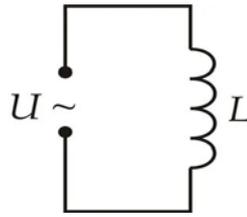


Рис. 2. Электрическая схема с соединенной катушкой индуктивности

Таким же способом производится расчет емкости конденсатора [см. формулы (9)–(10)], соединенных определенным способом (рис. 3):

– для параллельного соединения:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n, \quad (9)$$

где  $C_1, C_2, C_n$  – емкость конденсатора;

– для последовательного соединения:

$$C_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}. \quad (10)$$

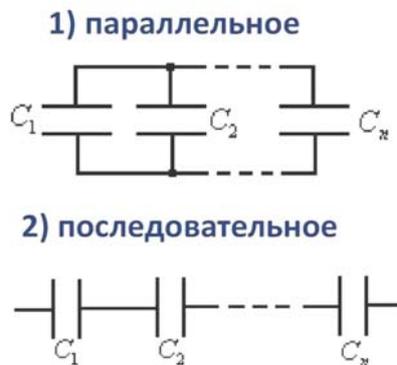


Рис. 3. Параллельное соединение конденсатора в электрической схеме

Таким образом, инженерная графика в электроэнергетике позволяет решать задачи с требованиями, предъявляемыми чертежам, тем самым точно проводить расчеты параметров электрической сети.

#### Л и т е р а т у р а

1. Разработка технологии биоэнергетики / С. Н. Волкова, Е. Е. Сивак, В. В. Морозова, А. В. Шленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Техника и технологии». – 2017. – Т. 7, № 3 (24). – С. 93–98.
2. Кувшинов, Н. С. Чертежи электротехнических изделий в приборостроении и энергетике : учеб. пособие / Н. С. Кувшинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2007. – 128 с.

## СЕКЦИЯ 8. ПРОБЛЕМЫ ЭКОНОМИКИ, ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ

---

УДК 339:340

### ТАМОЖЕННОЕ АДМИНИСТРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТОРГОВЛИ

**О. В. Путято, В. А. Прохоров**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет  
транспорта», г. Гомель*

*Рассматриваемая тема охватывает широкий спектр вопросов, связанных с процессами и процедурами, которые таможенные органы используют для контроля и регулирования электронной торговли, что включает в себя механизмы для обеспечения соблюдения законодательства, в частности, таможенного, а также для предотвращения незаконной торговли. Важными аспектами являются цифровизация, автоматизация различных процессов, а также сотрудничество с другими государственными органами и государствами.*

**Ключевые слова:** электронная торговля, ЕАЭС, ЕЭК, ТК ЕАЭС, НЦЭУ.

### CUSTOMS ADMINISTRATION OF ELECTRONIC COMMERCE

**V. V. Putsiata, U. A. Prokharau**

*Educational institution «Belarusian State University of Transport», Gomel*

*The topic under consideration covers a wide range of issues related to the processes and procedures that customs authorities use to control and regulate electronic commerce, which includes mechanisms to ensure compliance with legislation, in particular customs, as well as to prevent illegal trade. Digitalization, automation of various processes, as well as cooperation with other government agencies and states are important aspects.*

**Keywords:** e-commerce, EAEU, EEC, CC EAEU, NCES.

Электронная коммерция – «молодое» и быстроразвивающееся явление, которое прямо или косвенно связано с различными областями. Масштабы электронной торговли диктуют необходимость четкого регулирования этой деятельности. В настоящее время существует два уровня организации Интернет-торговли: локальный (национальный) и трансграничный (международный), и, соответственно, процедуры и методы управления этими уровнями различаются. Так, при координации деятельности на международном уровне необходимо учитывать отличные для каждой страны факторы: таможенные пошлины, особые налоговые режимы, штрафные санкции за нарушение сроков поставки или качества товара и др.

В контексте развивающегося рынка электронной торговли в рамках Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС) появилась необходимость в создании единого правового механизма, определяющего общую основу регулирования перемещения товаров электронной торговли через таможенную границу для всех государств-участников евразийской интеграции.

Следует отметить, что основные направления развития регулирования трансграничной электронной торговли определены в рамках Решения Высшего Евразий-

ского экономического совета от 11 декабря 2020 г. № 12 «О стратегических направлениях развития евразийской экономической интеграции на период до 2025 года», что предусматривает реализацию формирования цифрового пространства Союза, а также цифровых инфраструктур и экосистем.

Для достижения этой цели был разработан проект «дорожная карта» по созданию благоприятной среды для электронной торговли в ЕАЭС, в соответствии с которым нормативное регулирование перемещения товаров в области электронной торговли является ключевой задачей. В проекте «дорожной карты» рассматриваются концептуальные основы настоящего международного соглашения, условия функционирования единого рынка товаров электронной торговли, принципы защиты прав и интересов участников электронной торговли, включая защиту прав потребителей, механизм разрешения споров и вопросы обеспечения информационной безопасности. Помимо этого основными направлениями развития регулирования электронной торговли в ЕАЭС также является применение мер нетарифного регулирования в отношении перевозимых товаров и создание «цифрового профиля» товаров для интернет-площадок.

Поправки должны в первую очередь урегулировать терминологию данной сферы, отсутствие которой является серьезным недостатком области регулирования, поскольку основные термины, такие как «электронная торговля», «товары электронной торговли», «участники электронной торговли» и другие все также остаются не раскрытыми. Важно отметить, что Распоряжением Коллегии ЕЭК от 16.08.2022 г. № 132 «О проекте Протокола о внесении изменений в Договор о ТК ЕАЭС от 11 апреля 2017 года», предполагается нормативное закрепление понятий «таможенная пошлина, взимаемая по единой ставке», «товары электронной торговли» (под которыми понимаются товары электронной торговли, предназначенные для реализации физическими лицами и товары электронной торговли, приобретенные физическими лицами), «товары электронной торговли, предназначенные для реализации физическим лицам», «товары электронной торговли, приобретенные физическими лицами», однако остаются незакрепленными понятия электронной торговли, участников электронной торговли и др.

Кроме того, целесообразно создание договора, содержащего единые правила и условия осуществления электронной торговли на территории ЕАЭС, который необходимо основывать на принципах Союза, утвержденных Договором о ЕАЭС: свобода перемещения товаров, услуг и капитала; наличие принципа наибольшего благоприятствования, т. е. должны быть предоставлены не менее благоприятные условия осуществления торговли иным государствам-членам ЕАЭС в определенном государстве Союза, в части перемещения товаров электронной торговли; принцип недискриминации. Следует отметить, что аналогичное положение должно быть применено и к сопутствующим электронной торговле услугам.

Немаловажным элементом таможенного правового механизма является создание единого перечня товаров, запрещенных в качестве товаров электронной коммерции на территории ЕАЭС. Создание национальных перечней каждым государством-членом Союза стало бы серьезным препятствием для осуществления такого рода торговли.

Принятие общих подходов и требований к электронному документообороту в контексте электронной торговли является перспективным направлением развития. По мнению бизнес-сообщества, различные требования государств-членов ЕАЭС в части передачи товаров усложняют процедуру их перемещения, и поэтому использование единых форматов документов, их реквизитов должно содержать минималь-

ные требования, необходимые для торговли и быть простым в использовании. Также важно унифицировать механизм использования электронной цифровой подписи, которая придает электронному документу юридическую силу.

В Республике Беларусь в соответствии с Указом Президента от 8 ноября 2011 г. № 515 «О некоторых вопросах развития информационного общества Республики Беларусь» создано государственное унитарное предприятие «Национальный центр электронных услуг» (далее – НЦЭУ). Национальный центр электронных услуг выступил в качестве национального оператора доверенной третьей стороны (далее – ДТС) в рамках пилотного проекта «Минская инициатива», реализуемого Министерством по налогам и сборам Республики Беларусь и Федеральной налоговой службой России. Проект направлен на обмен электронными товаросопроводительными документами в рамках трансграничной торговли между хозяйствующими субъектами Российской Федерации и Республики Беларусь с использованием механизмов ДТС. Этот пилотный проект также может послужить основой для программы, реализуемой в рамках ЕАЭС.

По мнению ЕЭК, целесообразно создание добровольных наднациональных объединений экономических субъектов рынка электронной торговли, поскольку органы ЕАЭС не могут и не должны быть регуляторами рынка. Этим ассоциациям следует обеспечить выработку ключевых регуляторных инициатив в сотрудничестве и координации с национальными законодательными и исполнительными органами власти для решения проблем, с которыми сталкиваются импортеры и экспортеры товаров при их транспортировке.

В 2017 г. была утверждена Рекомендация Коллегии ЕЭК от 21 ноября 2017 г. № 27 «Об общих подходах к проведению государствами-членами ЕАЭС согласованной политики в сфере защиты прав потребителей при реализации товаров (работ, услуг) дистанционным способом», в которой утверждены основы осуществления электронной торговли. Рассматриваемый документ акцентирует внимание на снижении рисков потребителей, связанных с приобретением «опасных» и «запрещенных» товаров, идентификацией продавца, отсутствием правил по заключению договоров и защитой личных данных покупателей, поскольку в современном мире остро стоит вопрос о недобросовестности продавцов, что выражается, например, в неопределенной системе формирования конечной стоимости товара. Перспективным направлением регулирования является механизм снижения указанных рисков потребителей, однако стоит отметить, что в рамках ЕАЭС защита прав потребителей гарантируется Договором о ЕАЭС (ст. 60), а также Протоколом к Договору № 13 «О проведении согласованной политики в сфере защиты прав потребителей». Целесообразность создания единых правил в отношении электронной торговли вытекает из положений вышеперечисленных нормативов, так как в настоящее время в праве ЕАЭС трактуется, что защита прав потребителей осуществляется на основе национальных законодательств государств, однако данное положение неприменимо к международной электронной торговле в силу особенностей осуществления такой деятельности.

Для реализации существования единых правил защиты прав потребителей в рамках электронной торговли также необходимо согласовать и (или) унифицировать законодательство, устанавливающее единые сроки возврата товаров и денежных средств в случае отмены покупки, а также установить единую ответственность продавцов.

Что касается урегулирования споров в области электронной торговли, то ЕЭК считает перспективным создание единой платформы на подобие «единого окна». Предлагаемое единое урегулирование споров будет включать в себя модель взаимо-

отношений между потребителями, интернет-площадками, продающими товары, и государственными органами, что сократит время, необходимое для рассмотрения запросов потребителей и реагирования на них.

Помимо предлагаемых проектов развития таможенного администрирования электронной торговли и уже применяемых, также стоит отметить, что на наднациональном уровне разработан проект Протокола о внесении изменений в Договор о ТК ЕАЭС, затрагивающий сферу электронной торговли, что включает в себя такие нововведения, как:

- выделение товаров трансграничной электронной торговли в отдельную категорию товаров;
- введение декларации на товары электронной торговли;
- введение института оператора электронной торговли (оператор электронной торговли будет осуществлять таможенное декларирование товаров электронной торговли, уплачивать в отношении них таможенные пошлины, налоги, нести ответственность за недостоверное таможенное декларирование);
- использование процедуры таможенного склада к товарам электронной торговли (аналог «бондовых» складов).

Таким образом, рассмотрев различные элементы таможенного администрирования электронной торговли, необходимо отметить, что данную сферу только начинают упорядочивать, что проявляется в разработке новых программ, принятии соответствующих нормативно-правовых регуляторов, и, конечно, важным принципом здесь должно выступать единое применение новшеств во всех государствах-членах Союза. Однако, как и сама электронная торговля, которой свойствен характер постоянного изменения, элементы, ее регулирующие, также должны постоянно совершенствоваться.

#### Литература

1. Ревина, С. Н. Вопросы таможенного регулирования в условиях развития интернет-торговли / С. Н. Ревина, У. С. Лулева // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 4 (130). – URL: <https://research-journal.org/archive> (дата обращения: 13.04.2024).
2. Валовенко, М. В. Направления развития регулирования трансграничной электронной торговли на пространстве ЕАЭС / М. В. Валовенко // Молодой ученый. – 2023. – № 9 (456). – С. 89–91. – URL: <https://moluch.ru/archive> (дата обращения: 13.04.2024).
3. Таможенное администрирование товаров международной электронной торговли, декларация на товары электронной торговли. – 2024. – URL: <https://customs.gov.ru> (дата обращения: 13.04.2024).

УДК 338.45

## **COMPETITIVENESS OF THE BELARUSIAN OIL-PRODUCING COMPLEX IN MODERN CONDITIONS**

**Yauheni Kazheunikau**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The article analyzes external and internal factors that determine the competitiveness of the Belarusian oil-producing complex in recent years. As a result, the goals, objectives, and ways of maintaining and increasing the competitiveness of this sector, which is most important for the country's economy, are determined.*

**Keywords:** Belarus, economy, complex, oil production, competitiveness, external and internal factors, maintaining, increasing.

## КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ БЕЛОРУССКОГО НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Е. А. Кожевников

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Проанализированы внешние и внутренние факторы, определяющие конкурентоспособность белорусского нефтедобывающего комплекса в последние годы. В результате определены цели, задачи и пути сохранения и наращивания конкурентоспособности этого важнейшего для экономики страны сектора.*

**Ключевые слова:** Беларусь, экономика, комплекс, нефтедобыча, конкурентоспособность, внешние и внутренние факторы, сохранение, наращивание.

In domestic and foreign scientific literature, there's a great variety of methodological approaches to assessing the competitiveness of an industry, industrial, or inter-industrial complex in the country's economy. For the oil-producing complex, the practical side of such an assessment is additionally complicated by the limited and closed nature of the information base and, to some extent, by the difficulties of substantiating the choice of indicators characterizing the results and prospects of activities. However, the urgent practical need for assessment requires ignoring methodological problems and using a simplified concept of competitiveness. In this article, the competitiveness of the oil-producing complex will be understood as its ability to produce products that meet the requirements of the domestic and foreign markets; create conditions for maintaining and increasing production and sales of products, as well as the economic potential of enterprises and organizations included in the complex.

The oil-producing complex of the Republic of Belarus is represented by the State Production Association Belorusneft, one of the largest organizations in the domestic extractive industry. The preservation and increase of the competitiveness of this enterprise in modern conditions has been realized in the context of the growing interaction of the economies of the Republic of Belarus and the Russian Federation. At the same time, the main areas of competitiveness growth are:

1. Increasing the domestic resource base for oil and gas. Achievements and problems in this area are reflected in the materials of the Meeting of the President of the Republic of Belarus "On the state and development of the mineral resource base of the Republic of Belarus", held on March 12, 2024 [1]. It was noted there that the industrial reserves of Belarusian oil amount to about 45 million tons, growing by 14 million tons over 2016-2023, including 2.5 million tons in 2023 alone. The latter figure has become a record for the past 40 years. First of all, this is achieved by increasing seismic exploration and other geological exploration work and exploratory well drilling on the territory of Belarus. A remarkable example of the implementation of this direction is the discovery of oil deposits in the area and along the borders of the Rechitsa, Khoyniki, Loevsky, and Gomel districts of the Gomel region, the resource base of which is estimated at almost one million tons. The growth of discovered oil reserves at the same time exceeds the annual level of oil production for 2023 by 400 thousand tons, which indicates the growth of the potential of the oil-producing complex.

2. Creation and expansion of Belorusneft subsidiaries and separate divisions operating in Russia: Open Joint-Stock Company 'Belorusneft-Sibir' and Joint-Stock Company 'Oil Company Yangpur'. The year 2023 is characterized by an increase in the volume of

production and economic activities both in the performance of production and exploratory well drilling, including sidetrack drilling, and in the implementation of services [2]. These include telemetry support for well construction, preparation and support of drilling fluids, hydraulic fracturing, elimination of catastrophic absorption in well construction cycles, and others. Moreover, recent years have been characterized by a steady increase in the volume of performing the relevant types of work, which means a constant increase in exports for the Belarusian enterprise. In turn, this contributes to the growth of the competitiveness of the Belarusian oil and gas production complex.

3. Reorientation of the technical and technological base of the Belarusian oil production to the maximum possible import substitution and replacement of the western vector with the eastern and south-eastern ones. The transition in the use of drilling, geological exploration, and other equipment from European and American to the best manufacturers from China, India, Russia, and Belarus is not an easy task in organizational and economic terms. But it is effectively solved by specialists of the State Production Association Belorusneft, who have organized an almost regular presence in the markets of manufacturers of equipment, components, and spare parts from these countries.

The above-mentioned areas of activity are largely driven by changes in the external environment for the Belarusian oil-producing complex. The external environment has certainly undergone significant changes in recent years. In our opinion, the most important of them are:

- the pressure of sanctions on the country's economy from the European Union, the United States of America, and some other countries, leading to the closure of a number of traditional oil and oil product markets for Belarus;
- difficulties in acquiring the necessary imported fixed production capital, components, and spare parts for oil-producing equipment;
- problems in the currency and financial sphere for transactions made in US dollars, euros, and some other currencies;
- complete closure or significant restrictions of entire logistics directions: southern, northern, western.

There are a number of other external factors that have a nearly constant and rather negative impact on the oil-producing complex of Belarus. The most important among them are:

1. The continuing volatility of the global oil market, where unpredictability, variability, and instability coexist with fierce competition. It is known that fluctuations in global oil prices have almost no equivalents among other types of commodity resources. Thus, over the past thirty years, the price of a barrel of Brent crude oil has varied from 9.1 US dollars on December 10, 1998 to a historical maximum of 143.95 US dollars on July 4, 2008.

2. Dominance of the oil and gas market of the Eurasian Economic Union by one state: the Russian Federation [3, 4]. According to the Minister of Energy of Russia N. Shulginov [5], oil production in the country in 2023 is about 523 million tons, and in 2022 – 535 million tons (a decrease of 2.2 percentage points). During this period, the Republic of Belarus, on the contrary, was able to increase oil production volumes from 1 million 812 thousand tons in 2022 to 1 million 877 thousand tons in 2023 [6], which ensured growth of 3.6 percent. Thus, the Russian volume of oil production exceeds the Belarusian one by 295 times in 2022 and by almost 279 times in 2023.

3. Variation in the volume of oil imports to the Republic of Belarus from the Russian Federation, not always associated with changes in the needs of our country. As we noted earlier [3], the range of changes in these volumes in certain periods reached more than nine dozen times.

4. Differences in labor productivity levels in the Belarusian and Russian oil industries. The differentiation is objectively determined by a number of factors, including:

- geological conditions of occurrence of oil reservoirs (density and other physical and chemical properties of rocks, depth of occurrence, reservoir pressure, etc.);
- quantity and quality of hydrocarbons, including the presence of impurities;
- geographical location and level of economic development of the oil extraction region;
- stage of oil field development (stage of production increase, stage of maximum production volume, stage of production decline, stage of production stabilization);
- terrain, climatic conditions, etc.

The Belarusian oil-producing complex has a much smaller raw material base, resources, and oil reserves in comparison with the Russian ones. This is reflected in labor productivity, field production costs [7], and the overall results of production and economic activity. Only the climatic conditions, the level of economic development of the territories, the geographical location, and the terrain are more preferable in comparison with many Russian regions. However, these advantages are not always present. For example, the Maysko-Makeevsko-Dneprovskaya area discovered in Belarus is characterized not only by complex geological conditions but also by difficult conditions on the surface with a predominance of forest and swampy areas.

5. Preservation and development of the human resources potential of the oil-producing complex, the requirements for which are particularly high. These are deep professional knowledge, competencies, skills, experience in production activities, high social, personal, and psychophysical characteristics. Given the opportunities for labor migration of personnel from Belarus to Russia, secured by interstate agreements and regulatory legal acts, as well as in the context of differentiation of wage levels, ensuring the stability of the personnel of workers and specialists in the oil production of Belarus is becoming a difficult task. Belarusian educational institutions along with industry organizations are involved in solving this problem. In this regard, it is impossible not to note the contribution to the training, retraining, and advanced training of such personnel of the Sukhoi State Technical University of Gomel and the Institute for Advanced Training and Retraining based on this university.

The competitiveness of the oil-producing complex consists of a number of production and economic components, among which the following should be considered key:

- technical and technological level of production;
- cost savings and reduced labor intensity of well drilling, oil and gas production, and other technological processes [7];
- improvement of the organization of production, its structure, and management; increase in service standards and areas;
- improvement of labor organization and improvement of the use of the working time fund on this basis, reduction of labor intensity of work, optimization of the number of employees;
- improvement of the use of production capacities by reducing the duration of underground and major repairs of wells, as well as by carrying out additional geological and technical measures (transition to mechanized production, putting wells into operation from the control, inactive and mothballed fund, drilling second wells, etc.);
- optimization of the production structure by, for example, varying oil production using fountain or mechanized methods.

Thus, increasing the competitiveness of the Belarusian oil and gas production complex should, in our opinion, include:

Strengthening the human resources potential of State Production Association Belorusneft by improving the organization and production management, developing a system of training, retraining, and advanced training of personnel, and creating the most comfortable working conditions and remuneration system.

Steady growth in labor productivity in oil production due to motivational, technical, technological, and organizational factors.

Expansion of the volumes and types of production and economic activities in the territory of the main trade and economic partner of Belarus: the Russian Federation.

Strengthening coordinating interaction in the field of oil production with all countries of the Eurasian Economic Union, as well as with other friendly states of the world.

Expansion of the domestic resource base for oil with an increase in the volume of explored reserves, the number and productivity of discovered fields.

Reorientation of the technical and technological base of oil production from the Western European and American direction to the eastern and south-eastern vector with the maximum possible achievement of import substitution.

All this will allow not only to preserve but also to strengthen the competitiveness of the oil production complex of the Republic of Belarus and to increase the economic efficiency of its functioning.

#### References

1. Совещание о состоянии и развитии минерально-сырьевой базы Республики Беларусь. URL: <https://president.gov.by/ru/events/soveshchanie-o-razvitii-mineralno-syrevoiy-bazy-v-belarusi> (date of access: 13.03.2024).
2. Нефтяник newspaper. – N 46/2863. – P. 4 (date of access: 14.12.2023).
3. Кожевников, Е. А. Проблемы интеграционного взаимодействия для организаций нефтегазодобывающей отрасли Беларуси / Е. А. Кожевников // Менталитет славян и интеграционные процессы: история, современность, перспективы : материалы XI Междунар. науч. конф. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 25–27.
4. Кожевников, Е. А. Стратегия развития нефтепромышленного производства в Беларуси / Е. А. Кожевников // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сб. науч. тр. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – P. 143–146.
5. Interfax. – URL: [interfax.ru/business/938503](https://interfax.ru/business/938503) (date of access: 29.12.2023).
6. «Нефтяник» newspaper. – N 2/2867. – P. 6–8 (date of access: 11.01.2024).
7. Кожевников, Е. А. Проблемы снижения затрат в организациях нефтегазодобывающей отрасли Республики Беларусь / Е. А. Кожевников, Р. В. Асвинов // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 396–398.

УДК 658.51

## **ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ**

**Е. В. Трейтъякова**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*В настоящее время одним из способов развития мировой экономики стал процесс цифровизации. Согласно Государственной программе «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 гг. предусматривается цифровая трансформация процессов управления предприятиями. В работе представлены особенности управления предприятием в условиях цифровизации.*

**Ключевые слова:** экономика, менеджмент, цифровизация, бизнес-процессы, программное обеспечение.

## **FEATURES OF ENTERPRISE BUSINESS PROCESS MANAGEMENT IN THE CONTEXT OF DIGITALIZATION**

**E. V. Treityakova**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Currently, the digitalization process has become one of the ways to develop the global economy. According to the State Program "Digital Development of Belarus" for 2021-2025, digital transformation of enterprise management processes is envisaged. The paper presents the features of enterprise management in the context of digitalization.*

**Keywords:** economics, management, digitalization, business processes, software.

Внедрение цифровизации во все сферы жизни общества становится объективной реальностью. Применение цифровизации на предприятии меняет как внешнюю среду организации, так и внутренние процессы, происходящие, в частности, в области менеджмента. С помощью цифровых технологий задачи, которые еще совсем недавно требовали особых усилий со стороны менеджеров, выполняются быстро и качественно, позволяя сосредоточить усилия на других направлениях. В итоге повышается эффективность не только управленческой, но и всех иных видов деятельности компании, улучшается ее финансовое состояние и укрепляются конкурентные позиции. Использование цифровых технологий в управлении организацией является одним из наиболее целесообразных, эффективных и перспективных сценариев его дальнейшего развития.

В феврале 2021 г. в Республике Беларусь была принята Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 гг. Для решения задачи по развитию инструментов цифровой экономики в различных отраслях национальной экономики в рамках данной подпрограммы предусматривается цифровая трансформация процессов управления предприятиями и производством, а также создание единых цифровых решений (государственных цифровых платформ) для продвижения отечественной продукции на мировой рынок.

В рамках мероприятий, направленных на цифровую трансформацию производственных процессов и управления ими, предусматривается выполнение реинжиниринга и оптимизации бизнес-процессов отечественных предприятий с использованием передовых производственных технологий, соответствующих концепции «Индустрия 4.0» [1].

К задачам управления предприятием в условиях цифровизации можно отнести следующие:

- изменение бизнес-процессов компании на основе передовых цифровых технологий;
- поддержание высокого уровня знаний менеджмента компаний и специалистов в области современных технологий;
- поддержание высокой степени готовности к изменениям и вызовам внешней среды.

Что касается конкретных сфер применения цифровых технологий, то они могут использоваться как на этапе принятия решений, так и при непосредственном осуществлении управленческих действий.

Массовое использование цифровых технологий привело к появлению программных продуктов трех типов:

- **Системы автоматизированной аналитики.** Менеджер использует сведения не только из субъективных отчетов сотрудников, но и из объективных данных, хранящихся в CRM, ECM, ERP, BAM и других информационных комплексах, внедренных в компании.

- **Системы поддержки принятия решений, или СППР.** Заниматься вычислениями менеджеру самому теперь нет необходимости: СППР берут все это на себя и выдают оценку каждому варианту, учитывая все плюсы и минусы.

- **Системы поведенческой аналитики.** Они отслеживают эффективность работы и вовлеченность персонала, эмоциональное состояние работников, мотивацию, индекс выгорания. С помощью таких систем можно определять неформальных лидеров команд.

Современное программное обеспечение способно не просто перевести операционную деятельность организации в цифровой формат и сохранить эти данные большим массивом, но и проанализировать их, а затем показать проблемные зоны, предложить свои способы решения.

Таким образом, цифровая трансформация дает качественное улучшение бизнес-процессов предприятия, а менеджмент предприятий в этих условиях должен активно реагировать на изменения во внешней среде, выстраиваться с учетом прозрачности и структурированности всех бизнес-процессов, применять эффективную систему управления знаниями и мотивации персонала.

Особенности управления предприятием в условиях цифровизации:

- принятие решения в одно касание;
- высокая скорость принятия решений;
- получение и обработка данных в режиме реального времени;
- управление процессами на основе применения автоматизированных технологий обработки, анализа и прогнозирования больших массивов данных;
- формирование цифровой экосистемы;
- ориентация на конкретного пользователя;
- интерактивность среды и высокая скорость реакции на изменения.

Не меньший интерес представляют и технологии больших данных (Big Data), обеспечивающие систематизацию анализируемых данных и выявление скрытых закономерностей, что особенно важно в условиях неопределенности и риска. Это входит в список ключевых компетенций менеджера. С целью автоматизации различных бизнес-процессов и управления ими целесообразно использовать и такие системы как CRM, SCM и ERM. Как без основ программирования и кибербезопасности, так и без представления о больших данных в настоящее время невозможно полноценно управлять бизнес-процессами предприятия. Этот список цифровых компетенций постоянно расширяется по мере изменения ситуации.

Традиционные инструменты и умения менеджера в условиях цифровизации не перестают быть актуальными. Возможности умных программ экономят руководителю силы и время, которые он использует на решение тех задач, с которыми искусственный интеллект не справится: развитие корпоративной культуры, поддержку плодотворной рабочей коммуникации в команде, определение стратегии развития предприятия, выстраивание тактических планов и т. п.

Таким образом, в современных условиях предприятиям следует взглянуть на осуществляемые бизнес-процессы с учетом подходов цифровой экономики. При этом неизбежно будут расти затраты на исследования, разработки, консультативные услуги и обучение сотрудников в рамках цифровизации менеджмента предприятий.

Необходимо просчитать эффективность тех или иных изменений, чтобы с уверенностью утверждать, что ключевые процессы на предприятии в результате внедрения цифровых технологий существенно улучшатся. Предприятия, уже перешедшие на цифровые рельсы, сталкиваются с тем, что подходы к управлению организацией необходимо менять с учетом особенностей новой цифровой реальности.

#### Литература

1. Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100066> – Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь (дата обращения: 10.09.2024).
2. Караваева, Е. Д. Управление организацией в условиях цифровизации : учеб. пособие / Е. Д. Караваева. – Санкт-Петербург : Научное издание, 2020. – 68 с.
3. Косарева, И. Н. Особенности управления предприятием в условиях цифровизации / И. Н. Косарева, В. П. Самарина // Вестник Евразийской науки. – 2019. – № 3. – URL: <https://esj.today/-PDF/35ECVN319.pdf> (дата обращения: 15.09.2024).

УДК 659

### **РОЛЬ САЙТА В ПРОДВИЖЕНИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ОАО «ГОМЕЛЬСТРОЙМАТЕРИАЛЫ»)**

**Ю. А. Галова, В. А. Сидоркина, Е. Н. Карчевская, Л. Л. Соловьева**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрен рынок интернет-торговли. Уделено внимание продвижению предприятий в сети Интернет. Статья посвящена изучению сайта ОАО «Гомельстройматериалы», определению его состояния и специфики, а также поиску путей повышения эффективности сайта как важного элемента продвижения организации.*

**Ключевые слова:** сайт, продвижение, позиционирование, эффективность.

### **THE ROLE OF A WEBSITE IN PROMOTING A CONSTRUCTION ORGANISATION (THE CASE OF ОАО “GOMELSTROYMATERIALY”)**

**Y. A. Galova, V. A. Sidorkina, E. N. Karchevskaya, L. L. Solovyova**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The article examines the Internet trade market. Attention is paid to the promotion of enterprises on the Internet. The article is devoted to the study of the site of JSC Gomelstroyaterialy, determining its condition and specifics, as well as finding ways to improve the effectiveness of the site, as an important element of promoting the organization.*

**Keywords:** website, promotion, positioning, effectiveness.

Объектом данного исследования является ОАО «Гомельстройматериалы».

Предмет исследования – состояние и особенности официального сайта ОАО «Гомельстройматериалы».

Целью данной исследовательской работы является анализ состояния сайта организации, выявление основных недостатков и формирование предложений по повышению эффективности функционирования сайта.

Сайт производственной компании – это не только возможность заявить о себе в сети, но и мощный маркетинговый инструмент, который позволяет решать бизнес-

задачи. Также сайт задает позиционирование компании, т. е. помогает представить предприятие как лидера в области производства определенной продукции, показать сильные стороны, создать впечатление надежного партнера. Благодаря сайту завод может расширить географию присутствия: выйти на другие регионы, охватить новые рынки, привлечь заказчиков с любого конца страны.

Сайт как один из элементов продвижения в Интернете призван выполнять определенные функции. Такими функциями являются:

- *презентация компании*: сайт служит лицом компании в Интернете. Он должен отражать корпоративный имидж, демонстрировать достижения, проекты и услуги. Качественно выполненный сайт создает первое впечатление о компании и формирует доверие у потенциальных клиентов;

- *обеспечение информацией*: сайт предоставляет пользователям доступ к информации о компании, ее услугах, ценах и контактных данных. Это позволяет клиентам легко находить нужную информацию и принимать решения о сотрудничестве;

- *увеличение видимости в поисковых системах*: оптимизированный сайт помогает компании занимать высокие позиции в результатах поисковых систем, что увеличивает ее видимость и привлекает больше целевой аудитории;

- *коммуникация с клиентами*: сайт может включать формы обратной связи, чаты, комментарии и отзывы, что позволяет налаживать связь с клиентами и оперативно реагировать на их запросы.

Для строительных организаций качественный сайт приносит значительные преимущества. Во-первых, он обеспечивает круглосуточный доступ к информации для клиентов в любое время. Во-вторых, онлайн-присутствие позволяет охватывать более широкую аудиторию, чем традиционные рекламные каналы, что особенно важно для компаний, работающих в разных регионах. Профессионально оформленный сайт выделяет компанию среди конкурентов, показывая ее современность и готовность к развитию. Кроме того, в долгосрочной перспективе сайт помогает сократить затраты на рекламу, благодаря SEO-оптимизации, которая привлекает клиентов без постоянных затрат на оплату объявлений.

Анализ официального сайта ОАО «Гомельстройматериалы» показал:

- предприятие имеет средний (31,9) SEO-рейтинг;

- хороший (48 символов) показатель Title, т. е. заголовок страницы отображается в результатах поиска;

- низкий показатель информативного метаописания страницы для поисковых систем Description (0 символов);

- присутствует атрибут rel="canonical", который указывает на оригинальный URL страницы;

- сайт имеет приемлемый результат (12,5 %) тошноты (заспамленности) текста;

- в семантическом ядре (частота повторений слов) выделяются три ключевых слова: (плита – 3,04 % – 33 раза, стен – 1,56 % – 17 раз, кирпич – 1,47 % – 16 раз;

- скорость загрузки (0,64 с) более высокая, чем у 40 % сайтов.

Анализ SEO-оптимизации официального сайта дал следующие результаты:

- заголовок страницы точно описывает содержание страницы. Он содержит три ключевых слова, что соответствует нормативам. Благодаря этому сайт не попадает под санкции за спам. Заголовок также соответствует коммерческим запросам и содержит слова, привлекающие внимание. Также, что очень важно, заголовок сайта отличается от конкурентов. Длина заголовка составляет 48 символов, что является оптимальным значением;

## Секция 8. Проблемы экономики, организации и управление производством 245

– у сайта отсутствует описание страницы для поисковых систем. Мета-описание является обязательным для продвижения сайта, так как оказывает влияние на поведение юзеров;

– присутствуют пустые ссылки на изображения;

– скорость загрузки сайта достаточно высокая, что положительно влияет на его ранжирование в рейтинге поисковой выдачи [1].

Для оценки соответствия веб-сайта ОАО «Гомельстройматериалы» критериям качества была проведена экспертная оценка, результаты которой представлены в таблице.

### Оценка качества и эффективности веб-сайта ОАО «Гомельстройматериалы»

Критерии оценки	N эксперты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	x
Удобство навигации	9	6	9	8	7	7	6	9	10	10	8,1
Визуальная привлекательность	8	8	10	9	9	6	4	9	10	10	8,3
Адаптивность для разных устройств	10	6	9	10	8	8	8	10	10	10	8,9
Поисковая оптимизация (SEO)	7	8	9	6	9	7	6	8	10	10	8
Безопасность	9	7	9	9	8	7	6	9	10	10	8,4
Интерактивность	5	7	8	6	7	7	6	9	10	10	7,5
Средняя оценка	8,0	7,0	9,0	8,0	8,0	7,0	6,0	9,0	10,0	10,0	8,2

Источник. Собственная разработка.

Для того чтобы оценить величину неудовлетворенности спроса, необходимо определить согласованность мнений экспертов:

$$\delta = \sqrt{\frac{15,6}{10}} = 1,25,$$

$$K_v = 8,25 = 0,15.$$

Так как  $0,15 < 0,33$ , то мнение экспертов можно считать согласованным, а сайт качественным.

Для максимизации эффективности сайта ОАО «Гомельстройматериалы» необходимо регулярное улучшение. Вот несколько стратегий, которые могут помочь повысить эффективность сайта ОАО «Гомельстройматериалы»:

– *анализ и оптимизация*. Регулярный анализ поведения пользователей с помощью инструментов, таких как Google Analytics, поможет выявить слабые места;

– *обновление контента*. Постоянное обновление информации, включая новости, проекты и статьи, сделает сайт более актуальным и интересным для посетителей;

– *сбор отзывов*. Размещение положительных отзывов повысит доверие к компании и привлечет новых клиентов;

– *тестирование и обновление дизайна*. Регулярное обновление дизайна и функционала, а также тестирование различных элементов может улучшить пользовательский опыт и повысить конверсию.

В современном цифровом мире сайт строительной организации играет ключевую роль в ее продвижении и успешной деятельности. Он служит не только инструментом для привлечения клиентов, но и важным элементом корпоративного имиджа. Правильное оформление, оптимизация и регулярное обновление сайта могут значительно повысить его эффективность и способствовать успешному продвижению компании на рынке. Вложение времени и ресурсов в создание и поддержку качественного сайта является стратегически важным шагом для любой строительной организации, стремящейся к успеху и росту.

#### Литература

1. SEO-аудитор – сервис для SEO анализа сайта онлайн. – URL: <https://roistat.com> (дата обращения: 08.09.2024).
2. ОАО «Гомельстройматериалы». – URL: <https://oaogsm.by/> (дата обращения: 08.09.2024).
3. Особенности создания сайта для промышленной компании. – URL: <https://garpix.com/blog/osobennosti-sozdaniya-sajta-dlya-promyshlennoj-kompanii> (дата обращения: 08.09.2024).

УДК 004.738.5

### **SEO-ОПТИМИЗАЦИЯ И ЕЕ РОЛЬ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Л. Л. Соловьева, А. В. Рубцова, М. Л. Шевченко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрена роль SEO-оптимизации в привлечении новых клиентов, увеличении продаж, повышении брендовой видимости и создание конкурентного преимущества онлайн-пространстве.*

**Ключевые слова:** сайт, оптимизация, интерфейс, онлайн-пространство, юзабилити.

### **SEO OPTIMIZATION AND ITS ROLE IN THE ACTIVITIES OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE**

**L. L. Solovyova, A. V. Rubtsova, M. L. Shevchenko**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*This article examines the role of SEO optimization in attracting new customers, increasing sales, increasing brand visibility and creating a competitive advantage in the online space.*

**Keywords:** website, optimization, interface, online space, usability.

В современном мире, где информация доступна в огромном количестве, промышленным предприятиям необходимо привлекать внимание потенциальных клиентов и партнеров онлайн. SEO-оптимизация становится неотъемлемой частью маркетинговой стратегии любого бизнеса, в том числе для промышленных предприятий.

SEO (Search Engine Optimization) – это комплекс мер по внутренней и внешней оптимизации, направленный на повышение позиции сайта в результатах выдачи поисковых систем [1]. Проще говоря, SEO помогает делать сайт более видимым для пользователей, ищущих информацию по ключевым словам, связанным с деятельностью предприятия.

Подбор ключевых слов для промышленного сайта начинается с изучения предложений компании и потребностей целевой аудитории. Стоит использовать инстру-

менты для анализа ключевых слов, чтобы найти те запросы, которые чаще всего используются потенциальными клиентами. Учитывать нужно не только высокочастотные запросы, но и более специализированные длинные запросы, которые могут привести целенаправленный трафик на ваш сайт.

Благодаря SEO-оптимизации сайт появляется выше в поиске, что, в свою очередь, привлекает больше потенциальных клиентов и увеличивает трафик на сайт.

SEO-оптимизация очень важна для промышленных предприятий по следующим причинам:

1) SEO-оптимизация помогает привлечь на сайт целевую аудиторию, которая ищет продукцию или услуги предприятия;

2) SEO позволяет повысить трафик на сайт, что может привести к увеличению продаж и доходов;

3) SEO способствует узнаваемости бренда в онлайн-пространстве и укрепляет позитивный имидж предприятия;

4) SEO помогает выделиться на фоне конкурентов и занять ведущие позиции в поисковой выдаче;

5) SEO позволяет создать качественный и информативный контент, который увеличивает доверие к предприятию.

Для достижения максимальной эффективности SEO необходимо проводить комплекс мер: проводить технический аудит сайта, корректировать ошибки, улучшать скорость загрузки, создавать мобильную версию сайта, публиковать качественный и интересный контент (статьи, видеоролики, кейсы), правильно подбирать ключевые слова, размещать ссылки на сайт предприятия на других ресурсах и участвовать в форумах и социальных сетях. Важно отслеживать положение сайта в поисковой выдаче, количество переходов на сайт и другие показатели эффективности.

Правила оптимизации задаются поисковыми системами. Каждая из них использует и регулярно обновляет собственные алгоритмы ранжирования, которые складываются из множества факторов. И, хотя формулы находятся в секрете, специалисты знают, какие факторы имеют наибольший вес. Воздействуя на них, можно улучшить позиции по ключевым запросам в результатах поиска.

Важное значение для результатов продвижения имеет поведение пользователей, удобство интерфейса и скорость загрузки сайта. С развитием и усложнением алгоритмов значение вышеперечисленных факторов неуклонно растет, что в итоге делает поисковую выдачу более качественной. Поисковые системы стремятся выдавать наиболее полезный материал на запрос пользователя. Следовательно, владельцам ресурса необходимо публиковать максимально интересный для его аудитории контент.

Необходимо помнить, что SEO – это не быстрый способ получения результатов. Это долгосрочная стратегия, требующая постоянной работы и вложений.

Эффективность SEO-кампаний можно оценить по ряду показателей: рост органического трафика на сайт; улучшение позиций по целевым ключевым словам в поисковой выдаче; количество лидов или запросов на коммерческие предложения; уровень конверсии; общая видимость бренда в интернете. Для этого используются различные аналитические инструменты типа Google Analytics или сервисов для отслеживания позиций.

SEO-оптимизация делится на внутреннюю и внешнюю [2].

Внутренняя оптимизация – это самая трудоемкая работа, ее необходимо проводить постоянно. Именно внутреннюю оптимизацию следует рассматривать как ключевой фактор успеха вашего проекта. Ее цель – сделать сайт привлекательным как для пользователя, так и для поисковых систем, с учетом того, что в первом случае сайт

## 248 Секция 8. Проблемы экономики, организации и управление производством

оценивают живые люди, а во втором – алгоритмы. Для этого сайт должен быть качественным, быстрым, удобным для пользователей и в полной мере предоставлять ту информацию, за которой они к вам пришли, учитывая требования поисковых систем.

Внешняя оптимизация – это наращивание ссылочной массы, т. е. получение ссылок на свой сайт с других ресурсов. В случае промышленной тематики особое значение приобретает получение качественных упоминаний с авторитетных ресурсов отрасли — это повысит доверие со стороны поисковых систем к вашему сайту. Правильно оформленная ссылка находится на сайте, сходным по тематике с вашим, расположена в тексте или комментариях, ненавязчива и может пригодиться пользователю.

Рассмотрим пример внутренней оптимизации сайтов предприятий кондитерской отрасли: СП ОАО «Спартак» (1), СОАО «Коммунарка» (2), ОАО «Кондитерская фабрика «Слодыч» (3) [3–5]. Для этого проведем анализ User Interface (пользовательского интерфейса) и юзабилити. UI – это внешний вид интерфейса (инструменты, при помощи которых происходит взаимодействие пользователей с контентом и функциональными возможностями сайта). Юзабилити — это показатель того, насколько легко и удобно пользователю взаимодействовать с интерфейсом сайта. Результаты анализа экспертов и потребителей представлены в таблице в виде средних оценок.

### Анализ сайтов предприятий кондитерской отрасли

Показатели	Сайты предприятий		
	(1)	(2)	(3)
User Interface			
Цветовая палитра	8	5	6
Размеры и внешний вид форм и кнопок	7	8	7
Тип и размер шрифта	8	7	8
Взаимное расположение объектов	9	7	9
Среднее по пользовательскому интерфейсу	8	6,75	7,5
Юзабилити			
Простая навигация	10	10	10
Быстрое запоминание	8	7	8
Минимум ошибок	10	10	10
Быстрый результат	9	9	9
Практичность сайта	7	7	9
Эстетичность сайта	10	8	8
Удовлетворенность	9	8	8
Целостность	9	8	9
Среднее по юзабилити	9	8,75	8,9
Сумма по двум направлениям	17	15,5	16,4

По данным оценкам видно, что лидирующим сайтом является [spartak.by](http://spartak.by), что говорит о полной удовлетворительности оформления сайта.

Основные направления SEO-оптимизации для сайтов предприятий:

– СП ОАО «Спартак»: сделать кнопки пропорциональными тексту, проанализировать функции сайта, добавить, например, интернет-магазин для конечных потребителей;

– СОАО «Коммунарка»: пересмотреть цветовую палитру, использовать пастельные тона, увеличить размер шрифта, использовать мнемонические приемы, добавить, например, интернет-магазин для конечных потребителей;

– ОАО «Кондитерская фабрика «Слодыч»»: сменить цветовую палитру в тон основного бренда, увеличить размер шрифта.

На данных сайтах кондитерских фабрик были представлены каталоги со всей продукцией без возможности доставки бытовым потребителям, а лишь закупка поставщиками оптом, поэтому можно было бы предусмотреть хотя бы формирование заказов и самовывоз из фирменных магазинов от определенной суммы.

SEO-оптимизация для промышленного предприятия – это не единовременное мероприятие, а процесс в виде постоянного мониторинга и корректировки стратегии. К тому же оптимизация имеет не всегда быстрые и ощутимые результаты, но она обязательна для привлечения потребителя.

#### Литература

1. SEO-оптимизация. URL: <https://newslab.ru/news/> (дата обращения: 20.09.2024).
2. SEO продвижение сайтов. URL: <https://seo.ru/chto-takoe-seo/>-(<https://seo.ru/chto-takoe-seo/>) (дата обращения: 19.09.2024).
3. Официальный сайт СП ОАО «Спартак». – URL: <https://spartak.by/> (дата обращения: 19.09.2024).
4. Официальный сайт СОАО «Коммунарка». – URL: <https://www.kommunarka.by/> (дата обращения: 19.09.2024).
5. Официальный сайт ОАО «Кондитерская фабрика «Слодыч». – URL: <https://www.slodych.by/> (дата обращения: 19.09.2024).

УДК 331.1

## **ПРОЕКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СИСТЕМЕ ТРУДОВЫХ ОТНОШЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**Н. В. Сычёва, А. В. Сычёв**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Обоснована целесообразность использования проектно-целевого подхода в системе регулирования трудовых отношений сельскохозяйственных организаций, дана оценка условий и возможностей перехода на проектно-целевой метод организации аграрного труда.*

**Ключевые слова:** проект, проектно-целевой подход, проектное управление, организация труда, трудовые отношения, сельское хозяйство.

## **PROJECT MANAGEMENT IN THE SYSTEM OF LABOR RELATIONS OF AGRICULTURAL ORGANIZATIONS**

**N. V. Sychova, A. V. Sychou**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The article substantiates the feasibility of using the project-target approach in the system of regulating labor relations in agricultural organizations, an assessment of the conditions and possibilities of transition to the project-target method of organizing agricultural labor is given.*

**Keywords:** project, project-target approach, project management, labor organization, labor relations, agriculture.

Сложившиеся сегодня негативные тенденции в развитии сельских территорий Республики Беларусь, выраженные депопуляцией, сокращением занятости населения в сельском хозяйстве и интенсивной миграцией в города, представляют угрозу целям устойчивого развития и продовольственной безопасности государства. На уровне субъектов аграрного бизнеса наблюдается высокий уровень текучести и дефицит кадров, что в значительной мере обусловлено выраженным отставанием размера заработной платы в сельском хозяйстве от среднереспубликанского уровня, недостаточно широким применением гибких форм организации и оплаты труда, обеспечивающих прозрачность и высокое качество трудовых отношений, взаимосвязь размера вознаграждения за труд с уровнем профессионализма и трудовой активности работников. Для предотвращения дальнейшего развития вышеперечисленных тенденций и ослабления хронических проблем в социально-экономической сфере сельских территорий Беларуси требуется разработка действенных мер по повышению уровня привлекательности труда в аграрном производстве на основе достойного уровня оплаты труда и возможностей реализации человеческого потенциала, а также наиболее эффективному использованию трудовых ресурсов организаций.

Одним из возможных путей решения данных проблем является использование в сельском хозяйстве инновационных практик управленческой деятельности, в числе которых – проектно-целевой метод управления. Его использование направлено на формирование эффективного механизма организации и мотивации труда, стимулирующего производителей продукции к установлению взаимовыгодных отношений с работниками организаций и их собственниками, согласованию экономических интересов между ними и реализации принципов социального партнерства, объединению усилий для достижения общих целей, предусмотренных проектами, а работников сельскохозяйственных организаций – к росту производительности труда, участию в принятии управленческих решений и повышению уровня профессиональной компетентности.

Наше исследование показало, что к числу важных условий, выполнение которых способствует эффективному применению проектно-целевого метода в системе организации и регулирования трудовых отношений сельскохозяйственных организаций, относятся следующие:

1. Необходимая институциональная среда, что означает возможность использования национальных и/или международных подходов, рекомендаций и стандартов, созданных в результате обобщения практического опыта разработки и реализации проектов в различных сферах деятельности как основы при осуществлении практической проектной деятельности в системе организации сельскохозяйственного производства и труда.

Многолетний опыт и лучшая практика осуществления управления проектами отражена в документах Международной организации по стандартизации (ISO), Института управления проектами (США), национальных органов по стандартизации различных стран [1–3].

В Республике Беларусь 1 августа 2024 г. введен в действие государственный стандарт СТБ ISO 21500-2023 «Менеджмент проектов, программ и портфелей. Контекст и концепции», гармонизированный с соответствующим международным стандартом, и устанавливающий контекст организации, а также основные концепции для осуществления менеджмента проекта, программы и портфеля [4]. Однако он является наиболее общим в семействе стандартов ИСО серии 21500 и не содержит детализованные требования и рекомендации по управлению проектами, а также по всем

важным аспектам проектной деятельности (управление объемом работ, ресурсами, графиком, расходами, рисками и др.).

Несмотря на значительный объем отраслевой нормативной документации в сфере регулирования трудовых отношений в АПК Республики Беларусь, ее содержание основано на традиционных подходах к организации, нормированию и оплате труда в сельском хозяйстве и не может быть использовано для целей проектного менеджмента. Вместе с тем для практической деятельности организаций в области разработки и реализации проектов было бы полезным использование технологий и процедур, установленных международным стандартом ISO 21502:2020 «Project, programme and portfolio management – Guidance on project management», аналогов которому в Беларуси пока нет. Стандарт содержит рекомендации по управлению проектами, он применим к любой организации, включая государственные, частные и благотворительные, а также к любому типу проекта, независимо от цели, подходов к реализации, используемой модели жизненного цикла, сложности, размера, стоимости или продолжительности [1].

**2. Внутриорганизационные условия и возможности, включающие:**

– заинтересованность руководителей и работников организаций в переходе на проектно-целевой метод организации труда. Это выступает ключевым условием предлагаемых нововведений, поскольку основу проектно-целевого подхода к организации труда работников сельского хозяйства составляет сотрудничество основных заинтересованных сторон (стейкхолдеров) аграрного бизнеса – руководителей исполнительных органов власти регионального и районного уровней, работодателей, наемных работников и собственников организаций. Интересы указанных субъектов в условиях осуществления производственно-экономической деятельности характеризуются разнонаправленностью, поэтому при установлении целей проектов и разработке механизмов их реализации необходимо согласование общих и частных целей;

– готовность управленческого персонала к работе в режиме проектного управления, что требует соответствующих профессиональных знаний и навыков, а при их отсутствии – дополнительных усилий руководителей в области организации повышения квалификации потенциальных менеджеров проектов;

– наличие необходимой документации (отраслевых рекомендаций, стандартов организаций), регламентирующей порядок осуществления административных процедур проектного менеджмента и обеспечивающих интеграцию проектно-целевого метода организации труда в действующие системы управления сельскохозяйственными организациями;

– наличие эффективных механизмов преодоления сопротивления со стороны персонала организаций, которое является естественной реакцией на коренную перестройку во взаимоотношениях с работодателями, изменение привычных личностных установок, связанных с трудовой деятельностью и обусловлено известным консерватизмом сельского населения.

Внедрение в практику управленческой деятельности проектно-целевого метода организации труда будет способствовать повышению уровня производительности труда на основе усиления материальной заинтересованности работников в наиболее высокой результативности труда при наименьших используемых ресурсах. Кроме того, это позволит обеспечить выполнение основополагающих научных принципов организации оплаты труда и более эффективно использовать человеческие ресурсы организаций на основе опережающего роста производительности труда по сравнению с ростом его оплаты, установления зависимости заработной платы от конечных результатов производственно-хозяйственной деятельности. В последующем разви-

тие практики проектного управления трудовыми отношениями приведет к повышению уровня эффективности и конкурентоспособности сельскохозяйственного производства, росту престижа аграрной отрасли, сокращению оттока кадров и повышению их закрепляемости в сельской местности, обеспечению сбалансированного развития АПК регионов и устойчивого развития сельских территорий.

#### Литература

1. Project, programme and portfolio management – Guidance on project management: ISO 21502 : 2020 / ISO, 2020. – 57 p. – URL: <https://www.iso.org/standard/74947.html>.
2. The GPM® P5™ Standard for Sustainability in Project Management GPM Global Version 3.0 / GPM Global, 2023. – 102 p. – URL: <https://mosaicprojects.com.au/PDF-Gen/The-GPM-P5-Standard-for-Sustainability-in-Project-Management-v3.0.pdf>.
3. Руководство к своду знаний по управлению проектом / Институт управления проектами, 2017. – 762 с. – URL: <https://biconsult.ru/files/datavault/PMBOK-6th-Edition-Ru.pdf>.
4. Менеджмент проектов, программ и портфелей. Контекст и концепции : СТБ ISO 21500-2023. – Взамен СТБ ISO 21500-2015 ; дата введения 2024-08-01. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2023. – 16 с.

УДК 338.2

### **ПОНЯТИЕ «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ» В ЭКОНОМИКЕ**

**А. А. Зубарь, Е. П. Пономаренко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Проведен критический обзор мнений различных авторов по определению сущности понятия «энергоэффективность», его соотношение с термином «энергосбережение». В результате исследования авторами предложено собственное толкование этого термина и обоснованы показатели, используемые для его оценки.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, энергосбережение, энергоёмкость, топливно-энергетические ресурсы, экономика.

### **THE CONCEPT OF “ENERGY EFFICIENCY” IN ECONOMY**

**A. A. Zubar, E. P. Ponomarenko**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The article provides a critical review of the opinions of various authors on the definition of the essence of the concept of “energy efficiency”, its relationship with the term “energy saving”. As a result of the study, the authors proposed their own interpretation of this term and substantiated the indicators used to evaluate it.*

**Keywords:** energy efficiency, energy saving, energy intensity, fuel and energy resources, economy.

Повышение энергоэффективности во всех сферах экономики является приоритетным направлением в Республике Беларусь. Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов (далее – ТЭР) является необходимым условием устойчивого и инновационного развития страны, повышения уровня конкурентоспособности производимой продукции; одним из главных факторов удовлетворения возрастающих потребностей в топливе и энергии, обеспечения энергетической безопасности, улучшения экологической обстановки. Эффективное использование ТЭР

позволяет сократить денежные затраты государства на закупку энергоносителей; уменьшить зависимость энергоснабжения страны от внешних поставщиков энергоносителей; снизить негативное влияние энергетической отрасли на экологию [1].

Топливо-энергетические ресурсы отнесены к стратегическим видам минерального сырья. Поэтому повышение эффективности их использования входит в число важнейших стратегических направлений технологического развития экономики во всем мире.

Энергетическая потребность экономики Республики Беларусь в топливо-энергетических ресурсах удовлетворяется в большей степени за счет использования органического топлива, которое является импортным. По этой причине повышение эффективности использования ТЭР является для страны важным условием развития экономики, обеспечения энергетической безопасности.

Повышение энергоэффективности приводит к усилению национальной экономики посредством уменьшения импорта ископаемого топлива, одновременно повышается энерговооруженность субъектов хозяйствования, уменьшается безработица и привлекаются инвестиции в энергетику. В то же время неэффективное использование топливо-энергетических ресурсов приводит к значительным потерям в экономике, ухудшает экологическую обстановку на местном, региональном и глобальном уровнях [1].

Проведя обзор научной литературы, можно сделать вывод, что понятие «энергоэффективность» из-за своей однородности часто ассоциируется с понятием «энергосбережение». В соответствии с Законом Республики Беларусь «Об энергосбережении», энергосбережение – организационная, научная, практическая, информационная деятельность государственных органов, юридических и физических лиц, направленная на снижение расхода (потерь) ТЭР в процессе их добычи, переработки, транспортировки, хранения, производства, использования и утилизации.

Если смотреть более широко, то энергоэффективность является неотъемлемой частью энергосбережения. Однако разница в том, что энергосбережение направлено на снижение объема энергопотребления, а энергоэффективность является полезным или другими словами эффективным использованием ТЭР.

Т. Г. Поспелова считает, что «энергоэффективность – характеристика социально-экономической, технической системы, технологического процесса, производственного оборудования, бытовых приборов и т. д., предполагающая максимальное использование ими энергии (способности совершать работу) энергетических ресурсов. Энергоэффективность – результат процесса энергосбережения» [3]. То есть данное определение связано с энергосбережением и энергетическими процессами.

Н. А. Хаустович определяет энергоэффективность как «понятие, которое характеризует степень полезного использования подводимой к той или иной энергоустановке первичной энергии и зависящей от применяемой технологии для производства продукции, выполнения работ и оказания услуг» [4]. Таким образом, автор рассматривает это понятие применительно к промышленной отрасли.

По мнению Т. Х. Гулбрандсена, энергоэффективность – это степень полезного использования подводимой к той или иной энергоустановке первичной энергии и зависящая от применяемой технологии для производства продукции, выполнения работ и оказания услуг [5]. Можно говорить о том, что в этом определении энергоэффективность характеризуется как показатель результативности, степень полезного использования, а не как процесс.

Ряд авторов рассматривают энергетическую эффективность как показатель энергетических результатов, которые появляются при осуществлении измерений в процессе энергетического анализа, внутреннего или внешнего аудита [6].

В международном стандарте ISO 50001 энергетическая эффективность определена как отношение или другая количественная взаимосвязь между результатом деятельности, услуги, продуктами, товарами или энергией, и затраченной исходной энергии [7].

Заслуживает внимания определение энергетической эффективности как характеристик, отражающих 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 [8].

Обобщая вышеизложенное, предлагаем определить понятие «энергоэффективность» как характеристику меры отдачи, полученной от использования ТЭР предприятия и зависящей от уровня развития техники и технологий.

Стоит отметить, что наряду с рассматриваемым термином существует такое понятие, как «показатель энергоэффективности», который обозначает научно обоснованную абсолютную или удельную величину потребления ТЭР (с учетом их нормативных потерь) на производство единицы продукции (работ, услуг) любого назначения, установленную техническими нормативными правовыми актами в области технического нормирования и стандартизации [2].

Для промышленных предприятий в качестве показателя энергоэффективности их функционирования используется показатель удельного расхода энергии на производимую продукцию, или, иначе называемый, показатель энергоемкости. Показатель энергоемкости, используемый для измерения энергоэффективности, может принимать различные формы, в зависимости от того, по какому виду энергоносителей выполняется расчет.

В экономической литературе различают следующие показатели энергоемкости:

1. Электроемкость продукции, определяемая отношением величины потребляемой электроэнергии ( $\mathcal{E}$ ) к размеру выпуска продукции ( $\Pi$ ) [формула (1)] [5]:

$$\mathcal{E}_y = \frac{\mathcal{E}}{\Pi}. \quad (1)$$

2. Теплоемкость продукции, определяемая отношением величины потребляемой тепловой энергии ( $Q$ ) к размеру выпуска продукции ( $\Pi$ ) [формула (2)] [5]:

$$Q_y = \frac{Q}{\Pi} \quad (2)$$

3. Топливоемкость продукции, определяемая отношением величины потребляемого топлива ( $B$ ) к размеру выпуска продукции ( $\Pi$ ) [формула (3)] [5]:

$$BY = \frac{B}{\Pi}. \quad (3)$$

Топливоемкость может дифференцироваться по видам топлива (природный газ, жидкое топливо, уголь), а тепловая энергия может дифференцироваться по видам тепла (пар, горячая вода).

Таким образом, проведенный обзор нормативных правовых актов, учебной и научной литературы по рассматриваемой проблеме показал, что не существует единого подхода к определению сущности понятия «энергоэффективность». Обобщая точки зрения различных авторов, мы предлагаем определить исследуемое понятие следующим образом: энергоэффективность – характеристика меры отдачи, полученной от использования ТЭР предприятия и зависящей от уровня развития техники и технологий. Следуя логике

этого определения в качестве показателя энергоэффективности функционирования организации, целесообразно использовать показатель энергоёмкости.

**Л и т е р а т у р а**

1. Цилибина, В. М. Энергоэффективность экономики: методология и практика / В. М. Цилибина ; Ин-т экономики НАН Беларуси. – Минск : Беларус. навука, 2021. – 215 с.
2. Об энергосбережении : Закон Респ. Беларусь от 15 июля 1998 г. № 190-3 : с изм. и доп. от 5 янв. 2008 г. № 317-3 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь, 2008. – № 14.
3. Пospelова, Т. Г. Основы энергосбережения / Т. Г. Пospelова. – Минск : Технопринт, 2000. – 353 с.
4. Хаустович, Н. А. Энергоэффективность как важное условие устойчивого развития экономики страны / Н. А. Хаустович // Белорусский экономический журнал. – 2006. – № 3. – С. 15–23.
5. Энергоэффективность и энергетический менеджмент / Т. Х. Гулбрандсен, Л. П. Падалко Падалко, В. Л. Червинский. – Минск : БГАТУ, 2010. – 237 с.
6. Аверина, О. И. Критерии оценки энергетической эффективности / О. И. Аверина, Е. Г. Москалева, Т. С. Морозкана // Молодой ученый. – 2014. – № 8. – С. 427–429.
7. ISO 50001, Системы энергетического менеджмента – Требования и руководство по применению.
8. Энергосбережение и энергетическая эффективность : учеб. пособие / Г. В. Панкина [и др.] ; под ред. Г. В. Панкиной. – Москва : АСМС, 2010. – 152 с.

УДК 338.48-6:502/504

**АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА  
ЧЕРЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНА**

**О. В. Лапицкая, А. В. Черленок**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Экологический туризм – это вид туризма, который основан на использовании природных ресурсов для отдыха и познания окружающей среды. Гомельская область имеет большое значение для сохранения биологического разнообразия и поддержания экологического равновесия. Регион активно развивается в сфере экологического туризма, предлагая посетителям возможность насладиться красотами природы и узнать больше о местной флоре и фауне.*

**Ключевые слова:** экология, туризм, потенциал, развитие, анализ.

**ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF ECOLOGICAL  
TOURISM THROUGH THE USE OF THE ECOLOGICAL POTENTIAL  
OF THE REGION**

**O. V. Lapitskaya, A. V. Cherlenok**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus*

*Ecotourism is a type of tourism that is based on the use of natural resources for recreation and the knowledge of the environment. Gomel region is of great importance for the preservation of biological diversity and the maintenance of ecological balance. The region is actively developing in the field of ecotourism, offering visitors the opportunity to enjoy the beauty of nature and learn more about the local flora and fauna.*

**Keywords:** ecology, tourism, potential, development, analysis.

Туризм, являясь одной из перспективных отраслей экономики, в контексте устойчивого развития страны может способствовать рациональному решению соци-

ально-экономических задач, стоящих перед государством, выступать фактором оздоровления экономики страны и ее регионов [1].

Развитие экологического туризма преследует две основные цели: защита окружающей среды и экономическое развитие.

Первая цель заключается в защите и сохранении естественных экосистем. Экологический туризм способствует увеличению осведомленности общественности о ценности природы и необходимости ее защиты. Туристы могут участвовать в различных мероприятиях, направленных на охрану окружающей среды, таких как очистка пляжей, сбор мусора, восстановление лесных участков и т. д.

Вторая цель связана с экономическим развитием региона. Экотуризм может стать важным источником дохода для местного населения. Это стимулирует развитие малого бизнеса, создает рабочие места и способствует развитию инфраструктуры. Также экотуризм помогает уменьшить зависимость экономики от традиционных отраслей промышленности, таких как добыча полезных ископаемых или сельское хозяйство, которые часто оказываются вредными для окружающей среды.

Гомельская область является одним из самых экологически чистых регионов Беларуси благодаря своим уникальным природным условиям. Здесь расположены большие площади лесов, множество водоемов, болот и заповедных зон.

В контексте анализа развития экологического туризма через использование экологического потенциала региона необходимо рассмотреть несколько ключевых аспектов:

– *Природный потенциал Гомельской области составляют леса и водоемы.* Леса покрывают значительную часть территории Гомельской области. Они служат не только для защиты экологии, но и являются ценным ресурсом для деревообрабатывающей промышленности. Также в Гомельской области находятся реки Днепр и Сож, множество озер и болот. Эти водоемы играют важную роль в поддержании биоразнообразия и гидрологического режима региона.

Одним из наиболее известных заповедников в Гомельской области является «Припятский национальный парк». Он был создан в 1996 г. и занимает площадь около 87 тыс. гектаров. Парк включает в себя разнообразные ландшафты: пойменные леса, болота, озера и реки. Здесь обитают многие редкие виды животных и растений, такие как беловежский зубр, орлан-белохвост и большой подорлик.

Также стоит отметить болото Ельня, которое находится в северо-восточной части области. Это одно из крупнейших болот в Европе и важная часть европейской сети биосферных резерватов ЮНЕСКО. Болото служит местом обитания многих видов животных и птиц, а также играет ключевую роль в регулировании климата и сохранении воды:

– *транспортная инфраструктура:* в регионе хорошо развита сеть автомобильных и железных дорог, что облегчает передвижение туристов. Гостиницы и кемпинги: предоставлены различные варианты размещения, включая гостиницы, хостелы и кемпинговые площадки;

– *доходы от туристической деятельности:* экологический туризм приносит доход в региональный бюджет, способствуя развитию экономики региона. Занятость населения: создание рабочих мест в сфере туризма способствует снижению уровня безработицы и повышению благосостояния местных жителей;

– *активное участие местных жителей в развитии туристической индустрии* способствует интеграции культуры и традиций региона в туристические продукты. Улучшаются условия жизни местных жителей благодаря созданию новых рабочих мест и поступлениям доходов от туризма;

– *эффективное управление природными ресурсами* обеспечивается путем внедрения современных технологий и методов управления, что способствует сохранению биоразнообразия и природных богатств региона;

– *планы и стратегии:* разрабатываются для дальнейшего развития экологиче-

ского туризма, направленные на увеличение потока туристов и улучшение качества услуг. Привлечение инвестиций: привлечение инвестиций в регион способствует созданию новых маршрутов, строительству инфраструктуры и развитию туристических услуг [2].

Факторы, которые могут негативно повлиять на развитие экотуризма и экологический потенциал Гомельской области, включают:

1. *Загрязнение окружающей среды*: промышленные выбросы, загрязнение вод и почвы могут ухудшить качество природных ресурсов и сделать их непригодными для экотуризма.

2. *Неправильное управление ресурсами*: недостаточно эффективное управление природными ресурсами может привести к их истощению и разрушению экосистем, что негативно скажется на возможностях экотуризма.

3. *Конфликты интересов*: возможные конфликты между интересами экотуризма и другими видами использования природных ресурсов, такими как сельскохозяйственная деятельность или лесопользование.

4. *Финансовые ограничения*: недостаток финансирования для охраны и восстановления природных территорий может затруднить развитие экотуризма.

5. *Изменение климата*: глобальные изменения климата могут привести к сокращению биологического разнообразия, изменению природных условий и снижению привлекательности некоторых природных объектов для экотуристов [3].

Экологический туризм предоставляет уникальную возможность для путешественников получить новый опыт и узнать больше о природе и культуре региона. Он позволяет людям взаимодействовать с природой, узнавать о местных традициях и культурах, что способствует укреплению связей между людьми и различными сообществами [2].

#### Литература

1. Александрович, Я. М. Стратегические цели и направления устойчивого развития Республики Беларусь / Я. М. Александрович // Белорусский экономический журнал. – 2002. – № 11-3. – С. 168–167.
2. Belarus.by. – URL: <https://www.belarus.by/ru/travel/ecotourism-in-belarus> (дата обращения: 21.09.2024).
3. Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию каф. общего землеведения и гидрометеорологии Белорус. гос. ун-та, Минск, 11–13 окт. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: П. С. Лопух (гл. ред.), Ю. А. Гледко, Е. В. Логинова. – Минск : БГУ, 2023. – С. 183–191.

УДК 658.14:005.915

## **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ФИНАНСОВОГО СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ**

**Е. П. Пономаренко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Проведен критический обзор действующих нормативных правовых актов, регулирующих вопросы оценки финансового состояния организации, обозначены существующие проблемы в части выбора оценочных показателей и получения итоговой оценки финансового состояния и намечены пути их решения.*

**Ключевые слова:** ликвидность, платежеспособность, прибыльность, финансовое состояние, финансовая устойчивость.

## CURRENT ISSUES OF ASSESSING THE FINANCIAL CONDITION OF THE ORGANIZATION

E. P. Ponomarenko

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The article provides a critical review of current regulatory legal acts governing issues of assessing the financial condition of an organization, identifies existing problems in terms of choosing evaluation indicators and obtaining a final assessment of the financial condition, and outlines ways to solve them.*

**Keywords:** liquidity, solvency, profitability, financial condition, financial stability.

В современных динамично изменяющихся условиях хозяйствования одним из условий обеспечения платежеспособности организации и минимизации риска банкротства является наличие эффективной системы управления финансовым состоянием. Основой построения такой системы должна быть своевременная поддержка процесса принятия решений информацией о состоянии и изменении объекта управления. Ключевой характеристикой этой информации выступает ее содержательность, т. е. достаточность для понимания сложившейся ситуации, которая достигается за счет правильного выбора показателей оценки.

На протяжении длительного периода времени (с 2011 по 2023 г.) при оценке финансового состояния организации Республики Беларусь руководствовались перечнем показателей, утвержденных Инструкцией о порядке расчета коэффициентов платежеспособности и проведения анализа финансового состояния и платежеспособности субъектов хозяйствования (далее – Инструкция) [1], разработанной в рамках пакета нормативных правовых актов, регулирующих вопросы экономической несостоятельности (банкротства).

В 2021 г. в целях обеспечения единого для всех коммерческих организаций подхода к анализу их финансового состояния Министерством финансов Республики Беларусь были утверждены Методические рекомендации по проведению комплексной системной оценки финансового состояния организации (далее – Методические рекомендации) [2]. В отличие от принятой ранее Инструкции, они ориентированы на предоставление информации о финансовом состоянии организации внутренним пользователям, так как полученные в соответствии с ними результаты анализа организаций рекомендовано использовать как основу для подготовки мероприятий по улучшению их финансового состояния.

Изучение положений данного нормативного правового акта позволило установить, что в нем имеется ряд спорных моментов, влияющих на интерпретацию полученных результатов анализа и эффективность принимаемых решений. Более того, представленный в Методических рекомендациях подход к определению степени риска неисполнения обязательств (неплатежеспособности) не согласуется с действующей методикой оценки степени риска наступления банкротства, утвержденной постановлением Министерства экономики Республики Беларусь и Министерства финансов Республики Беларусь «Об оценке степени риска наступления банкротства» [3]. Это свидетельствует об актуальности исследования вопросов анализа финансового состояния организации и уточнения системы показателей, используемых для его комплексной оценки.

Следует обратить внимание на то, что в действующих Методических рекомендациях показатели, по которым проводится оценка финансового состояния, сведены к трем группам: показатели ликвидности, финансовой устойчивости и прибыльности. Однако не все показатели, включаемые в ту или иную группу, позволяют в пол-

ной мере охарактеризовать ту сторону финансового состояния организации, которую они представляют. Так, из контекста нормативного правового акта следует, что показатели ликвидности характеризуют способность организации исполнять краткосрочные обязательства. При этом в перечень таких показателей, наряду с текущей и быстрой ликвидностью, включены свободный денежный поток и финансовый цикл. Мы полагаем, что возможность погашения долгов может быть оценена только на основе соотношения активов как источника поступления платежных средств с обязательствами. Величина свободного денежного потока и длительность финансового цикла выступают в качестве факторов, влияющих на способность организации рассчитываться по обязательствам, но не отражают ее.

Представленные в Методических рекомендациях показатели финансовой устойчивости, по мнению их разработчиков, характеризуют долговую нагрузку организации. Включенные в эту группу коэффициент покрытия процентных выплат и коэффициент отношения процентных выплат к прибыли до налогообложения, начисления процентов и амортизации являются частными и учитывают не все долговые обязательства организации. Так, последний коэффициент показывает, за сколько лет организация способна погасить свои обязательства по кредитам, займам и лизинговым платежам. По нашему мнению, показатели этой группы должны быть ориентированы на оценку уровня совокупной долговой нагрузки и рассчитываться путем соотношения всех долговых обязательств с активами или доходами, потенциально обеспеченными притоком денежных средств (выручка от реализации запасов, долгосрочных активов, доходы от участия в уставных капиталах других организаций и т. д.). Это обусловлено тем, что финансовая устойчивость определяется способностью организации отвечать по всем своим долгам без исключения.

Третья группа показателей, рекомендованных для оценки финансового состояния, ориентирована на характеристику способности организации получать прибыль. Полагаем, что включенный в нее показатель «точка безубыточности» может рассматриваться только как вспомогательный показатель, необходимый для расчета запаса финансовой прочности, так как он отражает пороговое значение выручки от реализации, достижение которого обеспечивает нулевой финансовый результат.

Вывод о финансовом состоянии организации, согласно Методическим рекомендациям, формируется по результатам сопоставления фактических значений трех групп показателей с ориентировочными и изучения их динамики. Здесь кроется еще одна проблема: ориентировочные значения показателей дифференцированы с учетом отражаемой ими степени риска неисполнения обязательств (очень низкий, низкий, средний, высокий, критический риск) и не дают оценку финансового состояния организации (например, устойчивое, неустойчивое, кризисное). Логично предположить, что низкому риску неисполнения обязательств соответствует высокий уровень финансовой устойчивости, однако по ряду показателей вместо ориентировочных значений указано требуемое направление их изменения (положительный прирост, сокращение). Это затрудняет идентификацию финансового состояния организации. Более того, значения разных показателей могут соответствовать различным степеням риска, поэтому возникает вопрос: как получить итоговую оценку финансового состояния организации.

Полагаем, что наиболее удобным с точки зрения визуализации и подведения результатов оценки финансового состояния организации является системный подход, основанный на анализе достижения ориентировочных значений показателей по каждой группе (ликвидность, финансовая устойчивость, прибыльность). В соответствии с ним для комплексной оценки финансового состояния необходимо определить интегральные показатели по отдельным группам и на их основе рассчитать интегральный показатель, который

будет отражать финансовое состояние организации в целом, по формуле (1):

$$\text{ИП} = \frac{(\text{ИП}_{\text{ЛИКВ}} + \text{ИП}_{\text{ФИН.УСТ}} + \text{ИП}_{\text{ПРИБ}})}{3}, \quad (1)$$

где ИП – интегральный показатель финансового состояния; ИП<sub>ЛИКВ</sub> – интегральный показатель по группе «Ликвидность»; ИП<sub>ФИН.УСТ</sub> – интегральный показатель по группе «Финансовая устойчивость»; ИП<sub>ПРИБ</sub> – интегральный показатель по группе «Прибыльность».

Полученный интегральный показатель следует сопоставить со шкалой градации, в которой степень устойчивости финансового состояния определяется значением от 1 (кризисное финансовое состояние) до 3 (устойчивое финансовое состояние).

Для расчета интегральных показателей по каждой группе сначала экспертным путем определяются весовые коэффициенты, отражающие значимость каждого из показателей группы. Далее экспертом дается оценка соответствия фактических значений показателей ориентировочным с использованием следующей системы баллов: 1 балл – не соответствует, 2 балла – близко к ориентировочному, 3 балла – соответствует ориентировочному. Выставленный по каждому показателю балл умножается на его весовой коэффициент и полученные значения в баллах суммируются по группам.

Таким образом, для качественной оценки финансового состояния организаций требуется уточнение перечней показателей по группам, установление по каждому из них ориентировочных значений, а также расчет интегральных показателей, отражающих степень достижения этих значений и, как итог, степень устойчивости финансового состояния.

#### Литература

1. Инструкция о порядке расчета коэффициентов платежеспособности и проведения анализа финансового состояния и платежеспособности субъектов хозяйствования : утв. постановлением М-ва финансов Респ. Беларусь и Мин-ва экономики Респ. Беларусь от 27 дек. 2011 г. № 140/206 // М-во экономики Респ. Беларусь. – 2024. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/sanacija-i-bankrotstvo/Post-MF-ME-27-12-2011-N140-206.pdf> (дата обращения: 20.09.2024).
2. Методические рекомендации по проведению комплексной системной оценки финансового состояния организации : утв. приказом М-ва финансов Респ. Беларусь от 14 окт. 2021 г. № 351 // Нормативка.by. – 2024. – URL: <https://normativka.by/lib/document/99293/rev/2024080199#serialnumber=12> (дата обращения: 20.09.2024).
3. Об оценке степени риска наступления банкротства : постановление М-ва экономики Респ. Беларусь и М-ва финансов Респ. Беларусь от 7 авг. 2023 г. № 16/46 // Pravo.by. – 2024. – URL: <https://pravo.by/-document/?guid=12551&p0=W22340308> (дата обращения: 20.09.2024).

УДК 331.101.6

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИИ**

**А. В. Медведева, И. В. Ермонина**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Проведен анализ производительности труда на ОАО «Речицкий метизный завод» и разработано мероприятие по совмещению профессий, направленное на рост этого показателя.*

**Ключевые слова:** производительность труда, трудоемкость, управление, трудовые ресурсы, анализ эффективности использования.

## **IMPROVING PRODUCTIVITY MANAGEMENT AT THE ENTERPRISE**

**A. V. Medvedeva, I. V. Ermonina**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The paper analyzes labor productivity at the Rechitsa Metallurgical Plant and develops a measure to combine professions aimed at increasing this indicator.*

**Keywords:** labor productivity, labor intensity, management, labor resources, analysis of the efficiency of use.

Производительность труда – это показатель эффективности трудового процесса, выражаемый отношением результатов производства к соответствующим затратам непосредственного, живого труда. Производительность труда является важнейшим показателем экономического роста [1–5].

Особое значение темпов роста производительности труда в настоящее время обусловлено тем, что возможности развития отраслей материального производства за счет увеличения численности работающих уже исчерпаны. Актуальность темы определяется необходимостью роста производительности труда на конкретном предприятии – ОАО «Речицкий метизный завод» (ОАО «РМЗ»).

Предметом деятельности предприятия ОАО «РМЗ» является производство метизной продукции, проволоки, оказания услуг по переработке давальческого сырья, услуг населению. На сегодняшний день ОАО «Речицкий метизный завод» – это крупнейшее предприятие по производству гвоздей в Республике Беларусь, один из лидеров стран СНГ по ассортименту специальных гвоздей, а также единственное предприятие в Республике Беларусь, где в автоматическом режиме производится горячее оцинкование труб.

Анализ отчетных показателей завода показал, что в период с 2019 по 2021 г. наблюдается рост выработки и к 2021 г. этот показатель составил 155,70 тыс. руб., по добавленной стоимости этот показатель увеличился на 14,58 % и составил 45,41 тыс. руб. Наблюдается сокращение трудоемкости на 5,98 часов, что носит положительный характер. Предприятие ОАО «РМЗ» имеет достаточно стабильный кадровый состав и высокий уровень удовлетворенности условий труда для работников.

Анализ соотношения темпов роста производительности труда и среднемесячной заработной платы ОАО «РМЗ» приведен в табл. 1.

*Таблица 1*

### **Соотношение темпов роста производительности труда и средней заработной платы ОАО «РМЗ» за 2019–2021 гг.**

Показатели	Значение показателя			Темп роста, %	
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2020/ 2019 гг.	2021/ 2020 гг.
1. Среднегодовая выработка работника по добавленной стоимости, тыс. руб.	25,32	29,01	45,41	114,58	156,54
2. Фонд заработной платы работников списочного состава, тыс. руб.	25012	29725	43934,9	118,84	147,80

Показатели	Значение показателя			Темп роста, %	
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2020/ 2019 гг.	2021/ 2020 гг.
3. Среднесписочная численность работников, человек	1903	1935	1992	101,08	102,95
4. Среднегодовая заработная плата одного работника, тыс. руб.	13,14	15,36	22,06	116,88	143,58
5. Коэффициент опережения (темпы роста по стр. 1/стр. 4)	–	0,98	1,09	–	–
6. Экономия (–) или перерасход (+) фонда заработной платы, тыс. руб.	–	584,94	–3965,71	–	–

Исходя из табл. 1 видно, что коэффициент опережения в 2020 г. равен 0,98, что говорит о том, что темпы роста оплаты труда опережают темпы роста производительности труда на 2 %.

К 2021 г. данный показатель вырос до 1,09, что говорит об обратном отношении оплаты труда и производительности труда. Таким образом, темпы роста производительности труда опережают темпы роста оплаты труда на 9 %. В 2020 г. наблюдается экономия в размере 58,94 тыс. руб., но к 2021 г. наблюдается перерасход заработной платы в размере 3965,71 тыс. руб. Все это свидетельствует о необходимости роста производительности труда на заводе.

На предприятии ОАО «РМЗ» водитель погрузчика 3-го разряда выходит на пенсию, соответственно, перед руководством предприятия становится задача найти замену сотруднику. В ходе предлагаемого мероприятия предлагается совместить две профессии: кладовщик и водитель погрузчика. Кладовщик-водитель погрузчика – это специалист, который управляет погрузчиком и всеми механизмами, приспособленными для погрузочно-разгрузочных и грузозахватных работ, обеспечивающий контроль качества продукции. Для того чтобы получить двойную профессию, кладовщику необходимо пройти профессиональное обучение профессии «водитель погрузчика 3 разряда», стоимость которого составит 186 руб. При обучении сотрудник сможет:

- управлять автопогрузчиком грузоподъемностью до 1,5 т, аккумуляторными погрузчиками и всеми специальными грузозахватными механизмами и приспособлениями при выполнении погрузо-разгрузочных работ;

- производить ремонт и техническое обслуживание погрузчика и всех его механизмов;

- выполнять мероприятия по планово-предупредительному ремонту техники.

Средняя заработная плата ушедшего на пенсию работника равна 1838 руб., из которых 30 % идет на доплату сотруднику за совмещение профессий кладовщика и водителя погрузчика, равная 485,39 руб. в месяц. Годовой фонд заработной платы ушедшего работника равен 29687,38 руб., из которых без учета отчислений годовая доплата составит 5824,66, за счет чего начисленная заработная плата за год составит 27880,66 руб.

Исходя из полученных данных, составим сравнительную характеристику, представленную в табл. 2.

**Сравнительная характеристика до и после мероприятия по совмещению профессий**

Показатель	До мероприятия	После мероприятия	Абсолютное изменение
Количество работников на складе, человек	5	4	-1
Средняя заработная плата кладовщика-водителя, руб.	1838,00	2323,39	485,39
Годовая экономия фонда заработной платы, руб.	–	1806,72	1806,72
Затраты на обучение водителя погрузчика 3-го разряда	–	1860,00	186,00
Годовая выработка, тыс. руб.	155,70	155,80	0,10

Таким образом, при внедрении системы совмещения профессий кладовщика и водителя погрузчика на ОАО «РМЗ» средняя заработная плата вырастет на 485,39 руб., за счет чего кладовщик-водитель погрузчика сможет получать 2323,39 руб. При этом годовая экономия фонда заработной платы составит 1806,72 руб. Прослеживается увеличение годовой выработки на 0,1 тыс. руб.

**Литература**

1. Алексеева, А. И. Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности / А. И. Алексеева. – Москва : Финансы и статистика, 2020. – 526 с.
2. Кибанов, А. Я. Управление персоналом: регламентация труда : учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / А. Я. Кибанов, Г. А. Мамед-Заде, Т. А. Родкина. – Москва : Экзамен, 2013. – 432 с.
3. Савицкая, Г. В. Анализ хозяйственной деятельности / Г. В. Савицкая. – Минск : РИПО, 2024. – 374 с.
4. Синк, Д. С. Управление производительностью: планирование, измерение и оценка, контроль и повышение : пер. с англ. / Д. С. Синк. – Москва : Прогресс, 2010. – 528 с.
5. Экономика и рынок труда : учеб. пособие / А. С. Головачев, Н. С. Березина, Н. Ч. Бокун, Л. И. Леутина ; под общ. ред. А. С. Головачева. – Минск : Выш. шк., 1994. – 245 с.

УДК 630\*907.9

**ОБ ЭФФЕКТИВНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТУРИСТИЧЕСКОГО  
ПОТЕНЦИАЛА ЛЕСНОГО ФОНДА ДЛЯ РАЗВИТИЯ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА**

**И. В. Ермонина**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*На примере лесхозов Могилевской области рассмотрен туристический потенциал лесного фонда, выбраны критерии оценки эффективности его использования и предложены перспективные направления развития экологического туризма в лесном хозяйстве.*

**Ключевые слова:** лесное хозяйство, лесхоз, лесной фонд, экологический туризм, туристический потенциал, оценка эффективности использования.

**ON THE EFFECTIVE USE OF THE TOURISM POTENTIAL  
OF THE FOREST FUND FOR THE DEVELOPMENT  
OF ECOLOGICAL TOURISM**

**I. V. Ermonina**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Using the example of forestry enterprises of the Mogilev region, the tourism potential of the forest fund is considered, criteria for assessing the effectiveness of its use are selected, and promising areas for the development of ecological tourism in forestry are proposed.*

**Keywords:** forestry, forestry enterprise, forest fund, ecotourism, tourism potential, assessment of the efficiency of use.

За последнее десятилетие многие зарубежные издания, посвященные туризму, не обходятся без упоминания экологического туризма. Отличие туризма экологического – в приоритетах туристов, которые стремятся в первую очередь к общению с природой, познанию ее объектов и явлений, активному отдыху на природе. Традиционные развлечения и бытовой комфорт отходят на второй план. Это делает охрану природы экономически выгодной. Развитие экотуризма основывается на стремлении свести к минимуму изменение окружающей среды. Из-за меньшего объема необходимой туристской инфраструктуры (отелей, ресторанов и других увеселительных заведений), из расчета на одного туриста и на каждый доллар прибыли, данный вид туризма характеризуется меньшей ресурсоемкостью.

Выделяется пять критериев, которым должен соответствовать экологический туризм. Экологический туризм должен быть: 1) обращенным к природе и основанным на использовании преимущественно природных ресурсов; 2) не наносящим ущерба или минимизирующим ущерб среде нашего обитания, т. е. экологически устойчивым; 3) нацеленным на экологическое образование и просвещение, на формирование отношений равноправного партнерства с природой; 4) заботящимся о сохранении местной социокультурной сферы; 5) экономически эффективным и обеспечивающим устойчивое развитие тех районов, где он осуществляется.

Потенциал белорусского экологического туризма значителен. Ряд предприятий страны приобрели определенный опыт по развитию экологического туризма. Достаточно сослаться на большой опыт туристских предприятий Управления делами Президента Республики Беларусь, которые строят свою работу на базе Национальных парков и заповедников. Имеется положительный опыт Бобруйского и Молодеченского городских туристских клубов; туристских клубов, созданных ОАО «АСБ Беларусбанк», которые ежегодно проводят туристские слеты на уровне городских и районных (сельских) команд. В развитии экологического туризма в Беларуси заинтересованы практически все участники туристского рынка.

Новым направлением в развитии экологического туризма является использование природных и историко-культурных достопримечательностей на территории лесного фонда лесхозов, охотничьих комплексов и домов охотника для привлечения экотуристов. Нужно отметить, что лесной фонд Республики Беларусь очень богат на различные объекты туристического показа и их использование при проведении экскурсий по туристическим маршрутам, при организации комплексных туров позволит принести дополнительный доход как лесхозам, так и районам республики. Предварительно необходимо разработать методологические подходы к оценке туристического потенциала лесного фонда, выявить объекты туристического показа в лесном фонде, провести их социально-эколого-экономическую оценку, разработать крите-

рии оценки эффективности использования лесного фонда для развития экологического туризма, предложить перспективные направления развития экологического туризма в лесном хозяйстве.

Для разработки методических подходов к оценке туристического потенциала лесного фонда проанализировано большое количество литературных источников, документов, позволяющих изучить опыт оценки таких объектов, как в странах СНГ, так и за рубежом. При оценке туристических объектов природного наследия использовались разработанные нормативы комплексной продуктивности земель лесного фонда [1].

Социально-эколого-экономическая оценка туристического потенциала лесного фонда лесхозов осуществлялась на основании предложенных 12 критериев оценки объектов природного и историко-культурного наследия в лесном фонде (качественное значение, содержание, функциональное назначение, познавательная ценность, известность; специфичность, необычность; выразительность, сохранность, надежность, местонахождение, временное ограничение показа, направленность на тип экскурсантов). В основу оценки был положен метод балльной оценки. Низшая оценка объекта экотуризма по критерию – 1 балл, высшая – 5 баллов [2].

На основании выбранных критериев оценки объектов природного и историко-культурного наследия в лесном фонде и метода балльной оценки проведена комплексная оценка туристического потенциала лесного фонда Бельничского (8 объектов, средний оценочный балл – 41), Могилевского (12 объектов, средний оценочный балл – 42), Бобруйского (8 объектов, средний оценочный балл – 44), Осиповичского (10 объектов, средний оценочный балл – 38) лесхозов Могилевской области.

Экономическая эффективность в туризме – это деятельность по производству турпродукта, итогом которой является получение определенной выгоды в денежном эквиваленте с учетом издержек на производство и продвижение товара. Экономическая эффективность определяется экономическими критериями и показателями. Общим критерием эффективности понимается максимальный уровень дохода при незначительных издержках. Частные критерии эффективности подразумевают вовлечение рабочих ресурсов, материально-технической базы, уровня прибыли (рентабельность производства и продукции).

Для оценки эффективности развития туристско-рекреационного хозяйства в регионе российские ученые Р. Г. Сафиуллин и Д. С. Чернуха [3] предлагают следующие показатели:

- въездной туристический поток (человек);
- совокупный доход от туризма и рекреации в регионе (рубли, доллары);
- доля вида экономической деятельности «Рекреация и туризм» в ВРП региона (%);
- объем туристских и рекреационных услуг населению (рубли, доллары);
- уровень развития туристско-рекреационной инфраструктуры региона (индексная оценка).

Индекс уровня развития туристско-рекреационного хозяйства территории рассчитывается по формуле

$$Y = \frac{D}{\sqrt[3]{SHK}},$$

где  $Y$  – индекс уровня развития туристско-рекреационного хозяйства территории;  $D$  – годовой доход туристско-рекреационного хозяйства территории (млн руб. или млн долл.);  $S$  – площадь туристско-рекреационной территории характеризует обеспеченность территории рекреационными объектами, достопримечательностями, инженерной инфраструктурой (тыс. кв<sup>2</sup>);  $H$  – численность населения территории (тыс.

человек).  $K$  – отечественные и иностранные инвестиции в туристско-рекреационное хозяйство территории (млн руб. или млн долл.).

Данный индекс позволяет проводить группировку, классификацию и типологию регионов страны по уровню развития туристско-рекреационного хозяйства.

Для оценки эффективности туристско-рекреационного потенциала территорий Е. И. Богдановым [4] предложена методика, в основу которой вошли показатели: суммарный объем ресурсов туристского потенциала, величина туристского потенциала и показатель реализации туристского потенциала. Суммарный объем ресурсов туристского потенциала территорий характеризует максимально-возможный объем туристских ресурсов, которыми располагает территория на данный момент времени, выраженный в едином измерении. Здесь появляются показатели количества и продуктивности туристских ресурсов. Величина туристского потенциала представляет собой максимально возможный объем производства и реализации туристских услуг при данном количестве и качестве имеющихся туристских ресурсов в условиях, обеспечивающих наиболее полное их использование. Данный показатель характеризует максимально возможную отдачу туристского потенциала. Показатель реализации туристского потенциала отражает достигнутый уровень его использования и характеризует фактическую отдачу туристских ресурсов.

В качестве критерия эффективности использования туристского потенциала территории ( $K_s$ ) принимается отношение эффекта от реализации территориального туристического потенциала ( $\mathcal{E}_n$ ) к затратам ( $Z_n$ ), потребовавшимся для достижения ( $\mathcal{E}_n$ ).

Вышеуказанные методики, критерии и показатели оценки уровня развития и эффективности использования туристского потенциала территории применимы и для оценки эффективности использования туристического потенциала лесного фонда лесхозов.

В качестве перспективных направлений развития экологического туризма в лесном хозяйстве предлагается:

- проведение экскурсий и туров с кино- и фотоохотой на животных;
- проведение экскурсий по местам произрастания дикорастущих ягод, грибов и лекарственных растений;
- проведение экскурсий с целью использования рекреационного потенциала лесов для оздоровления и лечения туристов;
- создание учебных экологических троп для учащейся и студенческой молодежи;
- организация летних палаточных туристических лагерей для учащихся;
- проведение праздников на базе охотничьих комплексов и домов охотника;
- организация в лесхозах дендропарков, музеев природы, вольеров с дикими животными;
- проведение экскурсий по водно-болотным угодьям;
- организация рыболовных туров;
- организация маршрутов, туров выходного дня;
- проведение пеших, водных, велосипедных, конных, лыжных экскурсий по экологическим маршрутам;
- организация туристических походов;
- использование охотничьих комплексов для проведения подготовки спортсменов перед соревнованиями и их реабилитации;
- организация зон отдыха возле водоемов, вдоль автомобильных дорог, туристических стоянок;
- организация проката туристического инвентаря.

Ожидается, что экономический эффект от предложенных направлений развития экологического туризма в лесном хозяйстве будет заключаться в повышении до

50 % уровня доходов лесохозяйственных учреждений от оказания туристических услуг, за счет использования объектов природного и историко-культурного наследия, находящихся в лесном фонде и на прилегающей к нему территории в существующих и новых туристических маршрутах (турах). При этом в оценке стоимости экскурсионных услуг, оказываемых на туристических маршрутах, будут использованы результаты социально-эколого-экономической оценки туристического потенциала лесного фонда лесхозов, позволяющие учитывать экскурсионную ценность каждого объекта туристического показа.

**Литература**

1. Комплексная продуктивность земель лесного фонда : монография / В. Ф. Багинский, Л. Д. Есимчик, В. В. Гримашевич [и др.] ; под общ. ред. В. Ф. Багинского ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 295 с.
2. Караневский, П. И. Комплексная методика оценки потенциала культурных и природных объектов туризма / Междунар. Турист. Акад. – International Tourism Academy. – 2007–2010. – URL: <http://www.intacadem.ru/statji/karanevskiy-p.i.-kompleksnaya-metodika-otsenki-otentsiala-kuljturnyh-i-prirodnih-obektov-turizma-2.html> (дата обращения: 14.09.2021).
3. Сафиуллин, Р. Г. Критерии оценки уровня и эффективности развития туристско-рекреационного хозяйства региона / Р. Г. Сафиуллин, Д. С. Чернуха // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 1. – С. 84–88.
4. Планирование на предприятии туризма : учебник / Е. И. Богданов, О. Н. Кострюкова, В. П. Орловская [и др.] ; под ред. Е. И. Богданова. – Санкт-Петербург : Бизнес-пресса, 2004. – 320 с.

УДК 336.7

**АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНФЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «АиПИП»**

**А. И. Лученок**

*Институт экономики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск*

**М. Е. Шестаков**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрены основные возможности программного комплекса «АиПИП» в области анализа и прогнозирования инфляционных процессов.*

**Ключевые слова:** инфляция, инфляционные процессы, инфляционная корзина, прогнозирование, программный комплекс, анализ данных, справочник, отчет, график.

**ANALYSIS AND FORECASTING OF INFLATION PROCESSES  
USING THE SOFTWARE PACKAGE «AIPIP»**

**A. I. Luchenok**

*Institute of Economics National Academy of Sciences of Belarus, Minsk*

**M. E. Shestakov**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The main capabilities of the software package «AiPIP» in the field of analysis and forecasting of inflation processes are considered.*

**Keywords:** inflation, inflation processes, inflation basket, forecasting, software package, data analysis, directory, report, graph.

Пока существуют деньги, инфляция будет являться объективным и постоянным процессом, протекающим параллельно процессам развития рыночной экономики. Это касается как экономики в целом, так и отдельно взятых ее субъектов: физических лиц, индивидуальных предпринимателей, крупных промышленных предприятий.

При небольших значениях инфляция даже полезна для хозяйственных отношений, не дает им «застаиваться», но вот когда рост стоимости так называемой «инфляционной корзины» становится стремительным и неконтролируемым, наступает время социально-экономического кризиса. Ухудшается жизнь почти всех слоев населения.

Инфляцию нельзя контролировать при помощи написанной компьютерной программы, но предвидеть – можно.

Программный комплекс «АиПП» (сокращенно от «анализ и прогнозирование инфляционных процессов») разработан автором на базе платформы «1С: Предприятие 8.1».

Он позволяет хранить данные о таких показателях, как годовой уровень инфляции, индекс потребительских цен (в целом и по группам товаров и отраслям народного хозяйства), ставка рефинансирования, средняя заработная плата, уровень инфляционных ожиданий населения и др.

Анализ показателей инфляции и социально-экономических показателей, с ней связанных, можно вести по любому государству (при наличии первичных данных).

Перечень государств ведется в справочнике «Страны» (рис. 1).

Код	Наименование
00000003	Казakhstan
00000004	Китай
00000001	Республика Беларусь
00000002	Россия

Рис. 1. Справочник «Страны»

Справочник содержит два реквизита: «Код» и «Наименование». Вводится вручную. При необходимости может быть заполнен автоматически из файлов XML или DBF-формата (при помощи обработки: пишется самостоятельно или предоставляется компанией «1С» на платной основе).

Для ввода показателей инфляции и социально-экономических показателей, с ней связанных, используется документ «Показатели инфляции» (рис. 2, 3).

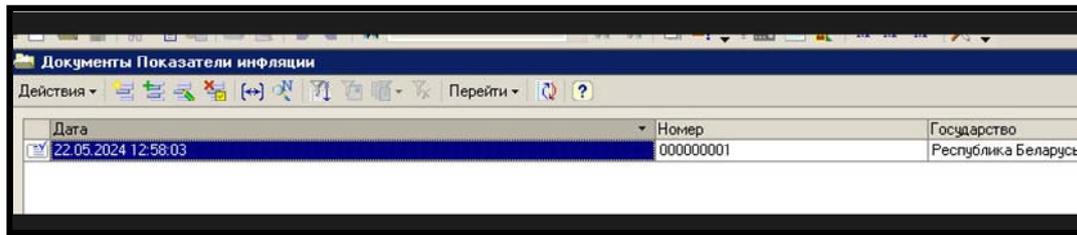


Рис. 2. Документ «Показатели инфляции» (форма списка)

№	Год	Годовой уровень инфляции	ИПЦ	Ставка рефинансирования	Средняя ЗП, долл.	Идентификатор строки
1	1992	1 659.0	4 106.40	30.0	14.2	220524_1
2	1993	1 596.6	2 096.63	210.0	7.2	220524_2
3	1994	1 909.7	2 029.70	460.0	9.2	220524_3
4	1995	291.0	343.96	66.0	65.2	220524_4
5	1996	39.3	139.00	35.0	61.1	220524_5
6	1997	63.1	162.20	40.0	91.1	220524_6
7	1998	191.8	291.70	48.0	43.2	220524_7
8	1999	291.2	391.20	120.0	61.1	220524_8
9	2000	208.0	360.80	80.0	74.2	220524_9
10	2001	46.1	146.12	48.0	89.2	220524_10
11	2002	34.8	134.80	38.0	100.2	220524_11
12	2003	26.4	126.40	28.0	115.2	220524_12
13	2004	14.4	144.40	17.0	160.2	220524_13
14	2005	7.9	107.90	11.0	215.2	220524_14
15	2006	6.6	106.60	10.0	271.2	220524_15
16	2007	12.1	112.10	10.0	323.2	220524_16
17	2008	13.3	113.29	12.0	406.2	220524_17
18	2009	10.1	110.12	13.5	351.2	220524_18
19	2010	9.3	109.32	10.5	408.2	220524_19
20	2011	108.7	208.68	45.0	416.2	220524_20
21	2012	21.8	121.79	30.0	448.2	220524_21
22	2013	14.5	114.47	23.5	563.2	220524_22
23	2014	16.2	116.24	20.0	577.2	220524_23
24	2015	12.0	112.00	25.0	360.2	220524_24
25	2016	10.6	111.60	18.0	300.2	220524_25
26	2017	4.6	106.00	11.0	426.2	220524_26
27	2018	5.6	104.90	10.0	470.2	220524_27
28	2019	4.7	105.60	9.0	490.2	220524_28
29	2020	7.4	105.50	7.8	514.2	220524_29
30	2021	9.9	109.10	9.3	530.2	220524_30
31	2022	12.8	110.80	12.0	622.2	220524_31
32	2023	5.1	105.80	9.5	634.2	220524_32

Рис. 3. Документ «Показатели инфляции» (форма документа)

Данный документ содержит следующие реквизиты:

«Страна»: тип СправочникСсылкаСтраны;

«Дата» (предопределенный реквизит): тип Дата/Время;

Табличная часть «ПоказателиИнфляции»:

«Год»: тип Строка;

«ГодовойУровеньИнфляции»: тип Число;

«УровеньПотребительскихЦен»: тип Число;

«СтавкаРефинансирования»: тип Число;

«СредняяЗП»: тип Число;

«ИдентификаторСтроки»: тип Строка (технический реквизит, который необходим для соблюдения уникальности записей).

При проведении документа данные из него попадают в регистр сведений «Показатели инфляции» (рис. 4).

Если требуется корректировка данных в документе «ПоказателиИнфляции», то вначале производится отмена проведения документа, затем вносятся требуемые изменения и делается повторное проведение.

Регистратор	Номер ст...	Активность	Период	Страна	Идентификато...
Показатели инфляци...	1	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_1
Показатели инфляци...	2	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_2
Показатели инфляци...	3	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_3
Показатели инфляци...	4	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_4
Показатели инфляци...	5	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_5
Показатели инфляци...	6	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_6
Показатели инфляци...	7	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_7
Показатели инфляци...	8	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_8
Показатели инфляци...	9	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_9
Показатели инфляци...	10	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_10
Показатели инфляци...	11	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_11
Показатели инфляци...	12	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_12
Показатели инфляци...	13	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_13
Показатели инфляци...	14	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_14
Показатели инфляци...	15	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_15
Показатели инфляци...	16	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_16
Показатели инфляци...	17	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_17
Показатели инфляци...	18	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_18
Показатели инфляци...	19	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_19
Показатели инфляци...	20	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_20
Показатели инфляци...	21	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_21
Показатели инфляци...	22	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_22
Показатели инфляци...	23	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_23
Показатели инфляци...	24	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_24
Показатели инфляци...	25	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_25
Показатели инфляци...	26	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_26
Показатели инфляци...	27	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_27
Показатели инфляци...	28	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_28
Показатели инфляци...	29	✓	22.05.2024 12:58:03	Республика Беларусь	220524_29

Рис. 4. Регистр сведений «Показатели инфляции»

Особенностью регистров сведений является наличие предопределенного свойства – выдавать срез последних данных, то есть если необходимо будет внести какие-то изменения по уже введенным и записанным в регистр показателям, то можно будет либо найти старый документ, в котором содержатся неточности, и выполнить действия по корректировке данных, приведенные выше, либо создать и провести новый документ. В отчет в итоге попадут только актуальные данные. Лучше использовать первый метод, чтобы неверная информация не «засоряла» базу данных и потенциально не несла опасность ошибок при проведении экономического анализа.

На основе вышеописанного регистра сведений строится отчет «Показатели инфляции за \_\_ год» (рис. 5, 6).

При незаполненном поле «Год» данные по показателям инфляции выводятся за все периоды (годы). При заполненном поле «Год» получаем информацию по конкретному году. Отчет формируется при нажатии кнопки «Сформировать отчет».

Выводимые данные отсортированы по годам (по возрастанию).

Страна: Республика Беларусь Год: [ ]

Сформировать отчет

Год	Годовой уровень инфляции	ИПЦ	Актуальная ставка рефинансирования	Средняя ЗП, долл.
2023	5	106	10	634
2022	13	111	12	622
2021	10	108	9	520
2020	7	106	8	514
2019	5	106	9	490
2018	6	105	10	470
2017	5	106	11	426
2016	11	112	18	300
2015	12	114	25	360
2014	16	116	20	577
2013	17	116	24	563
2012	22	122	30	448
2011	109	209	45	416
2010	10	110	11	408
2009	10	110	14	351
2008	13	113	12	406
2007	12	112	10	323
2006	7	107	10	271
2005	8	108	11	215
2004	14	144	17	160
2003	25	125	28	115
2002	35	135	38	100
2001	46	146	48	89
2000	206	351	80	74
1999	251	351	120	61
1998	182	282	48	43
1997	63	163	40	91
1996	39	139	35	81
1995	291	344	66	65
1994	1 960	2 060	480	9
1993	1 997	2 097	210	7
1992	1 659	4 106	30	14

Рис. 5. Показатели инфляции за 1992–2023 гг.

Страна: Республика Беларусь Год: 1996

Сформировать отчет

Год	Годовой уровень инфляции	ИПЦ	Актуальная ставка рефинансирования	Средняя ЗП, долл.
1996	39	139	35	81

Рис. 6. Показатели инфляции за 1996 г.

На основе данных выводимого отчета в программе «АиПИП» для наглядности строится график (рис. 7).

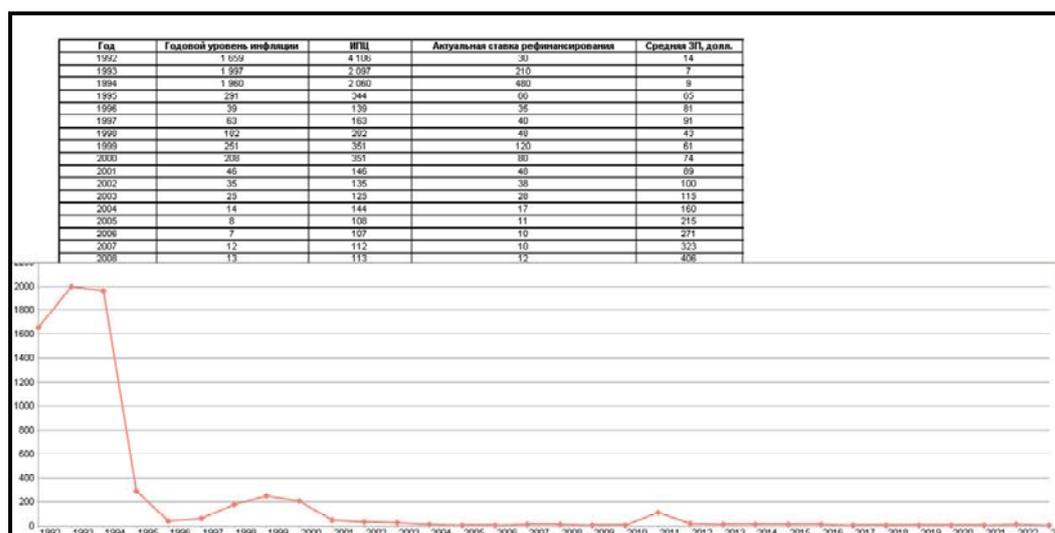


Рис. 7. График динамики инфляции в Беларуси в 1992–2023 гг.

## 272 Секция 8. Проблемы экономики, организации и управление производством

На форме отчета есть параметр «В сравнении с», на базе которого можно построить график динамики уровня инфляции по стране, сравниваемой с исходной. Для удобства и наглядности график строится в той же системе координат (рис. 8).

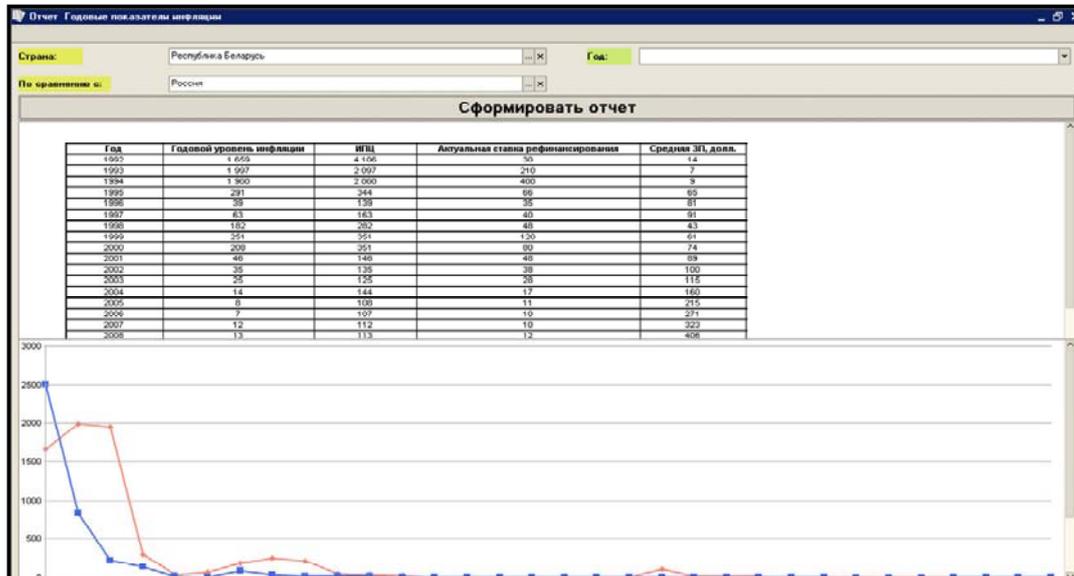


Рис. 8. График динамики инфляции в Беларуси и России в 1992–2023 гг.

Также в программном комплексе «АиПИП» реализована простейшая функция прогнозирования на основе метода линейной экстраполяции. Прогнозирование уровня инфляции осуществляется на три года, включая текущий. Данные выводятся в таблицу (рис. 9). В дальнейшем есть возможность расширения функционала системы «АиПИП», введения более сложных и точных методов анализа данных и построения прогнозов.

Прогнозное значение инфляции:			
Метод линейной экстраполяции:	2024 г.	2025 г.	2026 г.
	6,22	7,44	8,67

Рис. 9. Прогнозирование инфляции методом линейной экстраполяции

В программном комплексе «АиПИП» также реализована функция администрирования (создание ролей, заведение/удаление учетных записей пользователей, создание и редактирование паролей и т. д.).

Конечными пользователями программного комплекса «АиПИП» могут являться специалисты Национального банка Республики Беларусь, занимающиеся вопросами инфляции, работники планово-экономического отдела любого условного предприятия, индивидуальные предприниматели и др. База данных системы формируется на основе отчетов Национального статистического комитета Республики Беларусь, Национального банка Республики Беларусь, Министерства экономики Республики Беларусь.

УДК 332.1

## СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ТУРИСТСКИХ КЛАСТЕРОВ

А. О. Шкабарина

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Туристический кластер, как совокупность взаимосвязанных предприятий и организаций, работающих в сфере туризма на определенной территории, генерирует синергетический эффект. Этот эффект представляет собой усиление общего результата за счет взаимодействия отдельных компонентов кластера, превышающее сумму отдельных вкладов.*

**Ключевые слова:** туристический кластер, синергетический эффект, инвестиции, выгоды.

## SYNERGETIC EFFECT OF TOURIST CLUSTERS

A. O. Shkabarina

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*A tourist cluster, as a set of interconnected enterprises and organizations operating in the field of tourism in a certain territory, generates a synergistic effect. This effect is an increase in the overall result due to the interaction of individual components of the cluster, exceeding the amount of individual deposits.*

**Keywords:** tourist cluster, synergistic effect, investment, benefits.

Туристские кластеры представляют собой динамичную форму экономической организации и социального взаимодействия, основанную на концентрации туристских активов в конкретном регионе. В их состав входят предприятия различных секторов, задействованные в обслуживании туристов: туроператоры, отели, предприятия общественного питания, производители сувенирной продукции, транспортные компании и др.

В современных социально-экономических реалиях наблюдается активный поиск оптимальных моделей пространственной организации экономической деятельности. Отечественный и зарубежный опыт демонстрирует явные преимущества кластерного подхода в различных сферах.

Туристические кластеры, как пространственно-локализованные скопления взаимосвязанных предприятий и организаций, являются эффективным инструментом стимулирования комплексного экономического роста.

Формирование туристических кластеров способствует синергетическому эффекту, активизируя взаимодействие между отдельными секторами экономики.

Концепция синергетического эффекта в туристических кластерах базируется на теории систем и синергетики. Она предполагает, что взаимодействие и сотрудничество организаций, входящих в кластерное объединение, создает дополнительные выгоды, превышающие простую сумму индивидуальных усилий, приводя к увеличению объемов производства, росту занятости, повышению уровня доходов населения и, как следствие, увеличению платежеспособного спроса.

Привлечение инвестиций, повышение конкурентоспособности, создание новых рабочих мест и рост инновационной активности – все это является прямым результатом эффективного функционирования туристических кластеров.

К ключевым аспектам синергетического эффекта туристического кластера

можно отнести следующие:

- 1) повышение конкурентоспособности участников кластера:
  - рост производительности труда и снижение издержек;
  - улучшение качества и расширение ассортимента туристских услуг;
  - усиление рыночных позиций и увеличение доли рынка;
- 2) активизация инновационных процессов:
  - интенсификация обмена знаниями и технологиями;
  - ускорение разработки и внедрения инноваций;
  - повышение инновационной активности организаций;
- 3) развитие туристской инфраструктуры:
  - привлечение совместных инвестиций в инфраструктурные объекты;
  - повышение доступности и качества обслуживания туристов;
  - синергия в использовании и эксплуатации инфраструктуры;
- 4) рост объемов туристских потоков:
  - увеличение численности и продолжительности пребывания туристов;
  - расширение географии въездного и внутреннего туризма;
  - повышение загрузки объектов размещения и транспорта;
- 5) социально-экономические эффекты в регионе:
  - рост занятости и доходов населения;
  - увеличение налоговых поступлений в бюджеты;
  - мультипликативный эффект для смежных отраслей.

Оценка синергетического эффекта от создания туристического кластера в регионе – это сложный и многогранный процесс, требующий комплексного анализа. Он включает в себя оценку количественных и качественных изменений, происходящих в результате формирования кластера.

К основным методам оценки синергетического эффекта следует отнести:

- анализ динамики туристского потока, предполагающего сравнение числа туристов до и после создания кластера, а также исследование изменений в структуре туристского потока (продолжительность поездок, средний чек, география происхождения туристов), применение статистических методов для идентификации тенденций и выявления влияния кластера;

- оценка изменений в экономической активности, включающей анализ динамики валового регионального продукта, оценку инвестиционной активности в туристический сектор региона; исследование динамики числа рабочих мест и уровня занятости в туристическом секторе и смежных отраслях;

- анализ инновационной активности на основании оценки количества новых туристских продуктов и услуг, внедренных в результате деятельности кластера, а также уровня инвестиций в инновационные проекты;

- исследование удовлетворенности туристов посредством проведения опросов туристов для оценки их удовлетворенности качеством туристских услуг и инфраструктурой кластера, применение методов качественного анализа для изучения мнений и ожиданий туристов;

- моделирование экономических эффектов, используя специальные модели для прогнозирования экономических последствий создания кластера и оценки его влияния на региональную экономику, применение математического моделирования для изучения взаимосвязей между разными факторами и оценки вклада кластера.

При оценке синергетического эффекта туристического кластера необходимо учитывать влияние внешних факторов, таких как глобальная экономическая ситуация, изменения в потребительских предпочтениях. Рекомендуется проводить срав-

нение с аналогичными туристическими кластерами в других регионах, чтобы оценить эффективность и конкурентные преимущества. Оценка синергетического эффекта должна быть комплексной и охватывать все аспекты деятельности кластера – экономические, социальные и экологические.

Оценка синергетического эффекта от создания туристического кластера – это необходимый шаг для определения его вклада в развитие региона и оценки эффективности инвестиций. Результаты оценки могут быть использованы для корректировки стратегии развития кластера и повышения его конкурентоспособности.

Систематическая оценка синергетического эффекта является необходимым элементом управления развитием туристических кластеров и позволяет оптимизировать их деятельность для достижения максимальной отдачи и устойчивого роста.

УДК 658.5.012.1(332.14)

### **USING THE BACCM™ MODEL TO DESCRIBE THE BASIC CONCEPTS OF CHINA'S ENERGY INDUSTRY**

**O. Vinnik, Xie Zhanlei**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The relevance of using business models for energy companies is substantiated, the levels and directions of energy digitalization are considered, six concepts of the basic concepts of business analysis (BACCM) model in relation to the Chinese energy sector are considered.*

**Keywords:** energy industry, digitalization, business analysis, Basic Concepts of Business Analysis Model (ACM), change, necessity, solution, stakeholders, value, context.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ВАССМ™ ДЛЯ ОПИСАНИЯ БАЗОВЫХ ПОНЯТИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ КИТАЯ**

**О. Г. Винник, Се Чжанлей**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Обоснована актуальность использования бизнес-моделей для энергетических компаний, рассмотрены уровни и направления цифровизации энергетики, шесть понятий модели базовых понятий бизнес-анализа (ВАССМ™) применительно к энергетическому сектору Китая.*

**Ключевые слова:** энергетическая отрасль, цифровизация, бизнес-анализ, Basic Concepts of Business Analysis Model (BACCM), перемены, необходимость, решение, заинтересованные стороны, ценность, контекст.

The process of energy industry digitalization in many countries began many years ago and is currently actively developing with the use of modern technologies. The introduction of digital technologies is possible at various levels and in various directions. Let's highlight the main directions:

- Digitalization of technological processes of energy production, transmission and distribution;
- Digitalization of business processes of generating companies and companies engaged in energy transmission to consumers;
- Digitalization of resource management;
- Digitalization of quality control and safety;
- Digitalization of company management.

Let's highlight the main levels

- Digitalization at the level of the company's division, for example, fuel preparation;
- Digitalization of production and management processes at the level of an individual company;
- Digitalization of the management of the energy system of the state as a whole.

Increasing energy sustainability requires changes not only in infrastructure, for example, modernization of transmission networks, but also modernization of management processes at various levels.

For a clear understanding of business processes and the possibility of conducting business analysis, specially developed models are used, among which one of the most well-known is the Basic Concepts of Business Analysis Model (BACCM), which forms the conceptual framework of business analysis. It describes what business analysis is, and what it means for those who perform business analysis tasks regardless of perspective, industry, methodology, or organizational level [1]. The model includes six basic concepts: change, need, solution, the stakeholder, the value, and the context (Figure). Each of these concepts is equivalent and represents an essential idea for business analysis.

### The Business Analysis Core Concept Model (BACCM)

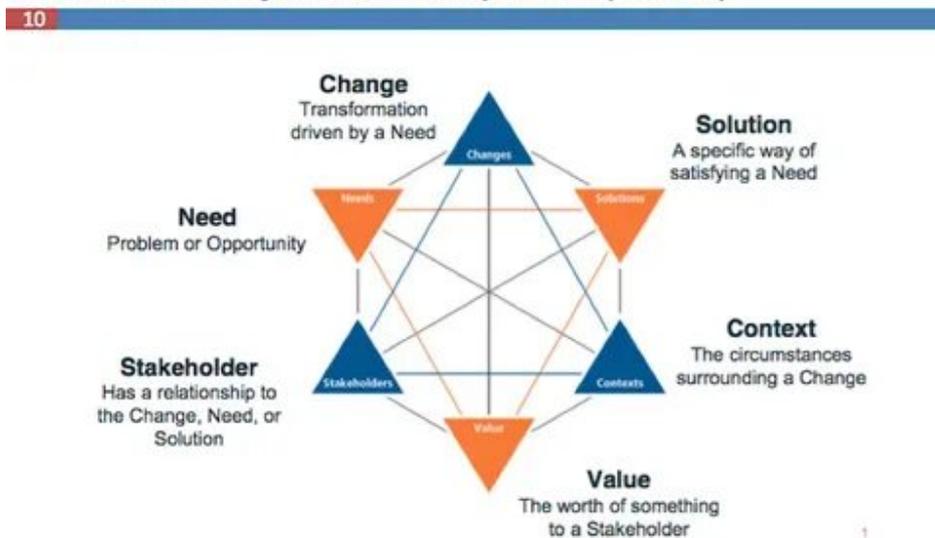


Fig. 1. Six basic concepts of the Basic Concepts of Business Analysis Model

Consider using the BACCM™ model for the Chinese energy industry. From the point of view of the business analysis of the energy industry, the six basic concepts can be presented as follows:

#### 1. Changes

Due to the strengthening of China's environmental policy and the adjustment of the types and structure of fuel and energy resources used and energy consumed, many regions have implemented the Coal to Electricity project, which involves replacing traditional coal-fired heating with electric. This process includes changes in many aspects, such as upgrading the power grid, replacing power equipment, improving the reliability and stability of power supply, and changing consumer habits regarding electricity.

#### 2. Need

Due to the constant increase in electricity consumption in industry, commerce and residential buildings, consumer demand for energy products is constantly growing. The

growing volumes of consumption and, consequently, electricity generation require identifying and meeting this demand by strengthening power supply systems, increasing the efficiency of electricity production and introducing emergency power supplies to ensure stable power supply.

### 3. Solution

To cope with the growing demand for electricity and the transformation of the energy structure, energy companies can implement smart grid solutions. Smart grid provides intelligent management and optimized planning of the power system using advanced communication and information technologies, increasing the reliability and efficiency of the power system.

### 4. Stakeholders

*The government* is the entity that forms the general policy of transformation, develops the legislative framework, controls the process of modernization of the energy structure and environmental protection.

*Energy generating and energy marketing companies* are entities that produce and supply electricity. They develop and implement projects to increase the efficiency of electricity production and reduce the cost of its implementation.

*Energy consumers* are subjects-consumers of electricity. Of particular interest to them are the price, quality of electricity and reliability of energy supply.

*Environmental organizations* are environmental protection entities. They are concerned about the environmental impact of electricity generation processes and are interested in minimizing the effects of energy production on the environment and directly on people.

Each of these stakeholders has their own interests and concerns in connection with the transformation of the energy industry, which require business analysts to take full account and coordinate when developing solutions.

### 5. Value

For the *government*, the implementation of projects to improve the reliability and efficiency of the energy sector means increasing the efficiency of the national economy, the quality of life of the country's citizens, improving the environment, and contributing to sustainable development;

For *energy companies*, increasing the value of an enterprise can be achieved by increasing the efficiency of electricity production, reducing operating costs and expanding value-added services.;

For *electricity consumers*, obtaining reliable, stable and inexpensive electricity supply can improve their quality of life and production efficiency;

For *environmental organizations*, the environmentally friendly development of energy helps to reduce environmental pollution and improve the quality of life of people.

### 6. Context

From the point of view of the political environment, the orientation of government policy towards the transformation of the energy structure and environmental protection will affect the direction of development of the electric power industry; from the point of view of the market environment, factors such as the competitive environment in the electricity market, changes in demand and supply of electricity will affect the business strategies of energy companies; From the point of view of the technological environment, the development and application of new technologies such as smart grids, distributed energy and energy storage technologies will contribute to transformation and innovation in the energy industry.

Thus, the following conclusions can be drawn. Currently, China's energy sector is rapidly developing and modernizing, undergoing significant changes. With the development of digitalization, the role of business analysis tools in this area is increasing. Business analysis systems have become a key tool for improving the efficiency of energy com-

panies and making informed management decisions. The application of the BACCM model will allow you to identify the key points of business analysis. In the future, the use of special business process modeling and business analysis tools will optimize production processes, improve resource management, predict supply and demand, control product quality and safety, improve the environment and improve the quality of life of citizens. This allows us to meet the needs of all stakeholders.

Reference

1. BABOK V3. A GUIDE TO THE BUSINESS ANALYSIS. BODY OF KNOWLEDGE IIBA: International institute of business analysis. URL: [https://bpmtraining.net/wp-content/uploads/2018/10/BABOK\\_Guide\\_v3\\_Member.pdf](https://bpmtraining.net/wp-content/uploads/2018/10/BABOK_Guide_v3_Member.pdf).

УДК 338.3

**НАПРАВЛЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**М. Д. Ятченко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный университет  
имени Ф. Скорины», Республика Беларусь*

*Основные направления развития электроэнергетического сектора проявляются в обеспечении существенного повышения эффективности производства энергии и надежности энергоснабжения, т. е. обеспечение потребностей экономики и населения страны в энергоносителях на основе их максимально эффективного использования при снижении нагрузки на окружающую среду.*

**Ключевые слова:** энергетическая политика, энергоэффективность, энергобаланс.

**DIRECTIONS OF IMPLEMENTATION OF ENERGY POLICY  
OF THE REPUBLIC OF BELARUS**

**M. D. Yatchenko**

*Gomel State University named after F. Skorina, the Republic of Belarus*

*The main directions of development of the electric power sector are manifested in ensuring a significant increase in the efficiency of energy production and reliability of energy supply, meeting the needs of the country's economy and population for energy resources based on their most efficient use while reducing the burden on the environment.*

**Keywords:** energy policy, energy efficiency, energy balance.

Главным приоритетом энергетической политики и стратегии в Республике Беларусь является обеспечение надежного и устойчивого энергоснабжения национальной экономики, одновременно снижая зависимость от импорта энергии и улучшая финансовую устойчивость сектора. Как возобновляемая энергия, так и энергоэффективность были определены в качестве приоритетов для достижения этих целей; однако большая часть изменений в энергетическом секторе будет связана с новой атомной электростанцией, которая уже введена в эксплуатацию.

С начала 1990-х гг. в Беларуси реализуется последовательная государственная политика, направленная на повышение энергоэффективности экономики, включающая создание нормативно-правовой базы, институциональной инфраструктуры, механизмов государственной поддержки и стимулирования, системы ключевых пока-

зателей эффективности и государственных программ с соответствующими инструментами мониторинга.

Значительный рост ВВП не привел к существенному изменению первичного и конечного потребления энергии. За два десятилетия (1990–2010 гг.) энергоёмкость ВВП Беларуси снизилась в 2,7 раза, а валовое потребление топливно-энергетических ресурсов сократилось в 1,6 раза при росте ВВП более чем в 1,5 раза. В результате реализации программ и мероприятий государственной политики доля собственных энергоресурсов в энергобалансе увеличилась до 16 % в 2022 г. по сравнению с 12,8 % в 1990 г. [1, с. 15].

Разработаны текущая энергетическая политика и стратегия Республики Беларусь на период до 2030 г., реализация которых в области энергосбережения направлена на реструктуризацию и модернизацию национальной экономики на основе энергоэффективных технологий.

Ключевой задачей в электроэнергетическом секторе является обеспечение существенного повышения эффективности производства энергии и надежности энергоснабжения.

Для повышения энергоэффективности экономики планируется к 2030 г. снизить энергоёмкость ВВП с 0,398 в 2005 г. до 0,154 т у. т. на тыс. руб. (в ценах 2005 г.), т. е. в 2,6 раза, а при сохранении такого темпа к 2035 г. она снизится в 3 раза [1, с. 15].

Среди основных направлений развития промышленного комплекса – создание «зеленой» технологической платформы промышленного производства, основанной на энергосбережении, внедрении экологических «зеленых» технологий, возобновляемых и альтернативных источников энергии, эффективных технологий переработки отходов.

Долгосрочной целью развития топливно-энергетического комплекса является обеспечение потребностей экономики и населения страны в энергоносителях на основе их максимально эффективного использования при снижении нагрузки на окружающую среду.

Для достижения поставленной цели предусматривается:

- внедрение парогазовых, газотурбинных и газомоторных технологий для производства электрической и тепловой энергии, отвечающих передовым современным требованиям науки и техники в этой области;
- ввод в эксплуатацию двух энергоблоков Белорусской АЭС общей мощностью около 2400 МВт, строительство объектов на местных видах топлива;
- увеличение глубины переработки нефти;
- разработка и принятие Закона Республики Беларусь «Об электроэнергетике»;
- обеспечение прозрачности затрат на всех этапах производства, передачи (транспортировки), распределения и реализации электрической, тепловой энергии и природного газа;
- разработка нормативных правовых актов, стимулирующих использование возобновляемых источников энергии и местных видов топлива.

Достижение устойчивой энергетической экономики требует внимания как к долгосрочным, так и к краткосрочным энергетическим потребностям. Краткосрочные потребности включают: разработку механизмов для сохранения энергии; поощрение энергоэффективности; выявление, разработку, демонстрацию и развертывание как существующих, так и новых устойчивых энергетических технологий. Краткосрочные решения должны быть способны поддерживать непрерывный экономический рост, демонстрируя надлежащее управление окружающей средой и адаптируясь

к будущим экологическим условиям по мере необходимости.

В рамках сотрудничества с государствами-членами ЕАЭС будет осуществляться активное взаимодействие с международными энергетическими организациями, в том числе с Международным энергетическим агентством, а также с IRENA, основной задачей которых является распространение технической и иной информации о новых технологиях в области возобновляемой энергетики.

В среднесрочной перспективе (2021–2030 гг.) основной целью развития топливно-энергетического комплекса станет повышение энергетической безопасности страны за счет вовлечения в энергобаланс ядерного топлива и возобновляемых источников энергии [2]. Необходимо расширять сотрудничество с Китаем и международными организациями в рамках СНГ, способствуя трансферу технологий и системных решений в области энергоэффективности возобновляемых источников энергии.

#### Литература

1. Власовец, Т. Эффективность ресурсов / Т. Власовец // Экономика Беларуси. – 2022. – № 3. – С. 14–19.
2. Развитие возобновляемой энергетики Беларуси // Департамент по энергоэффективности. – URL: [https://energoeffect.gov.by/news/news\\_2023/-20231025\\_news1/](https://energoeffect.gov.by/news/news_2023/-20231025_news1/) (дата обращения: 29.09.2024).

УДК 658.58.012.2

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫМИ ЗАПАСАМИ НА ПРЕДПРИЯТИИ**

**Г. В. Митрофанова, Д. А. Сапончик**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрены системы и современные методы управления материальными запасами предприятия. Эффективное управление материальными запасами.*

**Ключевые слова:** управление, запасы, аутсорсинг, предприятие.

### **IMPROVEMENT OF INVENTORY MANAGEMENT AT THE ENTERPRISE**

**G. V. Mitrofanova, D. A. Saponchyk**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The article discusses the systems and modern methods of managing the material reserves of the enterprise. Effective inventory management.*

**Keywords:** management, inventory, outsourcing, enterprise.

Для промышленных предприятий содержание сверхнормативных запасов товарно-материальных ценностей было всегда проблемой, вызванной неритмичностью поставок. Это приводит к значительным расходам, обусловленным содержанием специально оборудованных помещений, оплатой труда персонала, страхованием имущества. Кроме того, возникает риск порчи, хищения, а также происходит моральное и физическое старение этих запасов. Затраты на управление запасами часто достигают 40 % издержек фирмы, а затраты на поддержание запасов составляют в среднем от 5 до 15 % их годовой стоимости [1].

Исследования, проводимые в ряде западных стран, дают основания утверждать, что ожидаемая прибыль от каждого процента сокращения уровня запасов может быть приравнена к 10%-му росту оборота, а даже небольшое снижение уровня сверхнормативных запасов и ускорение оборачиваемости товарно-материальных ценностей позволяют добиться существенного увеличения рентабельности. Хотя утверждение о 10%-м росте оборота при снижении запасов на 1 % может варьироваться в зависимости от обстоятельств, оно подчеркивает важность эффективного управления запасами как средства повышения рентабельности и устойчивости бизнеса. В то же время отсутствие запасов влияет на появление дополнительных издержек и часто очень значительных. К ним относят потери от простоя производства, от отсутствия товара на складе в момент спроса на товар, от закупок товаров мелкими партиями по более высоким ценам и т. д. Все это в итоге сказывается на себестоимости готового изделия и, как следствие, – на его конкурентоспособности. Поэтому многие предприятия стремятся сократить запасы до оптимального объема.

Для решения этой задачи требуется оперативная, полная и достоверная информация о текущем состоянии складских запасов, оборачиваемости товаров, перспективных потребностях в различных видах товарно-материальных ценностей, позволяющая принимать экономически обоснованные решения о частоте и объемах поставок, а также соотношение планов сбыта с планами закупок.

Система управления материальными запасами – это совокупность правил и способов регулирования, с помощью которых можно контролировать уровни запасов и определять, какие уровни следует поддерживать, какой запас следует пополнять и каким должен быть объем заказа.

Эффективное управление материальными запасами позволяет предприятию снизить расходы на содержание запасов, обеспечивать бесперебойность производства и эффективное использование оборудования, а также удовлетворять или превышать ожидания потребителей, создавая такие запасы по каждому виду из товарной номенклатуры, которые максимизируют чистую прибыль.

Управление материальными запасами всегда имеет целью их оптимизацию, т. е. обеспечение предприятия товарно-материальными ценностями в таком ассортименте и в таких количествах, которые максимально соответствуют предвидимому спросу. Управлять материальными запасами – это значит планировать определенный объем и структуру запасов в соответствии с поставленными перед предприятием целями и контролировать, чтобы материальные запасы постоянно отвечали установленным критериям.

Рациональная величина материальных запасов обеспечивает выполнение и перевыполнение плана товарооборота, удовлетворение спроса, сокращение части издержек. Величина текущих запасов является не постоянной, но от нее зависит вся торговля в целом.

Сокращение времени обращения ускоряет денежное обращение, а значит создает условия для роста эффективности. В нестабильных экономических условиях нужно обеспечить максимально возможную скорость оборачиваемости товарных запасов, чтобы не нести инфляционных убытков.

Управление запасами предусматривает организацию контроля за их фактическим состоянием. Необходимость организации службы контроля за состоянием запасов обусловлена повышением издержек в случае выхода фактического размера запаса за рамки, предусмотренные нормами запаса.

Меры по совершенствованию управления материальными запасами способствуют сохранять товары с наименьшими потерями и рациональными затратами на

хранение.

Для снижения затрат по обслуживанию запасов, а значит и инвестиций в запасы, менеджер может использовать следующие методы управления запасами:

1. Аутсорсинг запасов – передача функций хранения и ответственности за запасы ключевым поставщикам или провайдерам логистических услуг и складов (третьей стороне), в результате чего достигается экономия в размере 10–20 %.

2. Совершенствование системы управления и обработки заказов. Для этого необходимо иметь возможность систематически отслеживать и анализировать структуру и динамику товарных запасов, информация о них должна быть упорядочена.

3. Внедрение информационных систем ERP или SMI (Supply Management Inventory), основанных на прогнозировании потребительского спроса, планировании запасов, анализе времени выполнения заказов и оборачиваемости запасов. В развитых странах управление материальными запасами базируется на использовании мощных информационных технологий, которые разрешают практически каждый день наблюдать их состояние и динамику, автоматически осуществлять размещения заказов через компьютерную сеть и пополнять запасы [2].

Система класса ERP (Enterprise Resource Planning – Управление ресурсами предприятия) – это корпоративная информационная система для автоматизации планирования, учета, контроля и анализа всех основных бизнес-процессов и решения бизнес задач в масштабе предприятия (организации). ERP-система помогает интегрировать все отделы и функции компании в единую систему, при этом все департаменты работают с единой базой данных и им проще обмениваться между собой разного рода информацией.

Внедрение ERP системы – достаточно сложный и длительный процесс. Интеграция ERP системы в бизнес-процессы компании предполагает серьезные изменения логики внутренних процедур в компании, реинжиниринга бизнес-процессов а также значительные изменения в работе ее сотрудников. В связи со сложностью проекта сроки внедрения систем класса ERP достаточно большие (2–3 года). Но внедрение системы класса ERP дает следующие возможности:

– планировать потребности в материалах и комплектующих, сроки и объемы поставок для выполнения плана производства продукции;

– регулировать наличие продукции (излишки, дефицит) и снижать издержки на ее хранение;

– регулировать процесс производства, своевременно реагируя на изменение спроса;

– оптимизировать бизнес-процессы в компании путем сокращения материальных и временных затрат;

– контролировать поставки и качество сервиса для клиентов [3].

Таким образом, управление материальными запасами оказывает большое влияние на финансовое положение и конкурентоспособность предприятия, поскольку они в значительной мере определяют издержки производства и качество обслуживания потребителей готовой продукции. Экономический ущерб наносит как значительное наличие запасов, так и их недостаточное количество.

#### Л и т е р а т у р а

1. Сярова, О. М. Управление запасами на предприятиях автомобилестроения / О. М. Сярова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 2, № 1. – С. 233–238.

## **Секция 8. Проблемы экономики, организации и управление производством 283**

2. Сярдова, О. М. Основные показатели эффективности закупочной деятельности промышленного предприятия / О. М. Сярдова // Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та. Серия: «Экономика и управление». Специальный выпуск. – 2010. – № 1. – С. 39–41.
3. Данилова, С. Ю. Оптимизация уровня запасов производства с целью повышения конкурентоспособности предприятия с непрерывным циклом производства / С. Ю. Данилова, Е. В. Пуденков // Вестник Волжского университета имени В. Н. Татищева. – 2013. – № 2 (28). – С. 53–62.

Научное издание

# **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ**

**Сборник научных трудов**

**В двух частях  
Часть 2**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редактор *Т. Н. Мисюрова*

Компьютерная верстка: *Н. Б. Козловская, И. П. Минина*

Подписано в печать 21.03.25.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 33,01. Уч.-изд. л. 28.

Тираж 26 экз. Заказ № 195/45.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48