

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»

**ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ,  
ЭНЕРГЕТИКИ  
И УПРАВЛЕНИЯ**

**МАТЕРИАЛЫ  
XXIV Международной научно-технической  
конференции студентов, аспирантов  
и молодых ученых**

**Гомель, 25–26 апреля 2024 года**

**В двух частях  
Часть 1**

**Гомель 2024**

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

И88

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. *А. А. Бойко* (отв. редактор)

д-р физ.-мат. наук, проф. *О. Н. Шабловский*

д-р техн. наук, проф. *М. И. Михайлов*

д-р техн. наук, проф. *А. Б. Невзорова*

д-р техн. наук, проф. *А. В. Овсянник*

канд. физ.-мат. наук, доц. *А. А. Бабич*

канд. техн. наук, доц. *Ю. Л. Бобарикин*

канд. техн. наук, доц. *Ж. В. Кадолич*

канд. техн. наук *Е. Н. Макеева*

канд. техн. наук, доц. *Ю. В. Крышнев*

канд. техн. наук, доц. *В. В. Брель*

канд. техн. наук, доц. *А. О. Добродей*

канд. техн. наук, доц. *К. С. Курочка*

канд. техн. наук, доц. *Т. А. Трохова*

канд. экон. наук, доц. *И. В. Ермонина*

канд. экон. наук, доц. *Л. Л. Соловьёва*

канд. экон. наук, доц. *Е. П. Пономаренко*

канд. геогр. наук, доц. *Е. Н. Карчевская*

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

Подготовка и проведение конференции осуществлены на базе  
Гомельского государственного технического  
университета имени П. О. Сухого

**Исследования** и разработки в области машиностроения, энергетики  
И88 и управления : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 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, 2024. – 234 с.

ISBN 978-985-535-609-8.

Содержатся материалы XXIV Международной научно-технической конференции по следующим направлениям: машиностроение; материаловедение и технологии обработки материалов; энергетика; радиоэлектроника, автоматизация, телекоммуникации и связь; экономика, организация производства и управление; маркетинг и отраслевая экономика; информационные технологии и моделирование; физические и математические методы исследования сложных систем.

Для студентов, аспирантов и молодых ученых.

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

ISBN 978-985-535-609-8 (ч. 1)

ISBN 978-985-535-611-1

© Оформление. Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Комраков В. В.</i> Интеллектуальные программные средства для профилактики, диагностики, лечения, реабилитации пациентов с заболеваниями позвоночника и паразитовидной железы .....	7
<i>Астапенко И. В.</i> Современные методы применения численного моделирования для решения технологических проблем горячей прокатки .....	12
<i>Карчевская Е. Н., Галова Ю. А., Сидоркина В. А.</i> Промышленный туризм в Республике Беларусь: маркетинговый анализ перспектив развития .....	18

## Секция I. МАШИНОСТРОЕНИЕ И НЕФТЕГАЗОРАЗРАБОТКА

<i>Сабитов М. И., Леонтьев Д. С.</i> Ранняя монетизация попутного нефтяного газа при помощи внедрения мобильной установки подготовки газа в период опытно-промышленной разработки месторождения .....	23
<i>Фетисова Е. А., Попов Н. В., Кутневич Д. В., Долгая В. Д., Коротеев А. О.</i> Химический состав наплавленного металла при дуговой сварке с модифицированной защитной газовой средой .....	26
<i>Щербатый К. С., Певнев И. В., Выходцев М. В., Огородников Л. В.</i> Оценка напряженно-деформированного состояния рамы под силовую установку и гидропередачу дизель-поезда типа ДР1Б.....	29
<i>Бочаров Н. В., Клочко У. В., Шепелева И. С.</i> К вопросу определения уровня жидкости в нефтяных скважинах методом эхолокации .....	32
<i>Писарев В. Ю., Злотников И. И.</i> Изучение перспектив применения гидрофобизированного диоксида кремния в качестве сорбента нефтяных загрязнений .....	36
<i>Станкевич Д. Н., Андреевец Ю. А.</i> Автоматизация системы управления испытательным стендом .....	39
<i>Стасенко Т. Д., Петухов А. В.</i> Проектирование зубчатой передачи средствами САПР и прогнозирование износа на рабочих поверхностях зубчатых колес .....	42
<i>Гурбан О. К., Пинчук В. В.</i> Оптимизация критериев при расчете и проектировании монтажных корпусов гидроблоков управления .....	46
<i>Храпуцкая Ю. А., Андреевец Ю. А.</i> Способы предотвращения гидравлических ударов при эксплуатации мобильных объектов.....	49
<i>Бугримов А. А., Порошин В. Д.</i> Геологическое строение и нефтегазоносность Чкаловского месторождения .....	52
<i>Бочаров Н. В., Ткачев В. М.</i> О применении существующих алгоритмов фильтрации изображений компьютерной томографии ядра с низким разрешением .....	53
<i>Горбаченко В. С., Демяненко Н. А.</i> Источники механических примесей в потоке добываемой жидкости. Опыт применения струйного насоса для освоения скважин Припятского прогиба .....	56
<i>Ридкина К. В., Кирилук С. И.</i> К вопросу о повышении производительности мобильных агрегатов.....	60
<i>Литвинова В. О., Попов В. Б.</i> Повышение грузоподъемности ПНУ универсального энергосредства СЭУ-350.....	63
<i>Капинский Н. О., Повжик П. П.</i> Применение технологии горизонтального бурения на месторождениях Припятского прогиба .....	66

<i>Пракопович П. А., Михайлов М. И.</i> Анализ геометрической точности планетарно-эксцентрикового механизма .....	70
---	----

---

**Секция II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ  
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

---

<i>Грицаев Е. А., Ковалёва М. С., Куликова А. А.</i> Анализ современных технологий доводки поверхностей.....	74
<i>Кузьменко Е. Д., Матренин С. В.</i> Исследование механических свойств керамики на основе ZrCN .....	76
<i>Бронов Д. А., Черенда Н. Н.</i> Фазовый состав и механические свойства поверхностного слоя стали X18H10T, легированного атомами титана и алюминия при воздействии компрессионных плазменных потоков .....	78
<i>Клячкова П. С., Левкина А. Д., Зайцев Е. В., Кадолич Ж. В.</i> Опыт применения аддитивных технологий для лечения и коррекции заболеваний органов зрения .....	81
<i>Попкова Ю. И., Григорьев А. Я.</i> Научные принципы выбора материалов насосно-компрессорных труб для условий нефтяных месторождений Припятского прогиба, осложненных углекислотной коррозией.....	84
<i>Гладышева А. Д., Ухарцева И. Ю.</i> Исследование свойств современных упаковочных материалов .....	87
<i>Селюков И. В., Ухарцева И. Ю.</i> Экологические проблемы утилизации бытовых полимеров.....	91
<i>Рогов С. В., Гаврилин В. Г., Стасенко Д. Л.</i> Влияние формы частиц ферромагнитных порошков на стабильную работу вибродозатора в процессе электромагнитной наплавки .....	94
<i>Кашиперов А. А., Довгало Д. А., Чувашов Д. С., Галушкин И. А., Кадолич Ж. В.</i> Использование возможностей трехмерных технологий для производства изделий медицинского назначения.....	97
<i>Лёвкина А. Д., Поздняков Е. П., Куис Д. В., Сидоренко Т. И., Коротцов А. М., Найзабеков А. Б., Лежнев С. Н., Степанкин И. Н.</i> Микроструктура и свойства цементованных слоев сталей 18ХГТ и 16CrMnS5 .....	101
<i>Давыдова О. В., Дробышевская Н. Е., Лёвкина А. Д., Подденежный Е. Н.</i> Получение люминесцентных порошков оксида церия методом термохимических реакций.....	105
<i>Пинчук А. А., Бобрышева С. Н.</i> Градиентные материалы. Создание проблемы или ее решение .....	108
<i>Турцевич Н. С., Мартьянов Ю. В., Бобарикин Ю. Л.</i> Способы преформации проволоки после волочения для повышения технологических свойств.....	111
<i>Соловьёва В. А., Прусенко И. Н.</i> Исследование влияния характеристик и свойств исходного огнеупорного наполнителя на эксплуатационные свойства литейных стержней.....	113
<i>Деревянко Д. В., Бобарикин Ю. Л., Мартьянов Ю. В.</i> Теоретические основы способов преформации проволоки для повышения ее технологических свойств.....	117
<i>Иващук А. А., Жаранов В. А.</i> Процессы, технология и оборудование для подготовки материалов к плавке в электропечах .....	119
<i>Лысенко Д. А., Бобарикин Ю. Л.</i> Напряжение волочения в цилиндрической зоне волоки.....	122
<i>Савченко С. А., Чубарев Д. С., Астапенко И. В.</i> Исследование зависимости размера зерна микроструктуры проката от степени накопленной пластической деформации в условиях стана 370/150 .....	125

<i>Савченко С. А., Слепнев Г. А., Астапенко И. В.</i> Оптимизация сфероидизирующего отжига бунтового проката из стали ШХ15 в условиях сортопрокатного цеха № 2.....	129
<i>Синенький Н. В., Жаранов В. А.</i> Рециклинг шлаков черной металлургии и литейного производства .....	132
<i>Кухаренко В. В., Вальковский А. Ю., Астапенко И. В.</i> Конечно-элементный анализ пластического течения металла овальной полосы при прокатке в гладких бочках .....	136

---

### Секция III. ЭНЕРГЕТИКА

---

<i>Шунулина В. В., Козлова Д. Н., Аветисян Т. В., Преображенский А. П.</i> Оценка экологического риска при анализе окружающей среды, связанного с воздействием источников энергии .....	139
<i>Какабаев А. С., Джумаев А. Я.</i> Экономическая целесообразность производства «зеленого» водорода .....	142
<i>Агаджанова М. Б., Абдыкадырова О. Н.</i> Проектирование координатного движения многодвигательного электропривода.....	145
<i>Байрамов А. Б., Бабаев Б. М.</i> Перспективы и проблемы объединения межгосударственных и межрегиональных электроэнергетических систем .....	148
<i>Чарыева З. М., Тораева Э. Я.</i> Возможности использования тепловых насосов в Туркменистане .....	150
<i>Падрез А. С., Кляусова Ю. В.</i> Проблематика использования мазута в энергетике .....	153
<i>Касач А. Д., Кричко И. А., Разумейчик А. В., Кляусова Ю. В.</i> Электротехническая сталь. Современные способы изготовления.....	155
<i>Буйвид А. П., Мойсееня М. А., Радкевич А. А., Павлюковец С. А.</i> Конструктивные особенности расположения силовых узлов вентильных электродвигателей с аксиальным магнитным потоком.....	157
<i>Янчук В. В., Романюк В. Н.</i> Абсорбционный тепловой насос с газовым приводом в системе регенеративного подогрева питательной воды тепловой электростанции.....	159
<i>Островская Д. В., Маршалова Г. С.</i> Экспериментальное исследование влияния площади выходного отверстия вытяжной шахты теплообменника воздушного охлаждения на теплоотдачу однорядного пучка оребренных труб с учетом их внешнего загрязнения .....	161
<i>Быковский Н. О., Вальченко Н. А.</i> Применение ТНУ в системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий на примере Открытого Акционерного общества «Гомсельмаш».....	164
<i>Шамберова Е. А., Кулеш А. А., Макеева Е. Н.</i> Анализ качества поверхностных водоисточников предприятий энергетики г. Гомеля и Гомельской области .....	166
<i>Меньшиков В. О., Панфилов А. М., Жуковец С. Г.</i> Нейросетевые технологии для мониторинга за высоковольтным оборудованием .....	169
<i>Гончаров М. Г., Зализный Д. И.</i> Применение матричного метода узловых потенциалов для расчета низковольтных трехфазных электрических сетей .....	171
<i>Далинчук А. М., Селиверстов Г. И.</i> Электрические и режимные параметры компактных воздушных линий электропередачи сеточного типа .....	173
<i>Веремева Д. И., Павлов В. В., Зализный Д. И.</i> Моделирование графиков электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда .....	177
<i>Маниюкевич М. С., Жуковец С. Г.</i> Цифровой двойник для электрических сетей .....	180

---

<i>Ганущак Д. А., Алферова Т. В.</i> Оптоволоконные каналы связи в оперативных цепях подстанций .....	182
<i>Вегера М. А., Алферова Т. В., Широков О. Г.</i> Помехогенерирующее сварочное оборудование и его вклад в искажение кривых напряжения и тока .....	185
<i>Вегера М. А., Коришунов К. Е., Костюченко И. Д., Рудченко Ю. А.</i> Анализ способов защиты от блуждающих токов .....	188
<i>Костюченко И. Д., Алферова Т. В., Широков О. Г.</i> Область применения современных источников света и их электрические характеристики .....	191
<i>Маркевич В. А., Алферова Т. В.</i> Разработка требований к аппаратной части для цифровизации открытых распределительных устройств 35 и 110 кВ.....	194
<i>Мастепанов Р. Э., Овсяник А. В.</i> Применение теплового насоса в процессе конденсации паров рабочего тела тригенерационной установки .....	197
<i>Коришунов К. Е., Алферова Т. В.</i> Оценка параметров энергоэффективности от применения силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали в системах электроснабжения .....	199
<i>Бабына В. А., Добродей А. О.</i> Оптические трансформаторы тока .....	202
<i>Заяц В. А., Добродей А. О.</i> Искусственный интеллект в энергетике .....	205
<i>Колмачева П. С., Таран А. В., Никулина Т. Н.</i> Сравнительный анализ экспериментальных данных пародинамического термосифона с внутренними циркуляционными вставками и термосифона классической конструкции .....	208
<i>Ковальчук А. А., Макеева Е. Н.</i> Энергетическое топливо на основе дизельных дистиллятов вторичной перегонки.....	211
<i>Сарыев К.</i> Комбинированное использование фотоэлектрических солнечных и ветряных установок параллельно с традиционными электрическими сетями для бесперебойного электроснабжения децентрализованных потребителей .....	214
<i>Белаш А. А., Жуковец С. Г., Алферова Т. В.</i> Экономические аспекты применения беспилотных летательных аппаратов в Гомельских электрических сетях .....	217
<i>Агунович К. А., Макеева Е. Н.</i> Показатели качества артезианской воды в зависимости от глубины водоносного пласта .....	220
<i>Овулягулыев А.</i> Повышение энергоэффективности и эксплуатационной надежности систем обеспечения параметров микроклимата животноводческих зданий и сооружений .....	223
<i>Чарыева О., Непесов Э., Алланов Г. Ч., Мухамметниязов А. А.</i> Пути увеличения надежности сетей низкого напряжения в Туркменистане.....	226
<i>Бондарев Ю. И., Добродей А. О.</i> Инновации робототехники в энергетике.....	230

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ, ДИАГНОСТИКИ, ЛЕЧЕНИЯ, РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ ПОЗВОНОЧНИКА И ПАРАЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

**В. В. Комраков**

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

*За последние восемь лет на кафедре «Информационные технологии» было реализовано несколько проектов по работе с биомедицинскими изображениями. Приводятся описание этих проектов, цели, задачи, особенности реализации и основные результаты работы. Рассмотрены проекты, связанные с дегенеративно-дистрофическими заболеваниями поясничного отдела позвоночника, а также с заболеваниями паращитовидной железы.*

**Ключевые слова:** биомедицинские изображения, дегенеративно-дистрофические заболевания поясничного отдела позвоночника, 3D-модель, биомеханика, кинематика, напряженно-деформированное состояние, классификация, сегментация, нейронные сети глубокого обучения, паращитовидная железа, гиперпаратиреоз, машина опорных векторов.

За последние несколько лет на кафедре «Информационные технологии» ГГТУ им. П. О. Сухого было успешно реализовано несколько проектов, не характерных для технического вуза. В этих проектах было создано различное программное обеспечение для обработки медицинских изображений с помощью методов искусственного интеллекта. В этой статье приводится историческая информация о начале активной деятельности над некоторыми направлениями исследований. В настоящее время эта работа продолжается с применением высокопроизводительного оборудования и современных инструментов для работы с медицинскими данными.

Первый проект преподаватели кафедры начали реализовывать в 2016 г. при финансовой поддержке Главного управления по здравоохранению Гомельского областного исполнительного комитета. Проект, имеющий название «Разработка программных средств для оценки биомеханики, планирования и прогнозирования способа хирургического вмешательства у пациентов с дегенеративно-дистрофическими заболеваниями позвоночника на основе медицинского изображения» удалось выполнить менее чем за два года.

Объектом исследования являлись дегенеративно-дистрофические заболевания поясничного отдела позвоночника (ДДЗП). Этот отдел состоит из пяти наиболее крупных позвонков, на которые действует наибольшая нагрузка. Неудивительно, что здесь часто возникают медицинские проблемы, особенно сильно подвергаются воздействию межпозвоночные диски. Данные заболевания являются очень распространенными во всех странах мира. Клинически они проявляются сильными болевыми ощущениями и неврологическими выпадениями. Как следует из данных статистики, на долю ДДЗП приходится от 70 до 86 % всех случаев временной утраты трудоспособности по причине заболеваний нервной системы. Около 10 % пациентов с ДДЗП становятся стойкими инвалидами. Если учесть, что изменения в дисках на поясничном уровне возникают в основном у лиц трудоспособного возраста, то проблема приобретает серьезное социально-экономическое значение.

При этом часто результаты оперативного лечения признаются неудачными с возникновением синдрома неудачно оперированного позвоночника или болезнью оперированного диска.

Новым направлением современной хирургии является планирование операции на основании данных предоперационного обследования, посредством создания виртуальной модели области интервенции. Для этой цели было создано программное средство «Волот», главное окно которого показано на рис. 1.

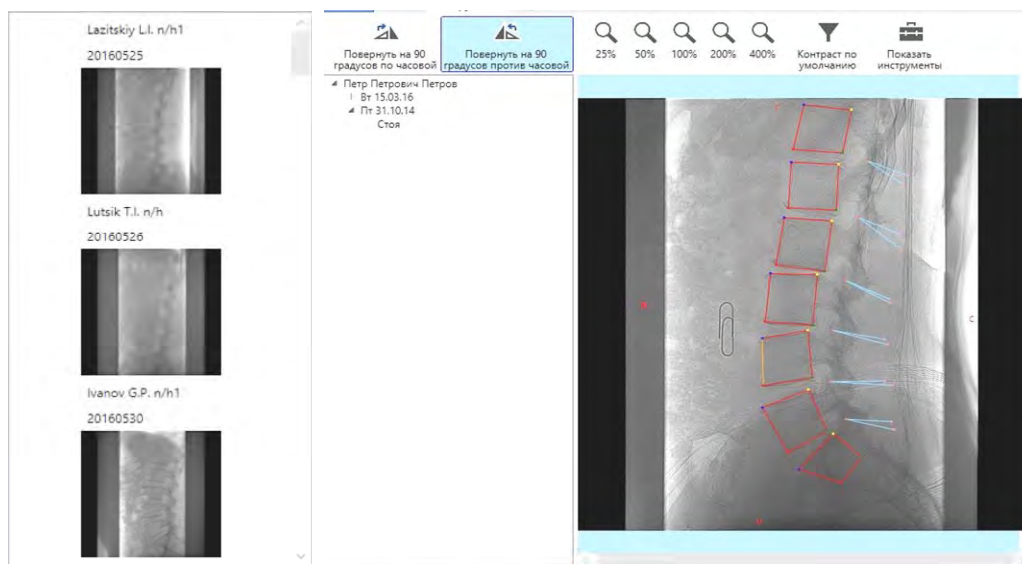


Рис. 1. Главное окно приложения «Волот»

Программное средство «Волот» является Windows приложением. Предназначено для применения в неврологии, нейрохирургии и может использоваться в неврологических, нейрохирургических отделениях районного, межрайонного, областного и республиканского уровня для определения биомеханических параметров и оценки кинематики поясничного отдела позвоночника в послеоперационном периоде.

Программное средство обладает следующими функциями:

- 1) добавление пациента и его рентгеновских снимков в базу данных;
- 2) работа с изображениями рентгеновских снимков (поворот, масштабирование яркость, контрастность и др.);
- 3) выделение позвонков, других вспомогательных элементов;
- 4) определение геометрических параметров позвоночно-двигательных сегментов;
- 5) сравнительный анализ снимков, получение отчета или заключения.

Патологические процессы, развивающиеся в позвоночно-двигательных сегментах, неизбежно приводят к нарушению его двигательной функции, а, следовательно, регистрация этих нарушений даст возможность обосновать диагноз и выбрать адекватную тактику лечения [1–3].

Разработанный программный продукт в полуавтоматическом режиме проводит измерения и вычисления геометрических характеристик структур позвоночного столба, что значительно снижает трудоемкость процесса оценки спондилограмм, повышает диагностическую ценность исследования и позволяет унифицировать их математическое описание. Автоматическое создание базы данных систематизирует и облегчает дальнейшую постпроцессинговую обработку полученного массива данных.



Результаты работы были внедрены в учреждения «Гомельская областная клиническая больница», а также была пройдена регистрация объекта интеллектуальной собственности – компьютерной программы «Волот» в Национальном центре интеллектуальной собственности.

Продолжением исследования заболеваний позвоночника являлась научно-исследовательская работа «Математические и программные средства для исследования биомеханики позвоночно-двигательных сегментов поясничного отдела у пациентов с дегенеративно-дистрофическими заболеваниями позвоночника на основе многослойной компьютерной томографии». Работа выполнялась в рамках Государственной программы научных исследований «Конвергенция – 2020» в 2016–2020 гг.

Программное средство «Волот» из предыдущего проекта может создавать упрощенную двумерную модель поясничного отдела позвоночника в виде набора чертыехугольников, что является достаточным для традиционной оценки состояния позвоночника с использованием медицинских изображений, полученных на широко распространенных рентгеновских аппаратах.

С внедрением в клиническую практику КТ и МРТ, точность диагностики патологических изменений в структурах позвоночного столба существенно возросла. При этом было установлено, что у большинства пациентов не было клинического проявления, т. е. эти изменения были обнаружены при отсутствии какой-либо симптоматики [3].

Для разработки новых передовых методов лечения в работе использовались КТ медицинские изображения, которые в первую очередь применялись для построения высокоточной 3D-модели поясничного отдела позвоночника (рис. 2, а).



а)



б)

Рис. 2. Исходные данные и результаты работы приложения  
а – КТ-изображения; б – 3D-модель позвоночника

При хирургическом лечении дегенеративных заболеваний позвоночника врач старается устранить компрессию нервно-сосудистых образований с одновременной стабилизацией позвоночных сегментов. Однако решение об объеме декомпрессии и способе фиксации хирург принимает самостоятельно, основываясь на визуальном изучении серии КТ-изображений. Для обоснованного назначения объема хирургического вмешательства хирургу необходимо построить точную виртуальную модель позвоночника. Трехмерное изображение позволяет досконально изучить анатомо-топографические особенности в зоне вмешательства, выбрать оптимальный доступ и минимизировать объем резекции связок и костных структур позвоночника.

Коллективом преподавателей кафедры было создано программное обеспечение, которое на основании серии КТ-изображений в DICOM формате строит 3D-модель поясничного отдела позвоночника (рис. 2, б).

На первом этапе проведена автоматизация распознавания анатомических элементов позвонков L1–L5 поясничного отдела позвоночника на КТ-изображении с помощью модифицированной сверточной нейронной сети глубокого обучения Inception-v3. В результате работы нейронной сети получили несколько групп изображений, на которых имелись изображения сечений позвонка с различными анатомическими элементами. Примеры изображений из разных групп приведены на рис. 2, а.

На втором этапе с помощью другой нейронной сети для каждой группы изображений проводился процесс сегментации, т. е. выделения области сечения позвонка.

На третьем этапе применялся метод реконструкции трехмерной поверхности объекта по его двумерным контурам сечений – метод шагающих кубов.

Однако у 3D-модели позвоночника (рис. 2, б) отсутствуют межпозвонковые диски, в которых в первую очередь возникают патологические изменения. На КТ-изображениях межпозвонковые диски совпадают по цвету с окружающими позвонки структурами мягких тканей из-за чего их очень трудно выделить. Был разработан еще один программный комплекс для решения задачи восстановления изображений межпозвонковых дисков на основе анализа КТ-изображений.

В качестве косвенного источника данных для определения их расположения и формы применяли аналогичные геометрические параметры покровной и базальной замыкательных пластин двух соседних позвонков. Для сегментации межпозвонковых дисков показала лучшие результаты предобученная нейронная сеть EfficientNet. Результаты выделения областей межпозвонковых дисков показаны на рис. 3.

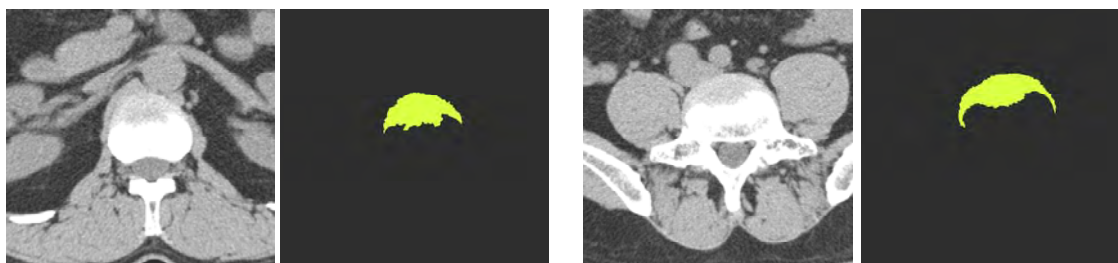


Рис. 3. Результаты определения границы межпозвонковых дисков

Получив полную 3D-модель, перешли к биомеханическому моделированию кинематики и напряженно-деформированного состояния позвоночника. В этом случае реальный человеческий орган заменялся виртуальной моделью, в основе которой лежит взаимодействие ее элементов как единой механической системы. Для опреде-

ления результатов взаимодействия применялся метод конечных элементов. Рассматривались обычные внешние нагрузки, пятикратная перегрузка в кранио-каудальном направлении в норме и на фоне дегенеративно-дистрофических изменений.

Применение компьютерного моделирования для выбора наиболее оптимального и малоинвазивного вмешательства позволяет снизить длительность стационарного этапа лечения и улучшить качество жизни пациентов в послеоперационном периоде, имеет существенное значение как в практическом здравоохранении, так и в обучении хирургов, выполняющих операции на позвоночнике.

Третий проект осуществлялся совместно с медицинскими специалистами государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека». Проект «Разработка системы управления базой данных для хранения и поиска структурных компонентов тканей парашитовидной железы» предназначен для определения патологий тканей парашитовидной железы.

Исходными данными является видеопоток с устройства, оснащенного конфокальным лазерным микроскопом, отдельные кадры которого показаны на рис. 4.

Целью работы являлось улучшение результатов топической диагностики заболеваний парашитовидных желез с использованием метода конфокальной лазерной микроскопии. Необходимо было определить одну из опасных патологий – гиперпаратиреоз, который ведет к повышению уровня кальция в крови, нарушению фосфорно-кальциевого обмена и патологическим изменениям, происходящим в первую очередь в костной ткани и почках.

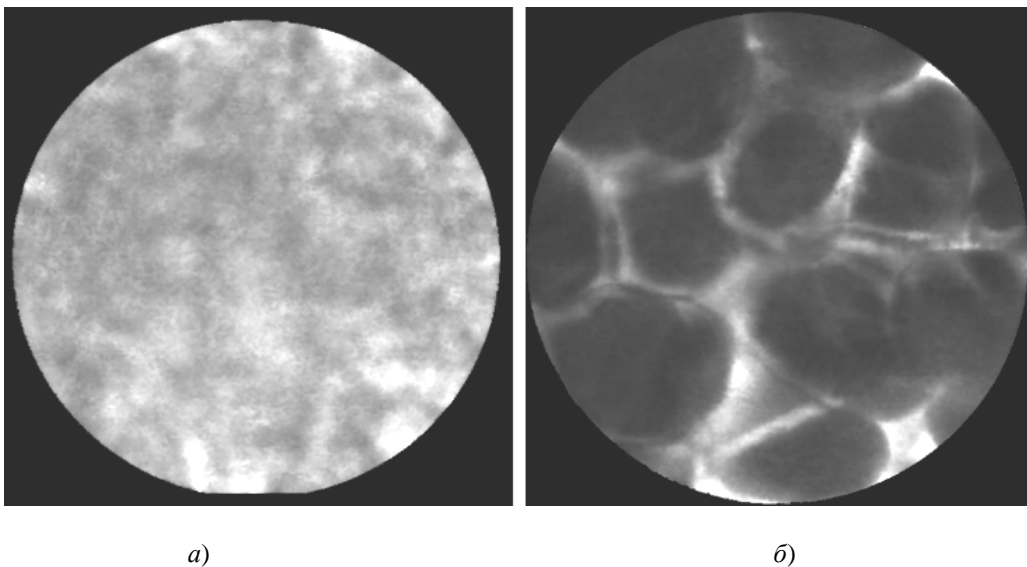


Рис. 4. Изображения парашитовидной железы  
а – ткань с патологией; б – здоровая ткань

При решении задачи бинарной классификации применялся метод опорных векторов, заключающийся в поиске некоторой линейной функции, которая разделяет набор данных на два класса. При этом применялись несколько дескрипторов для изображений, один из которых – значение усредненных гистограмм – показан на рис. 5.

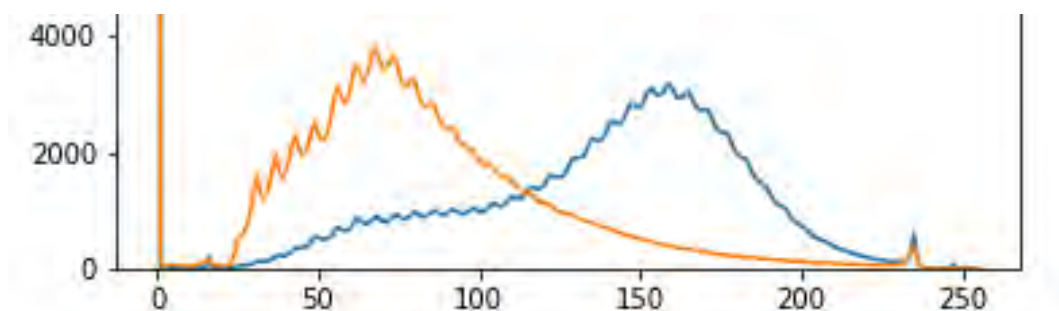


Рис. 5. Усредненные гистограммы

На рис. 5 показан график гистограммы оранжевого цвета для ткани с патологией, изображенной на рис. 4, а, и график синего цвета для здоровой ткани, изображенной на рис. 4, б.

Разработанное программное обеспечение позволило улучшить результаты топической диагностики заболеваний парацитоидных желез с использованием метода конфокальной лазерной микроскопии и методов машинного обучения с 69 до 86 % по сравнению с традиционными лабораторными исследованиями.

Во время работы над проектами необходимо отметить активное участие заведующего кафедрой «Информационные технологии» ГГТУ им. П. О. Сухого К. С. Курочки, заведующего нейрохирургическим отделением № 1 ГОКБ Е. Л. Цитко, заведующего отделением трансплантологии ГУ «РНПЦ РМиЭЧ» А. В. Величко.

#### Литература

1. Зиннатова, Н. Х. Биомеханический метод диагностики состояния позвоночника в норме и при патологиях / Н. Х. Зиннатова / Изв. ЮФУ. Техн. науки. – 2009. – № 10. – С. 108–113.
2. Гладков, А. В. Клиническая биомеханика в диагностике патологии позвоночника / А. В. Гладков, Е. А. Черепанов // Хирургия позвоночника. – 2004. – № 1. – С. 103–109.
3. Ахмедов, Ш. Ч. Статика и биомеханика позвоночника в норме: обзор / Ш. Ч. Ахмедов, А. Р. Сатторов, А. К. Кобиллов // Неврология. – 2013. – № 3. – С. 44–49.

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

**И. В. Астапенко**

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

*Представлены результаты исследования влияния длительности временных выдержек при циклическом (маятниковом) сфероидизирующем отжиге бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15 на степень полноты трансформации пластинчатого перлита в зернистый. Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм, прокатанной по усовершенствованному режиму, позволяющему получить исходную мелкодисперсную перлитную структуру с межпластинчатым расстоянием 0,126–0,235 мкм и размером пластин цементита не более 0,8 мкм.*

**Ключевые слова:** подшипниковая сталь, сфероидизирующий отжиг, исходная структура, пластинчатый перлит, маятниковый (циклический) отжиг, время циклических изотермических выдержек, обезуглероженный слой, цементитные пластины и глобулы.

### Введение

Классическая теория обработки металлов давлением как раздел прикладной механики деформируемого твердого тела, определяющий инженерные методы решения упрощенных задач механики деформируемого твердого тела, сложилась как наука примерно в 20-х гг. прошлого века. Идущая ей на смену наука, называемая «Теория компьютерного моделирования процессов ОМД», в настоящее время интенсивно развивается. Вариационные принципы механики известны давно, но развитие численного метода решения задач механики – метода конечных элементов (МКЭ), использующего эти принципы, началось примерно с середины 50-х гг. прошлого века.

В процессе прокатки заготовка формируется посредством нескольких проходов через валки с различной формой калибров. Для повышения эффективности производства и качества продукции при моделировании процесса должно быть оптимизировано количество проходов и калибровка валков. Численный анализ процесса прокатки позволяет уменьшить число проб и ошибок на стадии проектирования и учесть влияние параметров процесса, таких как напряжение, интенсивность деформации и распределение температуры, на заготовку, информацию о которых трудно получить экспериментально.

В настоящее время существуют различные коммерческие конечно-элементные системы автоматизированного проектирования, такие как Simufact Forming, DEFORM, QFORM, MARC, LS-DYNA, ABAQUS, в которых имеется возможность моделирования различных процессов обработки металлов давлением (ОМД).

Все современные системы моделирования в значительной степени базируются на численных методах анализа, наиболее эффективным из которых является МКЭ. Исследование технологических процессов ОМД проводится на конечно-элементных моделях, описывающих движение сплошной среды на основе подхода Лагранжа. Объем деформируемой заготовки разбивается на элементарные объемы, образующие сетку лагранжевых конечных элементов, узлы которой принадлежат материалу заготовки.

Однако моделирование такого процесса, как прокатка требует часов машинного времени. При разработке оптимальных режимов деформации и конструировании оборудования время расчета является одним из важных факторов. В связи с этим многие исследователи заняты поиском «быстрого» алгоритма, который не приведет к существенному снижению адекватности полученных расчетов.

Исследованию технологических параметров и износа валков при горячей прокатке различных сортов профилей посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. Кроме того, затруднено установление закономерностей распределения износа и связанных с ним факторов по контактной поверхности, поскольку расчет последних в ранних работах выполнен с большим количеством допущений и упрощений. Существующие модели, применяемые для прогнозирования износа валков, недостаточно учитывают особенности пластической деформации, а также содержат в своей структуре неопределенные по величине и смыслу эмпирические коэффициенты [1].

Изложенное выше позволяет считать актуальным проведение исследований методами численного моделирования процессов горячей сортовой и трубной прокатки с целью совершенствования калибровки валков и режимов горячей прокатки сорта и труб на непрерывных станах. Наибольший интерес представляет применение численного моделирования при разработке или совершенствовании калибровки валков.

**Совершенствование калибровки валков горячей сортовой прокатки.** Процесс прокатки в черновой группе клетей (ЧГК) стана 320 имеет ряд особенностей. Все восемь клетей ЧГК имеют горизонтальное расположение валков. Обжатие осуществляется в парах калибров «овал – круг», с последующей кантовкой раската после осесимметричного калибра. Для этого за нечетными клетями установлены кантовочные коробки для упругопластического поворота полосы на угол  $90^\circ$ .

Калибровка валков первой клетки должна обеспечивать надежный захват при высокой деформирующей способности, однако штатный калибр не удовлетворял этим условиям – захват был ненадежным и на поверхность калибров электросваркой наносились «шипы», существенно снижавшие ресурс эксплуатации валка (рис. 1).

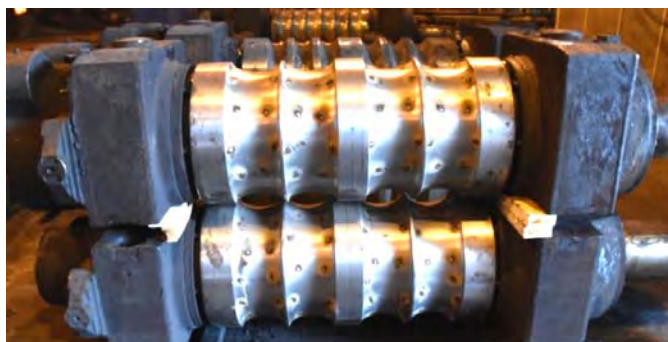


Рис. 1. Валковый блок клетки № 1 стана 320 с нанесенной сварочной шагренью

Калибр валка в клетке № 1 имеет геометрию профиля типа «3-радиусный овал» (рис. 2). Такие калибры нашли широкое применение на средне-, мелкосортных и проволочных станах.

Достоинства калибра:

- высокая вытяжная способность ( $\lambda$  до 2,0), что позволяет поддерживать высокую температуру раската, уменьшить число пропусков и снизить расход энергии;
- калибры имеют относительно небольшую глубину ручья.

Недостатки калибра:

- неравномерное распределение деформации по ширине калибра, что приводит к увеличению напряжения в металле, быстрому износу валков и увеличению расхода энергии;
- плохая устойчивость овальной полосы в последующем круглом калибре.

Также необходимо отметить, что при глубоком термоциклическом износе калибра, съем металла при переточке, которая достигает 20 мм за съем, на выпусках сильно ограничен. Поэтому валки после 2-й или 3-й переточки приходится списывать.

Эти недостатки значительно осложняют работу стана, поскольку черновая группа клетей № 1–8 имеет универсальную калибровку для всего профильного и размерного сортамента стана.

Для решения указанных проблем был разработан усовершенствованный вариант калибра 1-й клетки. Вместо трехрадиусного базового калибра (рис. 2, а) была предложена схема с прямыми выпусками (рис. 2, б).



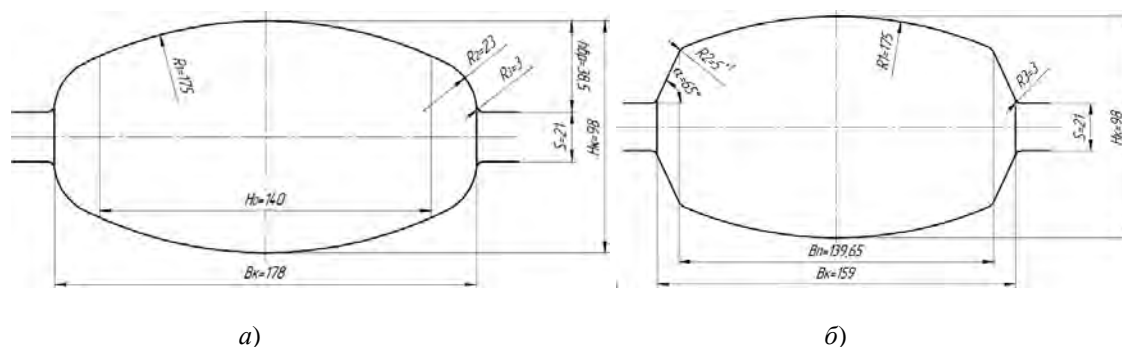


Рис. 2. Геометрия калибра валка в клети № 1:  
а – базовый вариант; б – усовершенствованный вариант

Оценка эффективности усовершенствованной геометрии выполнена численным моделированием по МКЭ в программном пакете SimufactForming с наложением на заготовку сетки конечных элементов с размером ячейки 2 мм.

Simufact Forming является универсальной программой компьютерного моделирования для расчета процессов деформирования металлов. Этому способствует адекватность моделей технологического процесса, а также точное описание реологического поведения металла в условиях деформации. В Simufact Forming доступны все инструменты для эффективного моделирования и расчета, независимо от температуры процесса, используемого оборудования или обрабатываемых материалов.

Эффективность усовершенствованного калибра № 1 оценивалась по следующим параметрам:

- 1) захватывающая способность;
- 2) заполнение калибра;
- 3) совместимость полученной геометрии раската с калибром клети № 2 (устойчивость полосы).

На первом этапе была построена базовая численная модель в соответствии с действующим технологическим процессом. Исходные данные параметров технологического процесса представлены в таблице. Материал валков в клетях № 1 и 2 – сталь 150ХНМ. Непрерывнолитая заготовка квадратного сечения  $140 \times 140$  мм.

#### Исходные данные численного эксперимента процесса прокатки в клетях № 1, 2

Технологические параметры	Клеть № 1	Клеть № 2
Диаметр валков $D_v$ , мм	560	560
Катающий диаметр валков $D_k$ , мм	497	491
Межвалковый зазор $S$ , мм	21	18
Высота калибра $H$ , мм	98	111
Ширина полосы в калибре $B$ , мм	159	115
Скорость прокатки $v$ , м/с	0,519	0,693
Частота вращения валков $n$ , об/мин	20,098	28,956
Температура полосы на входе в клеть № 1 $T_0$ , °С	1130	–

По результатам численного эксперимента анализировались геометрия очага деформации, заполнение калибра и энергосиловые параметры процесса.

**Оценка захватывающей способности.** Захват в базовом калибре (рис. 3, а) двухточечный, происходит по дуге дна калибра радиусом 175 мм при нестабильном положении полосы. Это ухудшает условия захвата. Контакт полосы на входе в усовершенствованном калибре четырехточечный, происходит по радиусу дна калибра и боковым выпускам с требуемым заземлением полосы (рис. 3, б). При этом геометрия с плоскими выпусками имеет лучшее удаление окалины.

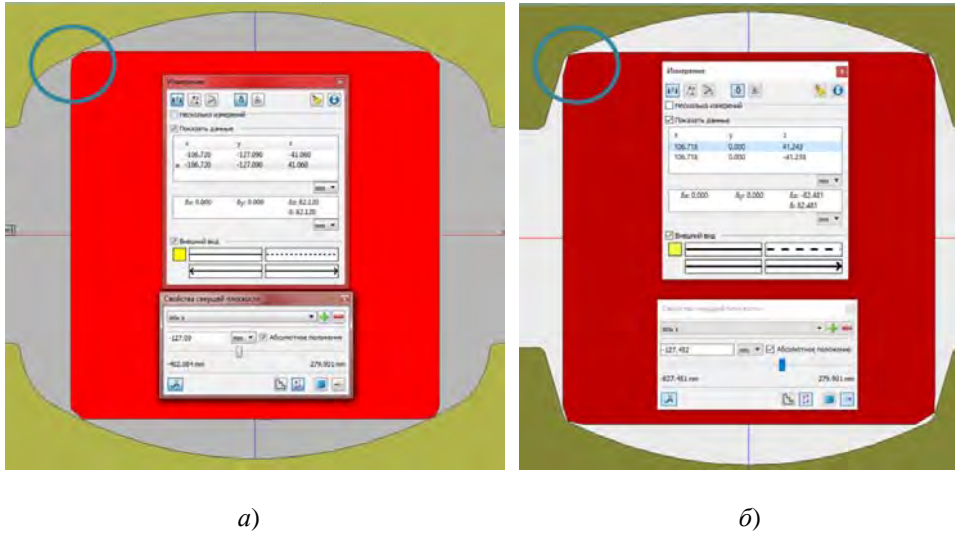


Рис. 3. Сечение на входе в очаг деформации калибра валка клетки № 1:  
а – базовый вариант; б – усовершенствованный вариант

**Оценка заполнения калибра.** Оценка заполнения базового калибра на выходе из очага деформации (рис. 4, а) показывает, что длина «холодного» выпуска, не имеющего контакт с полосой, значительна. Это приводит к возникновению больших термодинамических напряжений, а значит и быстрому износу на выпусках калибра. Кроме этого свободное положение полосы в калибре в поперечном направлении из-за последующей кантовки приводит к ее смещению и неравномерной выработке калибра [2]. Усовершенствованный калибр указанных недостатков не имеет, металл в межвалковый зазор не вышел (рис. 4, б).

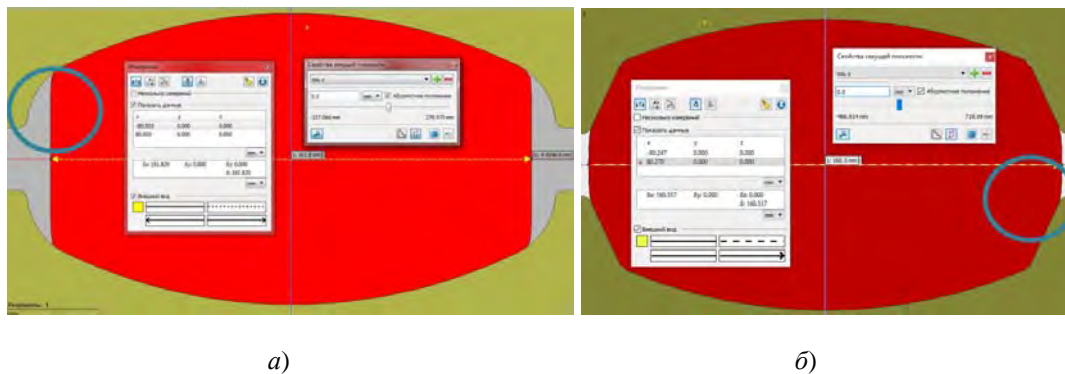


Рис. 4. Сечение на выходе в очаг деформации калибра валка клетки № 1:  
а – базовый вариант; б – усовершенствованный вариант



### Оценка совместимости полученной геометрии раската с калибром клетки № 2.

При оценке совместимости усовершенствованного калибра оценивалось качество контакта на входе в калибр (рис. 5, а) и заполнение на выходе из очага деформации (рис. 5, б). Захват происходит по четырем точкам с высокой устойчивостью полосы в калибре. Заполнение калибра полное, без холодных выпусков. Следовательно, совместимость усовершенствованного калибра клетки № 1 с последующим № 2 можно считать полной.

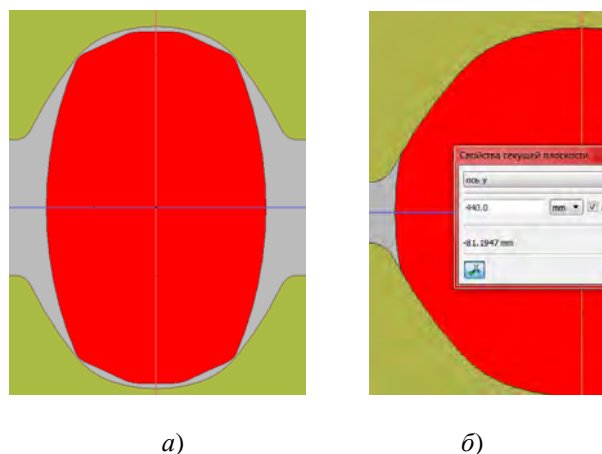


Рис. 5. Форма и геометрия очага деформации в клетки № 1 для 5-го эксперимента:

а – сечение на входе в очаг деформации; б – сечение на выходе из очага деформации

По результатам численных экспериментов была определена оптимальная геометрия калибра № 1. Ширина калибра позволяет расположить на бочке вала 5 калибров (рис. 6).

Предлагаемая компоновка имеет следующие преимущества:

- увеличение калибра с 4 до 5 позволяет более на 25 % увеличить ресурс вала за счет увеличения возможных переточек;
- увеличение длины буртов между калибрами улучшает температурный режим прогрева выпусков и облегчает переточку, что также приводит к увеличению ресурса вала.

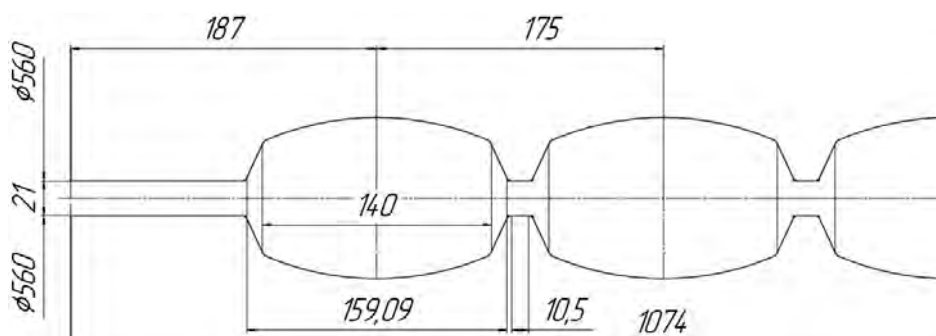


Рис. 6. Предлагаемая компоновка калибров на бочке вала № 1

Усовершенствованный с помощью численного моделирования калибр клетки № 1 успешно внедрен в прокатном производстве на стане 320. Заявленные преимущества калибра были подтверждены в условиях действующего технологического процесса.

#### Литература

1. Стрельченко, А. В. Исследование влияния геометрии ящичных калибров валков на образование термоциклических трещин в условиях мелкосортно-проволочного стана горячей прокатки 370/150 ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «БМК» / А. В. Стрельченко, И. А. Зуев, И. В. Астапенко // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2019. – Т. 75, № 1. – С. 80–86.
2. Численное моделирование процесса прокатки трубы D 88,9×8 на редуционно-растяжном стане трубoproкатного агрегата ТПА 21/168 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / М. В. Оборов [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2016. – № 3 (1395). – С. 82–86.

### ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТУРИЗМ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ: МАРКЕТИНГОВЫЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ

**Е. Н. Карчевская, Ю. А. Галова, В. А. Сидоркина**

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

*Рассмотрены промышленный туризм как вид городских исследований, история и основные этапы промышленного туризма, популярные для посещения объекты, стоимость посещения и доходы от промышленного туризма, влияние кинематографа на формирование и развитие промышленного туризма, туристское предложение и перспективы развития промышленного туризма.*

**Ключевые слова:** промышленный туризм, индустриальный туризм, городские исследования.

Актуальность настоящего исследования обусловлена решением Министерства спорта и туризма Республики Беларусь посвятить в 2024 г. каждый месяц одному из 13-ти видов туризма, в число которых входит и промышленный туризм. Для развития различных видов туризма предполагаются мероприятия, включающие образовательные семинары, пресс-конференции, круглые столы, мастер-классы, профориентационные экскурсии, дни «открытых дверей» на предприятиях и другие мероприятия, направленные на популяризацию промышленного туризма [4].

Индустриальный (промышленный) туризм рассматривается как вид городских исследований, а также направление в туристическом бизнесе, включающее в себя промышленные объекты, часто характерные для конкретного места. Формами промышленного туризма являются экскурсии как на постиндустриальные объекты (заброшенные и неработающие), так и на действующие [1].

Историю промышленного туризма принято вести с 1866 г., когда первую экскурсию предложил завод по производству виски Jack Daniel's в США. Рынок промышленного туризма начал формироваться в середине XX в., интенсивный его рост начался с 90-х гг. прошлого века. Первыми направлениями промышленного туризма были винные туры во Францию, посещение сыроваров в Нидерландах. В настоящее время популярными становятся для посещения туристов объекты промышленного наследия и современной промышленности. Со временем появились и международные организации [8, 9].

В развитии промышленного туризма выделяют три основных этапа.

Первый характерен для XVII–XIX вв. Его отличительные особенности связаны с посещением туристами объектов промышленности с познавательной и образовательной целью, отсутствием коммерческих целей, ограниченной доступностью (только для буржуазии и аристократии).

Второй этап характерен для первой половины XX в. В это время промышленный туризм приобретает коммерческую направленность, отличается массовостью посещений промышленных объектов за счет увеличения доходов населения и повышения доступности к туристическим объектам.

Третий (или современный) этап берет начало во второй половине XX века и продолжается в наши дни. Он отличается увеличением числа туристов всех слоев населения. Становится экономически выгодным предприятиям, которые прилагают маркетинговые усилия для продвижения продукта на рынок и привлечения туристов [5].

Как показал анализ, наиболее предпочтительными направлениями промышленного туризма являются города и регионы с развитой промышленной базой, регионы с прекратившими существование предприятиями, а также регионы с объектами Всемирного наследия ЮНЕСКО. Важными условиями для потенциала индустриального туризма являются расположение объектов, доступ к достопримечательностям и доступность информации об объекте.

В промышленном (индустриальном) туризме принято выделять некоторые виды [2]:

1) сталкерство – посещение покинутых, заброшенных объектов (может быть как индустриальным, так и неиндустриальным);

2) инфильтрация – это проникновение на охраняемые территории, действующие промышленные зоны и зоны, не созданные для нахождения в них людей;

3) диггерство – посещение подземных сооружений, бункеров, поиск спецлиний метро и станций-призраков;

4) коммерческий индустриальный туризм – посещение и созерцание индустриальных пейзажей и объектов промышленной архитектуры в ходе экскурсии;

5) индустриальная археология – специальный академический предмет на кафедрах индустриальной археологии при университетах, исследующий взаимовлияния изменений, происходящих в промышленности;

6) руфинг – проникновение на крыши домов и высотные сооружения (бывает экстремальный, тихий, арт-руфинг);

7) психогеография – изучение точных законов и специфических эффектов территориального окружения человека.

Наиболее популярными объектами промышленного туризма в мире являются шоколадная фабрика Cadbury в Великобритании, приливная электростанция «Ля Ранс» во Франции, завод Toyota в Японии, завод BMW в Германии и производство мороженого Ben & Jerry's в США [5] (рис. 1).

В Республике Беларусь промышленный туризм стал развиваться только с 20-х гг. XXI в. Жодинский БЕЛАЗ с 2015 г. посетили более 160 тыс. человек, Минский тракторный завод посетили более 16,5 тыс. человек из 68 стран и более 130 населенных пунктов Беларуси, гомельский «Спартак» ежемесячно посещает около 500 человек.

Стоимость посещения (экскурсии) зарубежных объектов составляет около 10 евро, некоторые заводы можно посетить бесплатно.

Стоимость посещения белорусских объектов промышленного туризма (в зависимости от сложности экскурсии и состава экскурсантов) следующая:

- Белаз – от 10 до 75 руб.;
- Минский тракторный завод – от 6 до 12 руб.;
- Минский завод холодильников «Атлант» – от 6 до 60 руб.;
- «Красный пищевик» – от 12 до 18 руб.;
- Гродненский «Молочный мир» – от 9 до 18 руб.;
- Минский пивзавод «Аливария» – от 12 до 15 руб.;
- «Лидское пиво» – 20 руб.;
- «Кока-Кола Бевриджиз Белоруссия» проводит бесплатные экскурсии по предприятию.

Что касается выручки, то она (например, выручка от туризма у БЕЛАЗа) колеблется от 30 до 60 тыс. руб. в месяц [3].

Важным фактором развития промышленного туризма является психологический. И в этом значительную роль играет кинематограф. Люди стремятся посетить те места и строения, о которых речь идет в фильмах. Наибольший интерес для посещения экранизированных мест вызвали фильмы «Энтузиазм: Симфония Донбасса» (осещени Дзига Вертов, 1930), «Сталкер» (Андрей Тарковский, 1979), «Последняя битва» (Люк Бессон, 1983), «Подземка» (Люк Бессон, 1985), «Кин-дза-дза!» (Георгий Данелия, 1986), «Небо над Берлином» (Вим Вендерс, 1987), «Город» (Александр Бурцев, 1990), «Район Теси: К западу от железной дороги» (Ван Бинь, 2003), «Крип» (Кристофер Смит, 2004), «Туннель смерти» (Филлип Бут, 2005), «Неуправляемый экстрим (После...)» (Дэвид Каннингем, 2006), «Сайлент Хилл» (Кристофер Ганс, 2006), «Prison of the Psychotic Damned» (Дэвид Канн, 2006), «Гадкие лебеди» (Константин Лопушанский, 2006), «Запретная зона» (Брэдли Паркер, 2012), «Чернобыль. Зона отчуждения» (Андерс Банке, 2014–2017) [2].

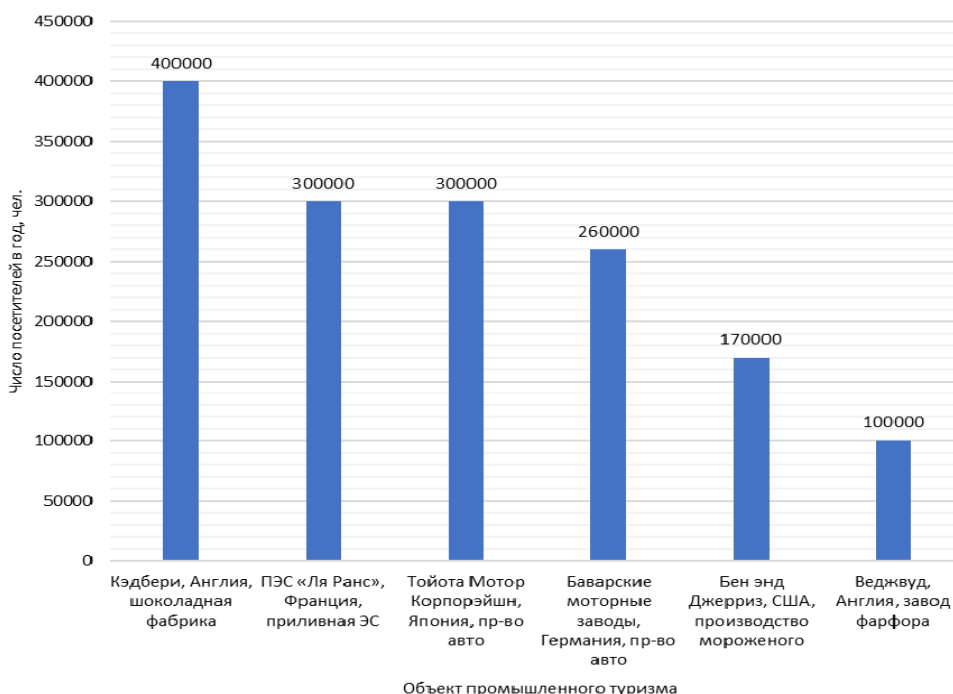


Рис. 1. Статистика наиболее посещаемых промышленных объектов

Как показывает анализ, туристов привлекают либо интересные места съемок, либо места, показанные в интересных фильмах (рис. 2). Есть некоторые приоритеты в таких местах для молодежи и взрослых.

Основными сегментами промышленного туризма являются туристы, инвесторы, студенты, предприниматели, представители бизнес-сообщества. Туристский продукт промышленного туризма разрабатывается в соответствии со стратегией развития регионов и региональной политикой по продвижению имиджа региона. Организаторами выступают туристские компании, торгово-промышленные палаты, промышленные концерны, государственные органы управления туризмом [5].

Наиболее разнообразным туристским предложением отличаются Австрия, Бельгия, Финляндия, Германия, Нидерланды, Норвегия, Польша, Испания, Швеция, Швейцария, Соединенное Королевство [5].

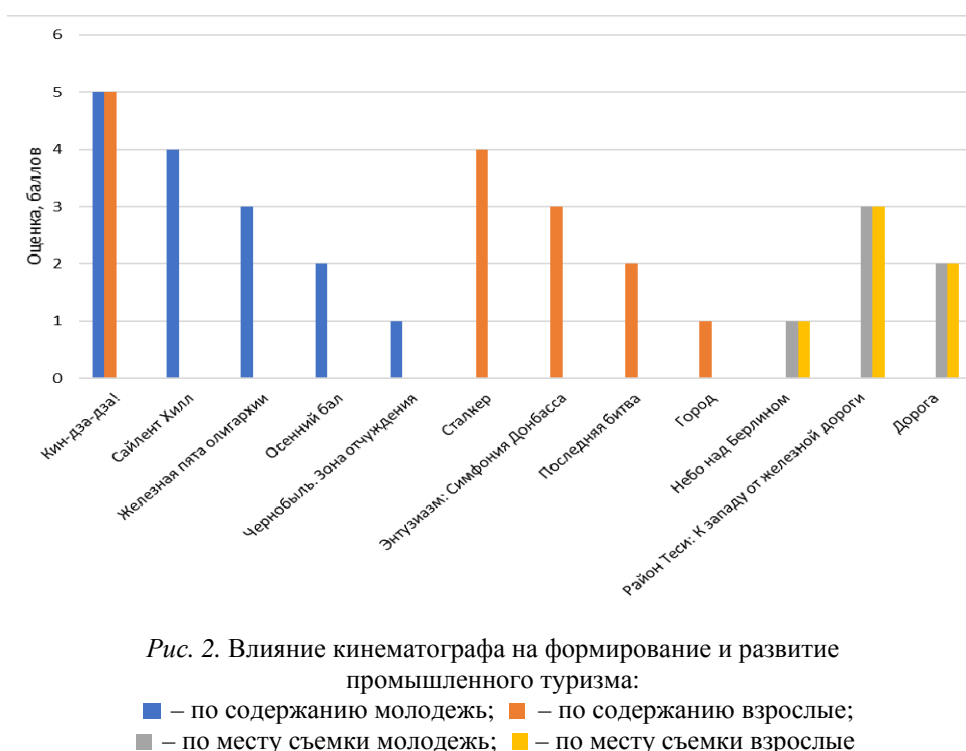


Рис. 2. Влияние кинематографа на формирование и развитие промышленного туризма:  
 ■ – по содержанию молодежь; ■ – по содержанию взрослые;  
 ■ – по месту съемки молодежь; ■ – по месту съемки взрослые

Туристское предложение в Беларуси представлено в нижеприведенной таблице.

**Туристское предложение промышленного туризма в Беларуси [6]**

Область	Количество предприятий, предлагающих промышленные экскурсии	Особенности туристского предложения
Минская	19	Экскурсии по производственным цехам и историческим музеям
Брестская	21	Ознакомление с историей предприятия и экскурсии по производственным цехам
Витебская	28	Экскурсии по предприятиям с посещением музеев и предоставлением мастер-классов (на предприятиях пищевой промышленности)

Область	Количество предприятий, предлагающих промышленные экскурсии	Особенности туристского предложения
Гомельская	12	Обзорные экскурсии по предприятиям; экскурсии по туристическим маршрутам и музеям
Могилевская	22	Предоставление экскурсий на безвозмездной основе; обзорные и профориентационные экскурсии
Минск	11	Ознакомление с тонкостями работы предприятий; обзорные экскурсии
Гродненская	126	Обзорные и профильные экскурсии для школьников; дни открытых дверей и дни предприятий; посещение музеев

Большое внимание уделяется продвижению промышленного туризма. Так, многие бренды представлены в социальных сетях, где ведут активную работу с использованием разнообразных инструментов. Например, итальянский «Lamborghini» имеет в Instagram 45,4 млн подписчиков, немецкий «Mercedes-Benz» – 35,4 млн. Активность белорусских предприятий значительно ниже (на «Савушкин продукт» подписано в Instagram 31 тыс. человек [7]).

Таким образом, промышленный туризм – это перспективное направление в туристском бизнесе. Кроме того, промышленный туризм – это открытие для туристов интересных предприятий, повышение привлекательности территории, а также доходов региональных бюджетов, увеличение количества рабочих мест на предприятиях, стимулирование развития всех отраслей промышленности, инфраструктуры и смежных направлений туризма.

#### Литература

1. Индустриальный туризм. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Индустриальный\\_туризм](https://ru.wikipedia.org/wiki/Индустриальный_туризм). – Дата доступа: 26.04.2024.
2. Индустриальный туризм и городские исследования. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Индустриальный\\_туризм\\_и\\_городские\\_исследования](https://ru.wikipedia.org/wiki/Индустриальный_туризм_и_городские_исследования). – Дата доступа: 26.04.2024.
3. Какие заводы в Беларуси открыты для туристов и сколько это стоит. – Режим доступа: <https://ilex.by/kakie-zavody-v-belarusi-otkryty-dlya-turistov-i-skolko-eto-stoit/>. – Дата доступа: 26.04.2024.
4. Март – месяц промышленного туризма. – Режим доступа: <https://www.belarus-tourism.by/news/mart-mesyats-promyshlennogo-turizma/>. – Дата доступа: 26.04.2024.
5. Никулина, Ю. Н. Промышленный туризм в мировой практике: особенности организации и тенденции развития / Ю. Н. Никулина // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – Оренбург : Оренбург. гос. ун-т, 2017. – С. 40–43.
6. Перечень предприятий и организаций, реализующих услуги по промышленному туризму. – Режим доступа: [https://www.belarustourism.by/vazhnye-dokumenty/Промышленный%20туризм\\_свод%20Республика%20Беларусь.pdf/](https://www.belarustourism.by/vazhnye-dokumenty/Промышленный%20туризм_свод%20Республика%20Беларусь.pdf/). – Дата доступа: 26.04.2024.
7. Производственный туризм и промышленные экскурсии в Беларуси. – Режим доступа: <https://bestbelarus.by/services/industrial-tourism/>. – Дата доступа: 26.04.2024.
8. Boros, L. Industrial tourism – trends and opportunities / L. Boros, Z. Martyin, V. Pal // Forum Geographic / ed. by Studiisicercetari de geografiesiprotectiamediului. – Hungary, 2013. – P. 108–114.
9. Otgaar, A. Industrial tourism: Where the Public Meets the Private / A. Otgaar. – Rotterdam : Erasmus University of Rotterdam, 2014. – 260 p.

# СЕКЦИЯ I МАШИНОСТРОЕНИЕ И НЕФТЕГАЗОРАЗРАБОТКА

---

## РАННЯЯ МОНЕТИЗАЦИЯ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА ПРИ ПОМОЩИ ВНЕДРЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПОДГОТОВКИ ГАЗА В ПЕРИОД ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**М. И. Сабитов**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Тюменский индустриальный университет»,  
Российская Федерация*

Научный руководитель Д. С. Леонтьев

*Описаны актуальные тенденции наземного обустройства нефтегазовых месторождений. Рассмотрен российский опыт блочно-модульного строительства объектов нефтегазовой инфраструктуры. На примере мобильной установки подготовки газа отражена блок-схема и описан принцип работы. Приведены преимущества и недостатки установки перед капитальными решениями при обустройстве месторождений нефти. Выявлены перспективы развития и оценен технико-экономический эффект от внедрения мобильной установки подготовки газа в период опытно-промышленной разработки месторождения.*

**Ключевые слова:** обустройство нефтегазовых месторождений, мобильная установка подготовки газа, попутный нефтяной газ, опытно-промышленная разработка.

Статья направлена на решение актуальной проблематики – оптимизация экономических затрат при наземном обустройстве месторождения в условиях автономии на стадии опытно-промышленной разработки (ОПР). Цель исследования заключается в оценке мобильной установки подготовки газа (МУПГ) на возможность ранней коммерциализации углеводородного сырья и сокращение сроков реализации проекта.

Блочно-модульные установки активно внедряются при обустройстве в условиях логистической и инфраструктурной автономий, наличии геолого-технологических неопределенностей. Главной задачей на стадии ОПР при проектировании объектов месторождения является снижение капитальных вложений (CAPEX). Риски реализация сценария P90 или не подтверждения проектных дебитов скважин возможно митигировать блочно-модульными установками, которые доступны для монтажа/демонтажа на иные перспективные участки месторождения.

В настоящее время российский рынок блочно-модульных технологий широко представлен следующим оборудованием: установки подготовки нефти, установки подготовки газа, установки предварительного сброса воды, дожимные насосные, компрессорные станции и др. Организации, предоставляющие комплексные услуги в данном направлении: АО «МНГИ»[1], ООО «Компания ОЙЛТИМ» [2], АО «Акционерная компания ОЗНА» [3] и др. На примере первой МУПГ АО «МНГИ»[4] отражена блок-схема установки (рис. 1).

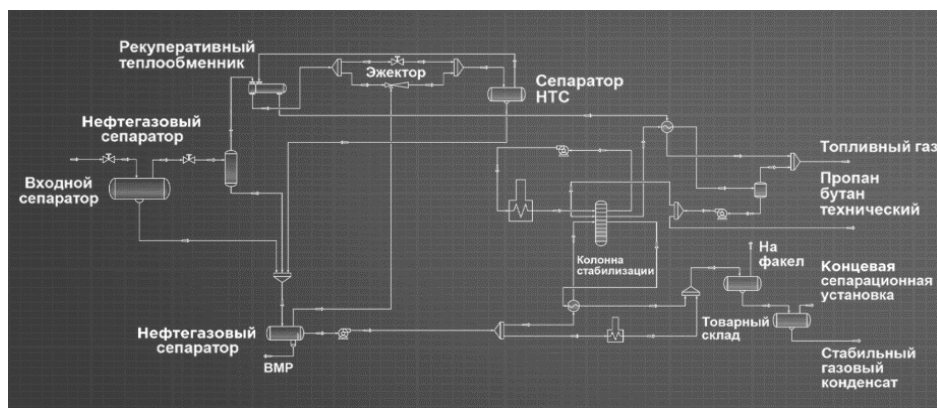


Рис. 1. Блок-схема мобильной установки подготовки газа и газового конденсата

Минимально необходимый перечень оборудования МУПГ производительностью 1500 тыс. м<sup>3</sup>/сутки по газу и 450 т/сут. по газовому конденсату представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Минимально необходимый перечень оборудования мобильной установки подготовки газа**

Технологическое оборудование	Количество, штук	Соответствие российскому производству
Узел редуцирования	1	+
Сепаратор входной	3	+
Теплообменник рекуперативный	1	+
Узел дросселирования	1	+
Сепаратор низкотемпературный	5	+
Узел учета количества и качества сухого отбензиненного газа	1	+
Сепаратор низкого давления	3	+
Емкость хранения стабильного газового конденсата	10	+
Азотно-воздушная станция	1	+
Блок автоматики	1	+
Газопоршневая станция	1	+
Блок дозирования метанола	1	+
Емкость хранения метанола	1	+
Автоналивная станция	3	+
Горизонтальная факельная установка с блоком розжига	1	+
Дренажная емкость	1	+

**Принцип работы МУПГ.** Скважинный флюид поступает на узел редуцирования, где давление понижается до технологически заданного значения. Далее флюид направляется на узел входных сепараторов, газ с входных сепараторов охлаждается в



рекуперативном теплообменнике и затем дросселируется. В ходе дросселирования температура газа принимает значение немного ниже нуля градусов Цельсия. В целях предупреждения гидратообразования перед дросселированием в газ дозируется ингибитор (метанол) с расходом около 50 кг/ч. Охлажденный газ поступает на узел низкотемпературной сепарации, где отбивается капельная влага и тяжелые углеводороды  $C_{5+}$ . Отбензиненный газ после рекуперативного теплообменника поступает на оперативный узел учета количества и качества, далее трубопроводом направляется до точки подключения.

Конденсат с входных сепараторов смешивается с конденсатом с низкотемпературных сепараторов и подвергается нагреву до 70 °С в блочном подогревателе. Далее нагретый конденсат направляется в емкость стабилизации конденсата. Выделившийся газ направляется на сжигание в горизонтальную факельную установку в объеме не более 5 % от всего объема газа согласно Постановлению Правительства РФ от 8 ноября 2012 г. №1148. Стабильный газовый конденсат поступает в товарный парк и далее наливается в автоцистерны.

Вода и насыщенный метанольный раствор с входных и низкотемпературных сепараторов накапливаются в дренажной емкости с последующим автовывозом и утилизацией.

Таким образом, выходной продукцией МУПГ из попутного нефтяного газа являются сухой отбензиненный газ (СОГ), соответствующий требованиям СТО Газпром 089-2010, и стабильный газовый конденсат (СГК), соответствующий требованиям ГОСТ Р 54389–2011. Продукты товарного качества пригодны для монетизации как на внутреннем, так и внешнем рынке.

Приведем результаты сравнительного анализа мобильной и капитальной установок подготовки газа производительностью 1500 тыс м<sup>3</sup>/сут. по газу и 450 т/сут. по газовому конденсату на месторождении X в Западной Сибири (табл. 2).

Таблица 2

### Сравнение мобильной и капитальной установок подготовки газа на примере месторождений

Сравниваемый параметр	Мобильная установка подготовки газа	Капитальная установка подготовки газа
Капитальные затраты (оборудование + монтаж), млн руб.	≈ 1200	≈ 8000
Эксплуатационные затраты, млн руб./год	≈ 300	≈ 1000
Выход СОГ, млн м <sup>3</sup> /год	420	
Выход СГК, тыс. т/год	135	
Период времени от сборки до пуско-наладочных работ, месяцы	3	12
Срок окупаемости, месяцы	7	18
Производительность по газу, тыс. м <sup>3</sup> /сут.	< 2 000	> 40 000
Срок службы, лет	20	> 30

Мобильная установка подготовки газа обоснованно оправдывает себя на этапе ОПР, но при снятии геолого-технологических рисков и переходе на стадию полно-

масштабной разработки МУПГ необходимо демонтировать и возводить капитальную установку подготовки газа.

В результате внедрение мобильной установки подготовки газа, в отличие от традиционного объекта капитального строительства, приводит к снижению сроков реализации проекта и ввода месторождения в эксплуатацию; сокращению доли капитальных и операционных затрат; вариативности технических решений при различных эксплуатационных характеристиках месторождения и свойствах флюида.

#### Литература

1. АО «МодульНефтеГазИнжиниринг». – Режим доступа: [https://mngi.su/oborudovanie/blochnoe\\_oborudovanie/mobilnye-ustanovki-podgotovki-gaza](https://mngi.su/oborudovanie/blochnoe_oborudovanie/mobilnye-ustanovki-podgotovki-gaza). – Дата доступа: 25.03.2024.
2. ООО «Компания ОЙЛТИМ». – Режим доступа: <https://www.oilteam.ru>. – Дата доступа: 25.03.2024.
3. АО «Акционерная компания ОЗНА». – Режим доступа: <https://ozna.ru>. – Дата доступа: 25.03.2024.
4. Первая установка подготовки газа и газового конденсата АО «МодульНефтеГазИнжиниринг». – Режим доступа: <https://mngi.su/docs/buklet.pdf>. – Дата доступа: 01.04.2024.

### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ

Е. А. Фетисова, Н. В. Попов, Д. В. Кутневич, В. Д. Долгая

*Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет», г. Могилев*

Научный руководитель А. О. Коротеев

*Рассмотрен вопрос о влиянии модифицированного состава защитной газовой атмосферы, а также параметров режима при дуговой сварке на переход легирующих элементов из плавящегося присадочного материала в наплавленный металл. Приводятся результаты исследований химического анализа наплавленного металла, полученного в среде  $Ar + CO_2$  и с введением в нее галогенидного газообразного соединения  $SF_6$ .*

**Ключевые слова:** дуговая сварка с модификацией защитной газовой атмосферы  $SF_6$ .

При дуговой сварке плавлением важным фактором в формировании качественного неразъемного соединения является газовая защита области образования сварного шва. Большое значение имеют происходящие металлургические и физико-химические процессы, протекающие в результате взаимодействия расплавленного жидкого металла сварочной ванны с защитной газовой средой и воздухом атмосферы. Результатом взаимодействия указанных выше процессов может быть изменение химического состава сварного шва по сравнению с исходной в нем концентрацией легирующих элементов, что может повлечь за собой снижение таких свойств сварного соединения, как пластичность, ударная вязкость и привести к разрушению конструкции в целом.

Зачастую состав металла шва изменяет содержание химических элементов в результате их взаимодействия с газовыми компонентами защитной среды в момент перехода от торца расплавленного присадочного материала к жидкому металлу сварочной ванны через дуговой промежуток. Продуктами реакции таких взаимодействий могут быть соединения, которые в последующем под высокотемператур-

ным воздействием сварочной дуги, могут «выгорать», тем самым обедняя легирующими элементами будущий сварной шов. Или же, наоборот, компоненты защитной газовой атмосферы вступая в химические связи с расплавленным металлом сварочной проволоки могут образовывать соединения, которые будут способствовать благоприятному переходу легирующих элементов в зону сварочной ванны. При этом на этот процесс оказывают влияние очень многие факторы, например, состав и процентное содержание газовых компонентов защитной среды, температурные показатели области дугового промежутка и сварочной дуги, параметры режима процесса сварки, состав присадочного сварочного материала и др.

Данная работа посвящена исследованию влияния модифицированной защитной газовой атмосферы газообразным соединением  $SF_6$  при различном его процентном соотношении и параметрах режима сварки на переход легирующих элементов в наплавленный металл.

Работы выполнялись на робототехническом комплексе Fanuc с использованием источника питания фирмы Fronius. Химический анализ состава наплавленного металла был проведен на оптико-эмиссионном спектрометре GNR – SCP.

Наплавку образцов выполняли в восемь слоев на металлические пластины низкоуглеродистой неомедненной высокопрочной проволокой EsabOkAristorod 69, химический состав которой приведен в табл. 1. Диаметр сварочной проволоки составлял 1,2 мм. По содержанию легирующих элементов проволока относится к группе низколегированных, поэтому переход количества химических компонентов в наплаваемый металл в процессе сварки важно сохранить максимально приближенным к исходным концентрациям.

С целью минимизировать температурные воздействия на расплавленный металл наплаваемых валиков образцы после каждого наплаваемого слоя подвергались охлаждению до комнатной температуры в течение некоторого интервала времени. Затем производилась их зачистка и полировка для снижения содержания различного рода загрязнений.

Ранее нами были проведены исследования перехода легирующих элементов при дуговой сварке с модифицированной защитной газовой атмосферой  $SF_6$  низкоуглеродистой сварочной проволокой сплошного сечения Св-08Г2С, результаты которых приведены в [1].

Таблица 1

Химический состав сварочной проволоки EsabOkAristorod 69

Химический элемент	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	P	S
Содержание, %	max 10	1,50– 1,80	0,40– 0,70	1,20– 1,60	0,20– 0,40	0,20– 0,30	0,05– 0,10	max 0,015	max 0,015

В качестве газовой защитной атмосферы в ходе проведения исследований использовалась традиционная смесь  $Ar$  (82 %) +  $CO_2$ (18 %) и трехкомпонентная  $Ar$  (82 %) +  $CO_2$ (18 %) +  $SF_6$ . Количество вводимого галогенидного модификатора составляло 0,5 %. Получение такой защитной среды реализовывалась с помощью разработанной нами установки, которая описана в [2].

Параметры режима процесса сварки при проведении исследований химического состава наплавленного металла представлены в табл. 2. Рациональность выбора их значений была представлена в проведенных ранее работах [1, 3].

Таблица 2

Параметры режима сварки

Скорость подачи присадочной проволоки, м/мин	Количество вводимого SF <sub>6</sub> в традиционную смесь, %	Значения силы сварочного тока, А	Значения напряжения на дуге, В
3,7	0	147–155	16,5
	0,5		18,5
5,3	0	195–202	20,5
	0,5		18,5
			20,0
			21,5
			18,0
			20,0
			22,0
			20,0
			22,0
			24,0

Проанализировав полученные данные, выявлено, что введение галогенидного газообразного модификатора SF<sub>6</sub> в состав смеси Ar + CO<sub>2</sub> приводит к снижению содержания в наплавленном металле таких легирующих элементов, как С, Si, Mn, V по сравнению с их содержанием в наплавленном металле, полученном в традиционной газовой защитной смеси. Обоеднение химического состава данными элементами происходит в пределах от 10 до 25 %. Причем отмечено, что снижение концентрации указанных компонентов происходит только на повышенных значениях напряжения на дуге для практически применимого процесса сварки. Такая картина наблюдается как для скорости подачи присадочной проволоки, равной 3,7 м/мин, так и для ее значения 5,3 м/мин. Не наблюдалось изменения количества легирующих элементов в химическом составе наплавленного металла, полученного на значениях  $U_d$  от 16,5 до 20,0 В и при рассматриваемых значениях  $V_{пп}$  для процесса сварки в двух исследуемых вариантах защитной газовой среды.

Отмечено также, что при увеличении значений параметров режима процесса сварки происходит повышение содержания серы в исследуемых образцах, полученных в модифицированной защитной атмосфере. Однако ее количественный рост в составе наплавки происходит до определенного значения и дальнейшее изменение данных параметров режима в большую сторону не приводит к возрастанию концентрации серы.

Нами выдвинуто предположение, что процессу остановки роста содержания серы в наплавленном металле может способствовать ее взаимодействие с кислородом с последующим образованием химических продуктов реакции, которые под действием высоких температур в зоне дугового промежутка в дальнейшем «улетучиваются».

Также в химическом составе исследуемых образцов, выполненных дуговой наплавкой в среде Ar + CO<sub>2</sub> + SF<sub>6</sub>, было выявлено изменение содержания церия в меньшую сторону на 35 %. В металлургии Се, при его малом введении в сталь, способст-

вует очищению стали от вредных примесей, прежде всего серы и газов. В разработанной нами технологии это является актуальным способом снижения или «сдерживания» роста концентрации серы в наплавленном металле. Поэтому потери содержания серы в его химическом составе требуют дальнейшего исследования.

В проведенных нами ранее исследованиях технологии дуговой сварки с модификацией защитной газовой атмосферы был выявлен положительный эффект воздействия  $SF_6$  на снижение количества диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле [4]. Причем процентное содержание галогенидной добавки в составе  $Ar + CO_2$  составляло 0,5 %, что говорит о возможности благоприятного воздействия на происходящие процессы при сварке с минимальным вводом модификатора. В связи с этим исследования химического состава наплавленного металла проводились именно с таким процентным содержанием  $SF_6$  в составе традиционной защитной смеси.

Однако, выявленные закономерности в ходе проведения анализа, например, снижение некоторых легирующих элементов от количества, введенного галогенидного модификатора, говорит о том, что для пояснения полученной картины, необходимо провести дополнительные исследования с концентрацией  $SF_6$  в составе  $Ar$  (82 %) +  $CO_2$  (18 %) составляющей от 0,5 до 2 %. Таким образом, работы в данном направлении будут продолжены.

#### Литература

1. Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.
2. Фетисова, Е. А. Установка для смешивания трехкомпонентной защитной газовой среды при сварке / Е. А. Фетисова [и др.] // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т». – 2022. – С. 88.
3. Технологические особенности выбора значений параметров режима дуговой сварки в защитной газовой смеси  $Ar + CO_2$  / А. О. Коротеев [и др.] // Наука и техника. – 2023. – № 22 (4). – С. 269–277.
4. Фетисова, Е. А. Влияние гексафторида серы в составе газовой защитной атмосферы при дуговой сварке на содержание водорода в наплавленном металле / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 174.

### **ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАМЫ ПОД СИЛОВУЮ УСТАНОВКУ И ГИДРОПЕРЕДАЧУ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ТИПА ДР1Б**

**К. С. Щербатый**

*Моторвагонное депо, Минск, Республика Беларусь*

**И. В. Певнев, М. В. Выходцев**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет транспорта», г. Гомель*

Научный руководитель Л. В. Огородников

*Целью настоящего исследования является проверка соответствия нормативным требованиям модернизируемой части дизель-поезда. В качестве объекта исследования выступает измененная конструкция рамы под новую силовую установку и гидropередачу*

дизель-поезда типа ДР1Б. Разработана конструкция рамы под новую силовую установку, представлен сравнительный анализ оригинальной конструкции модернизируемой. Разработана конечно-элементная модель измененной конструкции рамы под силовую установку, проанализировано напряженно-деформированное состояние рассматриваемой рамы, что позволило на основании напряженно-деформированного состояния разработать наиболее точную схему установки тензорезисторов. Проведены натурные испытания на соударение и ходовые прочностные испытания дизель-поезда с модернизированной конструкцией рамы.

**Ключевые слова:** прочность, моторная рама, дизель-поезд, моделирование, конструкция, испытания.

При проектировании нового подвижного состава и при его модернизации важным является анализ напряженно-деформированного состояния эксплуатируемого подвижного состава, поэтому рамы, кузова и их тонкостенные элементы рассчитываются на прочность в соответствии с нормативными требованиями. Критерием соответствия конструкции является недопущение превышения напряжений (от нагрузок, которым они могут подвергаться в процессе эксплуатации), полученных расчетным путем и в результате проведения испытаний (методом тензометрирования), допускаемых значений, а также обеспечение безопасной эксплуатации в течение всего срока службы [1, 2].

Оригинальная рама под силовую установку и гидропередачу дизель-поезда типа ДР1Б имеет сварную конструкцию. На одной части рамы закреплен силовой агрегат М756, а на второй – устанавливается гидропередача ГДП-1000. Материал всей рамы – сталь Ст3.

В измененной конструкции была модернизирована часть рамы под силовую установку, так как силовой агрегат имеет иную систему крепления, он закрепляется через четыре демпфирующие подушки. В измененной конструкции рамы отсутствует перепад по высоте в месте соединения двух частей рамы, измененная часть выполнена из прямоугольных профильных труб из Стали 20, которая по механическим свойствам близка к стали Ст3. На рис. 1 представлен изначальный вид рамы и рама после модернизации.

Стоит отметить то, что места крепления измененной конструкции рамы под силовую установку и гидропередачу к главной раме кузова головного вагона дизель-поезда типа ДР1Б сохранены.

Расчет напряженно-деформированного состояния производился методом конечных элементов. Была создана пространственная конечно-элементная модель. По результатам расчета установлено, что прочность несущей конструкции измененной рамы соответствует требованиям [3]. Результаты оценки прочности приведены на рис. 2 в виде распределения эквивалентных по Мизесу напряжений.

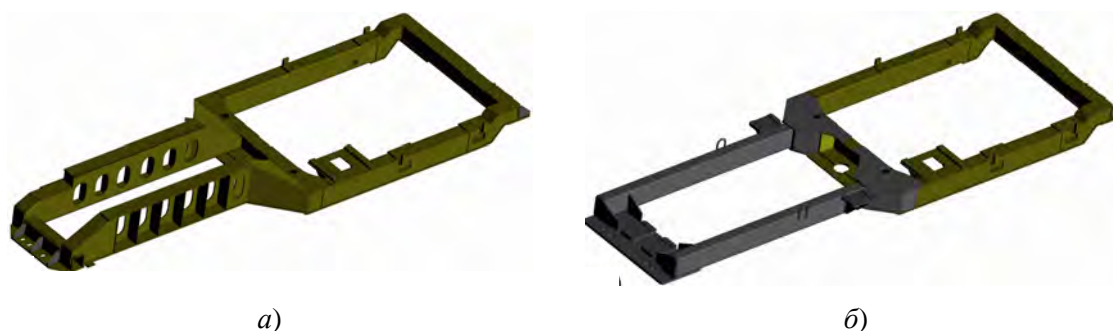


Рис. 1. Рама под силовую установку и гидропередачу:  
а – рама оригинальной конструкции; б – рама измененной конструкции

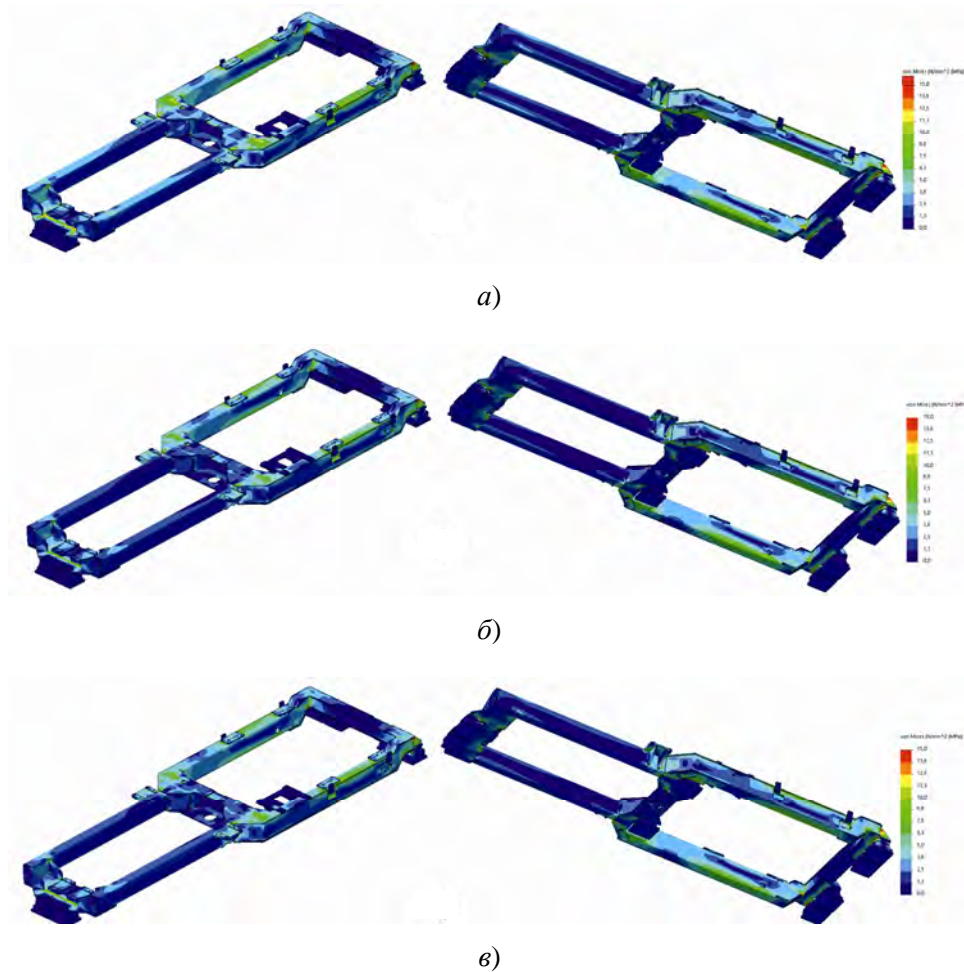


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений (МПа) в раме (для наглядности распределения значений эквивалентных напряжений, по всей конструкции измененной рамы приведены от 0 до 15 МПа): а – режим нагружения 1; б – режим нагружения 2; в – режим нагружения 3

Проведение натурных испытаний по определению характеристик прочности методом тензометрирования невозможно без грамотно разработанной схемы размещения тензорезисторов (контрольных точек). Схема разрабатывалась в соответствии с проведенными прочностными расчетами в нескольких режимах, а также с учетом опыта специалистов испытательного центра, проводящих испытания сварных рамных конструкций.

Испытания на соударение выполнялись путем соударения вагона-бойка с испытываемым головным вагоном в груженом состоянии, установленным перед вагонами подпора. Удар проводился в груженом состоянии. Масса груза, имитирующего сидящих пассажиров, составляла 4,76 т, масса тары с заправкой 66 % экипировки – 60 т. Скорость соударения регистрировалась путем измерения времени прохождения вагоном-бойком (тележкой) фиксированного расстояния, а сила соударения – тензометрической автосцепкой. Соударения осуществлялись с постепенным увеличением скорости (силы соударения). Расчетная (максимальная) сила соударения для вагона в соответствии с [3] составляет 2000 кН для передней консоли головного вагона. После окончания соударений был произведен заключительный осмотр испытываемого

образца с проверкой работоспособности автосцепного оборудования и установленных на вагоне механизмов. Неисправностей и повреждений не выявлено.

При проведении ходовых прочностных испытаний контролировались динамические напряжения в наиболее нагруженных сечениях элементов измененной рамы. Испытания проводились в груженом состоянии. Опытный поезд для проведения испытаний был загружен щебнем крупной фракции в мешках, исходя из условия 100 кг на одно пассажироместо, и был сформирован из двух моторных (головных) и двух немоторных вагонов. Требуемый массив экспериментальной информации по исследуемым величинам при ходовых прочностных испытаниях получен путем последовательного набора записей (реализации) процессов при движении дизель-поезда по прямым и кривым участкам пути, а также на стрелочном переводе во всем проектном диапазоне допускаемых эксплуатационных скоростей вплоть до конструкционной скорости, при движении прямым и обратным ходом.

Также регистрировались значения напряжений при трогании с места, переходные процессы (тяга – сброс тяги – выбег) для различных скоростей и участков движения. Непосредственно перед началом заездов на каждый из исследуемых участков снимались показания тензорезисторов и принимались за нулевое значение. Записи выполнялись с частотой дискретизации не менее 400 Гц и аппаратной фильтрацией частотой 40 Гц. Регистрация измеряемых процессов производилась кадрами различной длительности в зависимости от длины опытного участка пути и скорости движения.

При обработке результатов ходовых прочностных испытаний производилась систематизация зарегистрированных параметров в зависимости от характера пути и режимов движения опытного поезда и производилась отбраковка недостоверных данных.

По результатам проведенной расчетно-экспериментальной оценки установлено, что модернизированная рама под силовую установку и гидropередачу дизель-поезда типа ДР1Б удовлетворяет требованиям [3] в части соответствия прочности при действии максимальных продольных ударных сил (максимальное значение 212,5 МПа).

#### Литература

1. Оценка прочности несущих конструкций вагонов метрополитена с учетом прогнозирования их технического состояния / П. М. Афанаськов [и др.] // Вестн. БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 2 (45). – С. 79–84.
2. Afanaskou, P. Estimation of the Residual Resource of a Dumping Wagon for Transportation of Bulky Cargo after Long-term Operation / P. Afanaskou, R. Charnin // Transport means 2021. – 2021. – Part I. – P. 402–405.
3. ГОСТ 33796–2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. – Минск : Госстандарт, 2017. 35 с.

### **К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ МЕТОДОМ ЭХОЛОКАЦИИ**

**Н. В. Бочаров, У. В. Ключко**

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

Научный руководитель И. С. Шепелева

*Рассмотрен принцип определения динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяных скважин при помощи эхолотрии, а также приведен обзор основных неопределенностей, связанных с уровневными замерами, и пути их решения.*



**Ключевые слова:** эхометрия, гидродинамические исследования скважин, динамический уровень, контроль эксплуатации скважин, промышленное оборудование.

Углеводородное сырье является очень важным компонентом государственной экономики и энергетической безопасности страны. Совершенствование технологий добычи нефти, а также создание эффективных методов регулирования процесса разработки нефтяных и газовых залежей остается существенной проблемой в долгосрочном планировании в нефтегазовой отрасли. Большинство нефтяных месторождений в Припятском прогибе находятся на завершающей стадии разработки, поэтому особое значение имеет наличие качественных нефтепромысловых данных, характеризующих энергетику залежей. Пластовые и забойные давления, характеризующиеся уровнем жидкости в нефтескважинах, являются важнейшими факторами, определяющими энергетические возможности пласта, производительность скважины и залежи в целом.

Целью данной работы является рассмотрение основных методов определения динамического уровня жидкости в скважине, а также выявление основных трудностей, связанных с уровневными замерами.

подавляющее большинство скважинного фонда эксплуатируется с помощью глубинного насосного оборудования, которое должно иметь определенную производительность и устанавливаться на расчетной глубине относительно устья скважины и продуктивного пласта. Как правило, совокупность этих технических решений и обеспечивает сбалансированность системы «пласт – скважина – насос», когда приток жидкости из пласта в скважину соответствует производительности глубинного насоса [1]. В настоящее время добыча нефти осуществляется в основном установками штанговых глубинных насосов и установками электроцентробежных насосов. Динамический уровень жидкости в межтрубном пространстве скважины оказывает значительное влияние на работу насосных установок. Если уровень жидкости опустится ниже глубины установки насоса, то снизится коэффициент его заполнения, что приведет к увеличению трения между элементами и, соответственно, к увеличению температуры и выходу оборудования из строя. Достоверное определение динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве скважины является одним из важных факторов, влияющих на правильную оценку потенциала скважины и адекватность решений, направленных на повышение эффективности работы нефтескважинного оборудования.

Основными способами определения уровня жидкости в скважине являются: измерения термоманометрическими системами, динамометрия и ваттметрия, а также эхометрия. Последний способ является наиболее распространенным ввиду простоты исполнения и невысокой стоимости. Эхометрия, в отличие от других способов, не требует извлечения скважинного оборудования и спуска специальных измерительных устройств.

Принцип акустического измерения уровня жидкости основан на генерации звукового импульса специальным устройством на устье скважины, затем происходит распространение импульса по межтрубному пространству и отражение от муфтовых соединений насосно-компрессорных труб (НКТ), линии раздела фаз, а также других препятствий. Отраженные волны возвращаются на устье, где регистрируются приемным устройством и после обработки представляются в виде эхограмм (рис. 1). В РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» используются скважинные уровнемеры СУДОС, которые состоят из генератора и приемника акустической волны.

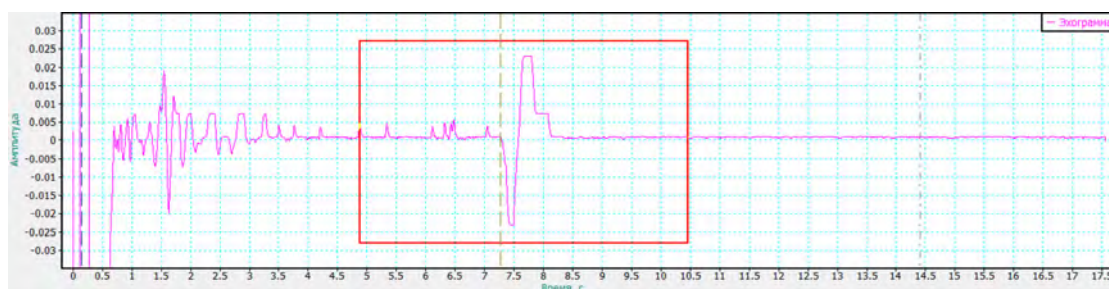


Рис. 1. Типичная эхограмма, получаемая при замере уровня жидкости в скважине

Дальнейшее определение уровня жидкости сводится к нахождению явного излома в эхограмме, который свидетельствует об отражении звуковой волны от раздела фаз – газа и столба жидкости. Путем умножения времени прохождения волны от устья до раздела фаз на скорость звуковой волны находится положение динамического уровня жидкости в скважине. Расчет глубины положения жидкости обычно производится на стандартную скорость звука – 320 м/с, вне зависимости от каких-либо геолого-технических условий объектов исследования. Однако, как показали различные исследования [2–4], скорость звука существенным образом зависит от нескольких параметров: давления и температуры, компонентного состава и плотности газа в затрубном пространстве скважины, глубины динамического уровня жидкости.

Основной задачей для достоверного определения динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве является точное определение скорости распространения звуковой волны в конкретной среде. В настоящее время существуют следующие методы оценки звуковой волны:

- по существующим теоретическим диаграммам (рис. 2), в зависимости от плотности газа и затрубного давления, составленных для некоторых месторождений. Такие диаграммы приведены в справочной литературе и требуют уточнения под конкретные условия исследования;

- путем подсчета количества отражений акустической волны от соединений НКТ известной длины;

- путем измерения времени прохождения акустической волны от устья скважины до репера (специальные отражающие элементы, изменение диаметров НКТ и обсадных труб и т. д.), т. е. объекта, расположенного на заранее известной глубине.

Наиболее распространены методы определения скорости звуковой волны путем идентификации и подсчета отражений от соединений труб или же используя заранее установленные реперы. Но необходимо учитывать тот факт, что затрубное давление, температура и плотность газа изменяется по всей длине скважины. Что приводит к различию скоростей звука в разных частях скважины. Более того, присутствует эффект затухания звуковой волны по мере отдаления от источника звука, что приводит к необходимости расчета скорости звуковой волны по всей длине ствола скважины.

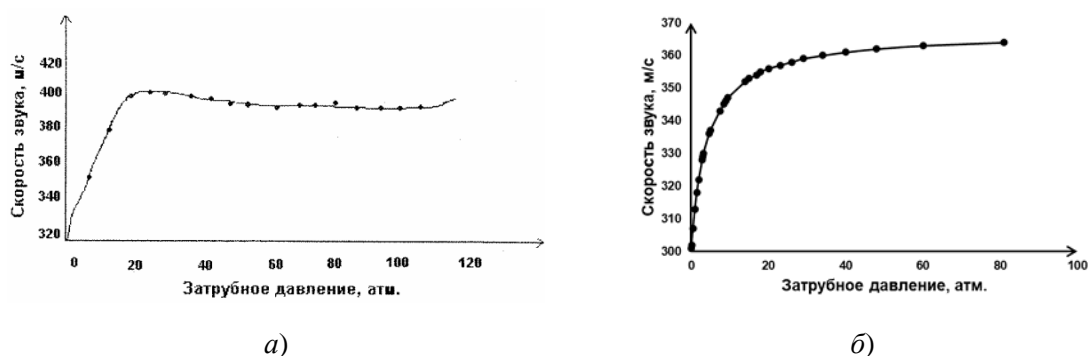


Рис. 2. Экспериментальные зависимости скорости звука от затрубного давления: а – приведенные в [4]; б – на одном из месторождений в Республике Татарстан

Современное состояние нефтегазодобычи требует наличие достоверных данных по определению динамических уровней жидкости в скважине, так как для залежей, с заведомо низкими пластовыми давлениями, близкими к давлению насыщения нефти, погрешности в расчетах пластового давления по данным уровневым замеров будут иметь определяющее значение с позиции недопущения возможного разгазирования нефти с последующей потерей возможности добычи части активных запасов углеводородов. Достоверная оценка текущих пластовых давлений также имеет важное значение при оценке эффективности проведения различных геолого-технологических мероприятий, а также с позиции предотвращения смятия эксплуатационных колонн в условиях снижения пластового давления, в частности для залежей, разрабатываемых без системы ППД. Кроме того, погрешности при определении уровня жидкости в скважине могут приводить к снижению эффективности работ по подбору и оптимизации насосного оборудования.

Дальнейшая работа по данной тематике направлена на выявление зависимостей скорости звука от различных геолого-технических параметров для ряда белорусских нефтяных месторождений в Припятском прогибе с целью повышения качества регулирования их разработки и оптимизации использования скважинного насосного оборудования.

#### Л и т е р а т у р а

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 [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 6. – С. 197–207.
2. Thomas, Kent L.. "A Review of the Acoustic Determination of Liquid Levels in Gas Wells." *J Pet Technol* 20 (1968): 784–785. doi: <https://doi.org/10.2118/2047-PA>
3. Исследование состава флюидов и процессов в межтрубном пространстве нефтедобывающих скважин / И. З. Денисламов, Ш. А. Гафаров, П. А. Засов, А. И. Денисламова // Нефтепромысловое дело. – 2018. – № 4. – С. 38–42. – DOI 10.30713/0207-2351-2018-4-38-42. – EDN YUSANK.
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 // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2002. – Т. 305, вып. 8 : Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений. – С. 157–160.

## ИЗУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОФОБИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В КАЧЕСТВЕ СОРБЕНТА НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

В. Ю. Писарев

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

Научный руководитель И. И. Злотников

*Добыча нефти и ее транспортировка связаны с риском техногенных аварий, приводящих к загрязнениям почвы и водных поверхностей, для ликвидации которых эффективно применение сорбентов различной природы, в частности силикатов. Цель работы – улучшение сорбционных свойств диоксида кремния путем его поверхностной обработки кремнийорганическими соединениями. Определены оптимальные концентрации гидрофобизатора по отношению к диоксиду кремния и время смешивания. Проведены эксперименты по определению плавучести гидрофобных сорбентов и их сорбционной активности по отношению к нефти.*

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

Нефтегазовая отрасль и трубопроводный транспорт связаны с возможными техногенными авариями, которые могут приводить к загрязнениям почвы и водных поверхностей. Масштабные нефтяные разливы наносят непоправимый ущерб окружающей среде и несут опасность нарушения природных экосистем, деградации почв и акваторий. Следствием этого является угроза для развития сельского хозяйства, гибель животных и растений, убытки и даже приостановка деятельности нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий.

Для сбора нефти с поверхности воды наиболее широко применяются сорбционные способы. В настоящее время разработано и применяется много сорбирующих материалов различной природы, наиболее многочисленными из которых являются искусственные и природные силикаты: силикагель, алюмосиликаты, цеолиты, вермикулит, перлит, бентонитовые глины, кремнеземы, в том числе модифицированные органическими и неорганическими реагентами [1-3]. Высокие сорбирующие свойства кремнеземов определяются их большой удельной поверхностью, пористостью и особыми физико-химическими свойствами поверхности. Однако эти же свойства приводят к активному поглощению влаги, что препятствует сорбции нефти и снижает плавучесть таких сорбентов. Но главным требованием к сорбентам для сбора нефти с поверхности воды является их способность длительное время находится на поверхности не поглощая воду, а этого можно достигнуть только в том случае, если сорбент является достаточно гидрофобным.

Цель работы – изучение влияния гидрофобизации на свойства диоксида кремния и рассмотрение перспектив его применения в качестве сорбента при проведении мероприятий по ликвидации разливов нефти на поверхности воды.

В качестве объектов исследования были выбраны: промышленный диоксид кремния («белая сажа» марки БС-100) и гидрофобизирующие кремнийорганические жидкости: полигидросилоксан марки ГКЖ-94 (растворим в нефтепродуктах), этилсиликонат натрия марки ГКЖ-11 и фенилсиликонат натрия марки ГКЖ-12 (водорастворимые). Гидрофобизацию проводили следующим образом. В навеску порошка диоксида кремния, предварительно высушенного при температуре 125 °С вводили отмеренное количество кремнийорганической жидкости и перемешивали в лабора-

торном миксере в течение заданного времени. После перемешивания гидрофобизированный порошок диоксида кремния извлекали для исследования.

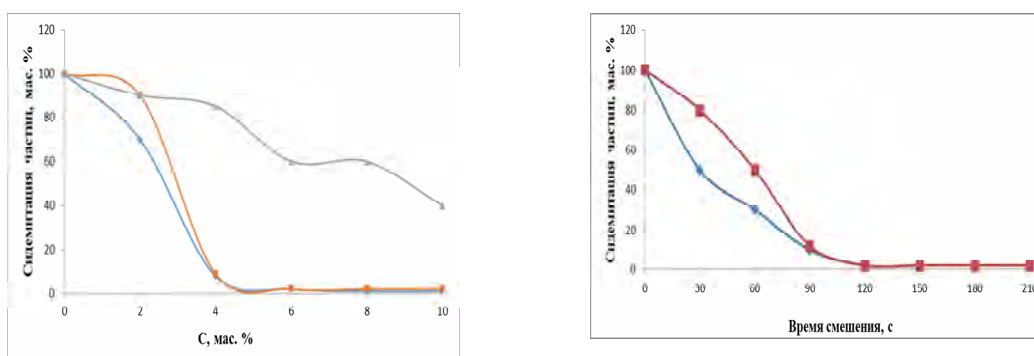
Гидрофобность поверхности обработанных частиц диоксида кремния оценивали по ГОСТ 32704-2014. Для этого пробу исследуемого порошка (2 г) ссыпали на поверхность дистиллированной воды в стакане и оставляли 24 часа, после чего оценивали количество порошка погрузившегося на дно стакана. Порошок диоксида кремния считали полностью гидрофобным, если через 24 ч весь порошок оставался на поверхности воды. Маслосъемность диоксида кремния определяли по ГОСТ 21119.8-75 с помощью стеклянной палочки. Для определения истинной плотности измеряли массу диоксида кремния и его истинный объем по объему вытесненной воды. Насыпную плотность оценивали по объему навески диоксида кремния при свободной засыпке в мерный цилиндр. 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 адсорбента после обработки нефтью.

На рис. 1 приведены результаты исследования процесса седиментации частиц диоксида кремния в дистиллированной воде в зависимости от типа гидрофобизатора (время смешения диоксида кремния с гидрофобизатором во всех случаях – 3 мин).

Из рис. 1 следует, что наилучшим гидрофобизирующим эффектом обладают полигидросилоксан и этилсиликонат натрия в количестве около 5 мас. %. В этом случае количество гидрофобных частиц составляет не менее 99 %. Дальнейшее увеличение содержания гидрофобизаторов в порошке диоксида кремния не приводит к дополнительному положительному результату. При использовании фенилсиликоната натрия максимальная степень гидрофобности частиц диоксида кремния составляет только 60% и достигается в интервале 9–10 мас. %, поэтому для дальнейших исследований фенилсиликонат натрия не использовали.



На рис. 2 приведены результаты по определению влияние времени смешивания диоксида кремния с гидрофобизирующей жидкостью для получения максимального эффекта. Полученные данные показывает, что оптимальным временем смешивания составляет 120–130 с. При таком времени количество гидрофобных частиц составляет не менее 99 %. При увеличении времени смешивания дополнительного положительного эффекта не наблюдается.

Сравнительные свойства полученных гидрофобизированных порошков диоксида кремния приведены в таблице.

#### Влияние гидрофобизации на свойства диоксида кремния

Образец	Насыпная плотность, г/л	Степень гидрофобности, %	Маслоемкость, г/г	Нефтеемкость, г/г
Исходный диоксид кремния	120	0	2,2	2,4
Диоксид кремния + 5 мас. % полигидросилоксана	110	99	2,9	3,3
Диоксид кремния + 5 мас. % этилсиликоната натрия	110	99	2,7	3,1

Из таблицы видно, что наиболее эффективным гидрофобизатором является полигидросилоксан. Тот факт, что гидрофобизация привела к уменьшению насыпной плотности диоксида кремния можно объяснить следующим. На поверхности частиц диоксида кремния всегда в большом количестве присутствуют силанольные группы  $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ , из-за чего между частицами возникают водородные связи и частицы слипаются с образованием крупных агломератов [4]. После интенсивного смешивания диоксида кремния с гидрофобизатором агломераты частично разрушаются, а поверхностные силанольные группы оказываются блокированы тонким слоем кремнийорганической жидкости и склонность к агломерации частиц значительно уменьшается. В результате увеличивается дисперсность и удельная поверхность порошка сорбента. Этим же частично объясняется и увеличение маслоемкости и нефтеемкости получаемого сорбента.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- обработка диоксида кремния кремнийорганическими соединениями в количестве около 5 мас.% позволяет получить гидрофобный сорбент для сбора нефтяных загрязнений с поверхности воды, обладающий высокой нефтеемкостью и плавучестью более 24 часов;
- среди рассмотренных гидрофобизаторов наилучшие свойства показал полигидросилоксан;
- изученный процесс гидрофобизации диоксида кремния кремнийорганическими жидкостями отличаются простой методикой 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 // Зап. Горного ин-та. – 2023. – Т. 264. – С. 856–864.
2. Мамонтов Г. В. 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. – № 6. – С. 6–15.
3. Пожидаев, Ю.Н. Кремнийсодержащие сорбционные материалы: синтез, свойства, применение / Ю. Н. Пожидаев // Изв. ВУЗов. Приклад. химия и биотехнология. – 2014 – № 4. – С. 7–37.
4. Неймарк, И. Е. Силикагель, его свойства и применение / И. Е. Неймарк, Р. Ю. Шейнфайн. – Киев : Наукова думка – 1973. – 202 с.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫМ СТЕНДОМ

Д. Н. Станкевич

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

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

*Для испытаний гидравлических гасителей колебаний кузовной системы подвешивания вагонов метрополитена после ремонта или технического обслуживания был разработан испытательный стенд с гидравлическим приводом с электроуправлением. Для повышения качества испытания была разработана система автоматического управления, построенная на запрограммированном контроллере и программное обеспечение для удобства работы оператора.*

**Ключевые слова:** испытательный стенд, гидравлический гаситель колебаний, гидро-система стенда, система автоматического управления.

Одной из основополагающих причин внедрения микропроцессорных систем управления испытательных стендах является резкое повышение качества процесса испытания, диагностики испытуемых объектов и точности результатов испытания выпускаемой продукции. Малейшие ошибки при проведении испытаний и контроля, не выявление дефектов, протечек т.д. могут привести к катастрофическому результату, создать техногенную опасность, как в процессе испытания, так и впоследствии его при использовании данного устройства.

Разработки системы автоматического управления (далее – САУ) производилась для управления работой стенда для испытаний гидравлических гасителей колебаний (ГТК) в центральной ступени рессорного подвешивания вагонов метрополитена.

Испытательный стенд должен удовлетворять следующим условиям: испытания проводятся для проверки демпфирующей способности и наружной герметичности гидравлических гасителей колебаний и испытания клапанов; давление настройки предохранительного клапана должно составлять 3,5 МПа; температура амортизатора при испытаниях – 15–25 °С; ход штока при испытаниях амортизатора – 32–36 мм; частота двойных ходов штока гидроцилиндра при испытаниях амортизаторов – 0,8 + 0,2 Гц; усилие на штоке амортизатора – 4000–6000 Н; работа стенда должна быть автоматической с возможностью записи и вывода на печать результатов и возможностью управления в ручном режиме.

Разработка стенда включает в себя проведение теоретических исследований и расчетов, разработку электрических и гидравлических схем, разработку системы управления механической частью и составление управляющей программы.

На основании требований к испытательному стенду и методике испытаний гидравлических гасителей колебаний [1] разработана гидравлическая система испытательного стенда (рис. 1).

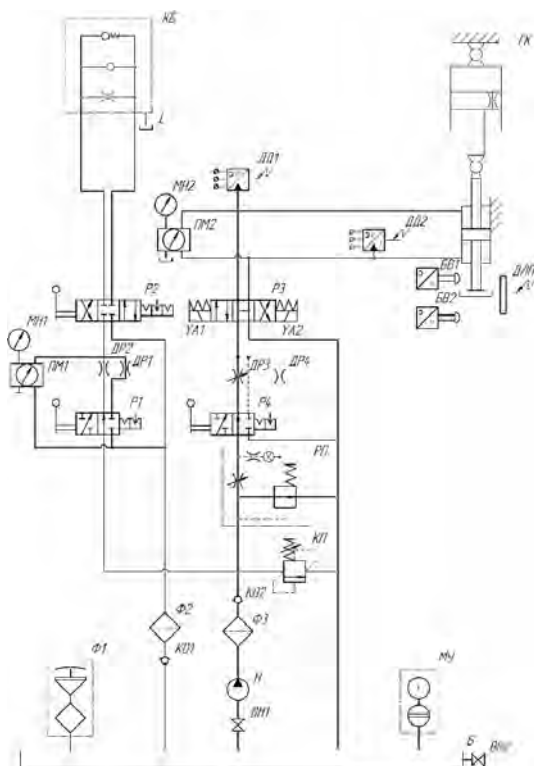


Рис. 1. Гидравлическая система испытательного стенда

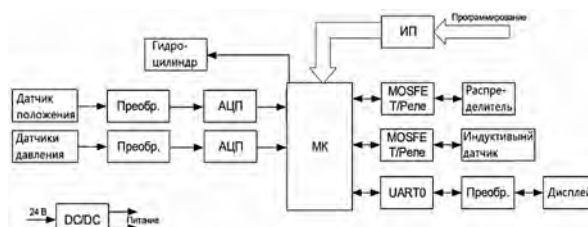


Рис. 2. Структурная схема управляющего устройства

При включении привода насоса Н масло проходя через напорный фильтр Ф3, поступает к регулятору потока РП и предохранительному клапану КП. Поскольку линия управления регулятора потока через гидрораспределитель Р3 соединена со сливной линией, регулятор РП с минимальным сопротивлением пропускает нагнетаемое масло в гидробак (режим разгрузки насоса). При включении электромагнита YA1 гидрораспределителя Р3 разгрузка насоса прекращается, и масло из напорной линии поступает в верхнюю полость гидроцилиндра Ц, а его нижняя полость одновременно соединяется со сливной линией. В результате шток гидроцилиндра движется вниз. При этом давление в верхней полости гидроцилиндра  $p_1$  определяется сопротивлением связанного со штоком амортизатора, а давление в напорной линии гидросистемы превышает величину  $p_1$  на  $\sim 0,3$  МПа. Скорость движения штока гидроцилиндра зависит от настройки регулятора потока РП и положения рукоятки гидрораспределителя Р4. В правом положении рукоятки происходит замедленный режим движения, в левом положении – ускоренный режим движения.

После выключения левого электромагнита YA1 и включения YA2 гидрораспределителя Р3 движение штока гидроцилиндра Ц реверсируется. Давление  $p_2$  в нижней полости гидроцилиндра контролируется манометром МН2 и отслеживается преобразователем давления ДД2. В режиме циклического движения штока переключение электромагнитов YA1 и YA2 гидрораспределителя Р1 производится в конце хода от бесконтактных выключателей БВ1 и БВ2.

В процессе испытаний клапанного блока включается электромагнит YA1 гидрораспределителя Р3, и шток гидроцилиндра опускается в крайнее нижнее положение.



ние. В гидросистеме устанавливается рабочее давление, определяемое настройкой клапана КП.

Переключением гидрораспределителя Р2 реверсируется поток масла, проходящий через испытываемый клапанный блок, а переключением гидрораспределителя Р1 изменяется величина этого потока.

Автоматизация работы испытательного стенда происходит за счет поступающих сигналов с датчиков давления и положения. Полученные сигналы преобразуются и подаются на блок аналого-цифрового преобразования. Оцифрованные данные используются далее микроконтроллером для передачи на дисплей и управления через мощные полевые транзисторы (МОFSET) (рис. 2) электромагнитами распределителя для переключения направления движения гидроцилиндра [2, 3].

Основным назначением программного комплекса является обеспечение формирования управляющего сигнала для гидроаппарата с пропорциональным электрическим управлением из условия изменения давления в полости гидравлического гасителя колебаний по заданному закону. Дополнительно обеспечиваются функции ручного, наладочного и автоматического режимов управления, контроль за состоянием датчиков и сигнализаторов, создание удобного интерфейса пользователя, ведение отчетов о ходе проведения испытаний.

Программа рассчитана на использование обслуживающим персоналом (наладчиками) и оператором стенда Программа управления, реализуемая контроллером S7-200, выполнена в среде разработки Step7-MicroWin. Представленный алгоритм выполняется контроллером за 10 мс, а при переходе в режим работы по эталонному закону время дискретизации снижается до 8 мс. Сигналы с аналоговых датчиков, аварийные и предупредительные сигналы, формируемые контроллером и передаваемые на ПК, являются кодовыми (рис. 3, 4). Кодовые сигналы на верхнем уровне преобразуются в физические величины и сообщения. Для контроля и автоматизированного управления параметрами стенда разработан интерфейс оператора для ПЭВМ, состоящий из 4-х панелей управления и панели настройки.

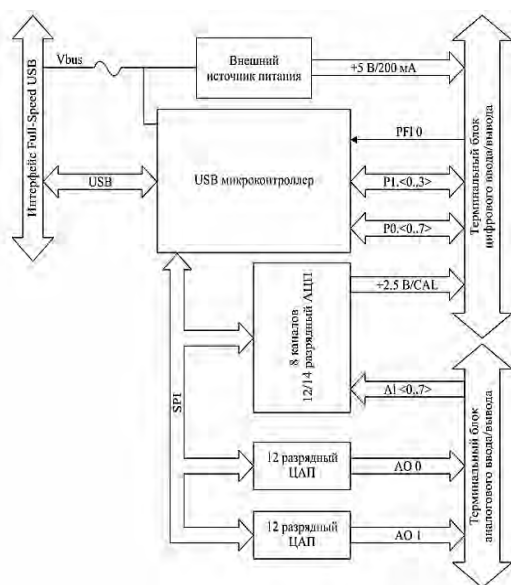


Рис. 3. Схема устройства контроллера

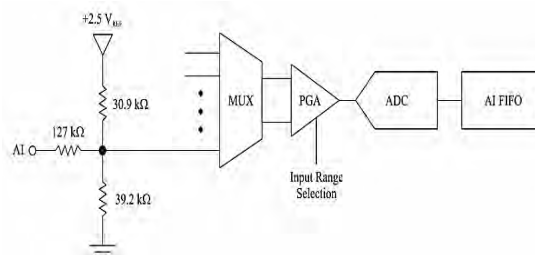


Рис. 4. Схема передача кодового сигнала оператору

Для проверки демпфирующей способности и наружной герметичности гидравлических гасителей колебаний разработана гидравлическая система с автоматическим управлением. Микроконтроллер САУ для испытательного стенда подключен к дисплею по протоколу UART и USBUART преобразователь, получает команды от кнопок управления на проведение испытаний и на остановку испытаний ГГК. В программу заложены данные о величине давления на ГГК и справочная информация, возможно автоматическое построение рабочей диаграммы и расчет характеристик гасителя в автоматическом режиме. Так же программное обеспечение позволяет сравнить справочное значение диаграммы гасителя с испытательным и определить вид неисправности и способ ее устранения.

#### Литература

1. Бачурин Н. С., Красниченко А. А., Переяслов М. В. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов, учебник справочник по дисциплине «Конструирование и расчет вагонов», 2013. – С. 29–39.
2. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. – М. : Наука, 1977. – 560 с.
3. Основы теории автоматического управления : учеб. пособие / А. П. Зайцев. – Томск, 2000. – 152 с.

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ СРЕДСТВАМИ САПР И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Т. Д. Стасенко

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

Научный руководитель А. В. Петухов

*Выполнено проектирование прямозубой зубчатой передачи в программе «Комплекс программ GEARS». Предложен расчет износа рабочих поверхностей зубчатой пары и прогнозирование долговечности зубчатой прямозубой цилиндрической передачи с определением ожидаемых характеристик ее работоспособности.*

**Ключевые слова:** износ, нагрузка, зубчатое колесо.

Одним из способов снижения себестоимости проектирования производства и испытаний является моделирование зубчатых колес, которое в свою очередь является неотъемлемой частью процессов изготовления, исследования и использования зубчатых колес. Поэтому благодаря математическому моделированию возможно в кратчайшие сроки и без больших материальных затрат воссоздать как само зубчатое колесо, так и условия его применения [2], таким как «Комплекс программ GEARS». Например, таким средством спроектировано зубчатое колесо (рис. 1), исходные данные которого, приведены в таблице.

## Исходные данные зубчатого колеса

Модуль	$m = 6$	
	Число зубьев	$z = 56$
Коэффициент смещения исходного контура	$x = -0,0663$	$x = 0,0663$
Межосевое расстояние	$a_w = 315$ мм	
Ширина зубчатого венца	$b = 50$ мм	$b = 50$ мм
Термическая обработка	цементация до 59–62 HRC	
Вращающий момент на ведущем колесе	$T_{max} = 4157,5$ Нм	
Окружная скорость	$V = 6$ м/с	

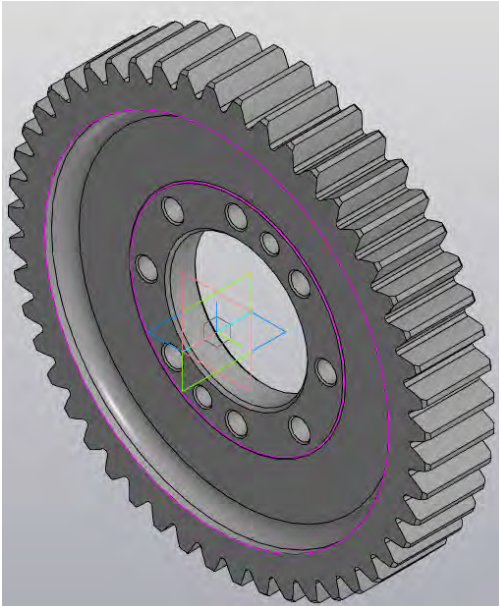
Создание математической модели износа рабочей поверхности зубчатого колеса является важной и актуальной задачей. Цилиндрические эвольвентные передачи весьма чувствительны к погрешностям, которые вызывают кромочный контакт и повышенные напряжения. С целью ослабления или исключения торцевого кромочного контакта используют продольную модификацию рабочих поверхностей зубьев (обычно одного из пары колес), придавая им слегка бочкообразную форму. При наличии технологических погрешностей и деформаций деталей происходит перекатывание поверхностей таких зубьев в продольном направлении с перемещением контактной площадки в сторону одного из торцов зубчатого венца. Учитывая, что бочкообразные зубья работают в условиях локального контакта (объемного напряженного деформированного состояния), то изгибные напряжения в основании зубьев, выполненных на базе стандартного исходного контура, можно определить по формуле:

$$\sigma_F = 2TY_E \cdot Y_{\text{dec}} \cdot K_F / (m^3 z), \quad (1)$$

где  $T$  – передаваемый крутящий момент;  $m$  – модуль колес;  $z$  – число зубьев колеса;  $Y_E$  – коэффициент, учитывающий влияние перекрытия зубьев;  $Y_{\text{dec}}$  – приведенный объемный коэффициент, учитывающий распределение нагрузки вдоль длины бесконечно длинного зуба;  $K_F$  – коэффициент нагрузки:

$$K_F = K_A \cdot K_{F\delta} \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}, \quad (2)$$

где  $K_A$  и  $K_{F\delta}$  – коэффициенты внешней и внутренней динамической нагрузки;  $K_{F\alpha}$  – коэффициент распределения нагрузки между зубьями;  $K_{F\beta}$  – коэффициент неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий.



Модуль	$m$	6	
Число зубьев	$z$	49	
Исходный контур	–	1 ГОСТ Р 50531-93	
Коэффициент смещения	$x$	+0,0663	
Степень точности по ГОСТ не известен	–	8-В	
Длина общей нормали	$W$	$119,366_{-0,32}^{-0,8}$	
Допуск на колебание длины общей нормали	$F_{sw}$	0,05	
Допуск на колебание измерительного межосевого расстояния	За оборот колеса	$F_i^-$	0,1
	На одном зубе	$f_i^-$	0,04
Контролировать при отпуске ступицы обкатки с измерительной шестерней	Допуск на радиальные выносы зубчатого венца	$F_r$	0,071
	Допуск на погрешность профиля зуба	$f_i$	0,022
	Отклонение основного шага	$f_{p1}$	$\pm 0,028$
Делительный диаметр	$d$	294	
Допуск на погрешность изготовления зуба	$F_p$	0,025	
Допуск на торцовое биение базовой поверхности	$F_T$	0,059	
Обозначение чертежа сопряженного зубчатого колеса			

Рис. 1. 3D модель зубчатого колеса спроектированная в Комплекс программ GEARS и его характеристики

Прогнозирование износа рабочей поверхности зубчатых колес особенно важно в целях испытания спроектированной детали и, при необходимости, корректирования его параметров до этапа производства.

Особый подход к расчету изнашиваемых кинематических пар содержится в работах В.В. Шульца, в которых на основании вариационных методов определены устойчивые формы естественного износа, обладающие свойством энергетического экстремума в заданном относительном движении. Расчеты передач на износ производятся с целью определения ресурса работы или стыкования конструктивных параметров передачи, при которых он имеет максимальное значение. Суть моделирования основывается на положениях упруго-статической модели, успешно применяемой при синтезе приближенных зацеплений. В соответствии с этой моделью предполагается: все зубья геометрически одинаковы и равномерно распределены по ободу колеса; контакт зубьев осуществляется по активным поверхностям; под нагрузкой зубья колес деформируются и их упругие свойства одинаковы; пластические деформации отсутствуют. Дополнительно приняты следующие допущения: зубья каждого колеса изнашиваются одинаково; условия работы передачи (температура окружающей среды, свойства смазывающего материала, концентрация и свойства абразивных частиц и т. д.) считаются неизменными; к выходному валу приложен постоянный момент сопротивления; шестерня вращается с постоянной угловой скоростью; частота вращения шестерни достаточно мала, чтобы динамическими нагрузками, обусловленными неравномерностью вращения колеса, можно было пренебречь; износ считается достаточно малым, чтобы можно было не учитывать изменения упругих свойств зубьев; трение в зацеплении не учитывается. В основе эволюционного подхода к моделированию лежит деление процесса изнашивания на ряд шагов. Изменение наработки  $\Delta n$  на каждом шаге выбирается настолько малым, что в его пределах условия изнашивания можно считать постоянными. Отсюда следует, что приращение износа  $\Delta H_i$  можно считать постоянным и в любой  $i$ -ой точке профиля с достаточной степенью точности можно выразить уравнением:

$$\Delta H_i = I_i \cdot \Delta n_i, \quad (3)$$

где  $I_i$  – интенсивность изнашивания:

$$I_i' = \frac{\partial H}{\partial S} = kq^\alpha, \quad (4)$$

где  $\partial H$  – величина износа,  $\partial S$  – путь трения,  $q$  – контактное давление,  $\alpha$  – находится, в пределах  $1 \leq \alpha \leq 3$  (для приработанных поверхностей  $\alpha \approx 1$ ),  $k$  – интенсивность физико-химических процессов во фрикционном контакте, определяемая экспериментально. Толщина износа поверхности зуба:

$$\delta_u = J_u S, \quad (5)$$

где  $J_u$  – интенсивность изнашивания;  $S$  – общий путь трения за время работы зубчатой передачи (скольжение по площадке контакта в области контакта зубьев колеса и шестерни). Суммарный износ зубьев в контактной точке  $\sum I = I_1 + I_2$  определяется износом зуба шестерни и колеса. Каждое из этих слагаемых представляет собой сумму основного износа, обусловленного кинематикой зацепления, и дополнительного износа вследствие относительного смещения зубьев из-за радиального биения зубчатых колес:

$$\sum I = I_1 + I_2 = (I_{z1} + I_{b1}) + (I_{z2} + I_{b2}) = I_z + I_b = (I_{z1} + I_{z2}) + (I_{b1} + I_{b2}). \quad (6)$$

Принято, что суммарный износ зубьев шестерни и колеса в контактной точке прямо пропорционален значениям удельной мощности сил трения  $Pfz$  и  $Pfb$  (Вт/мм<sup>2</sup>):

$$I_z = I_{z1} + I_{z2} = a_z k_q Pfz = a_z k_q (fz \sigma H v_{sz}); \quad (7)$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} = a_b k_q Pfb = a_b k_q (fb \sigma H v_{sb}), \quad (8)$$

где  $a_z$ ,  $a_b$  – исходные значения удельной интенсивности изнашивания зубьев (мм<sup>3</sup>/Вт);  $k_q$  – коэффициент вариации интенсивности изнашивания;  $fz$  – коэффициент трения между зубьями в процессе их зацепления [2];  $fb$  – коэффициент трения между зубьями при их взаимном скольжении из-за радиального биения зубчатых колес [2];  $\sigma H$  – контактные напряжения;  $v_{sz}$ ,  $v_{sb}$  – значения скоростей скольжения (м/с).

В результате расчета по формулам (6)–(8) для спроектированной передачи получили следующие величины износа зубьев шестерни и колеса:  $I_z = 0,473$  мм;  $I_b = 0,473$  мм;  $I = 0,946$  мм.

В результате проведенной работы спроектирована средствами САПР «Комплекс программ GEARS» зубчатая передача, предложена математическая модель для определения износов рабочих поверхностей и определены их численные значения, по которым можно прогнозировать ресурс работы, который составит 83000 ч.

## Литература

1. Попов, В. А. Модифицированная цилиндрическая эвольвентная косозубая передача внешнего зацепления с повышенными эксплуатационными свойствами // Вестник машиностроения. – 2011. – № 6. – С. 37–40.
2. Стасенко, Т. Д., Стасенко Д. Л. Моделирование износа на рабочих поверхностях зубчатых колес / Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч. ст. 7-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 2. – Гомель : Гомсельмаш, 2023. – С. 211–215.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КРИТЕРИЕВ ПРИ РАСЧЕТЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ МОНТАЖНЫХ КОРПУСОВ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ

О. К. Гурбан

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

Научный руководитель В. В. Пинчук

*Для того, чтобы установить оптимальное пространственное расположение гидроаппаратов при создании гидроблоков управления (ГУ) приводов технологического оборудования, необходимо разработать математическую модель монтажного корпуса ГУ и провести исследования влияния формы корпуса на его показатели качества. При определении критериев оптимальности монтажного корпуса будем учитывать различия по гидравлическим потерям давления только в магистральных каналах подвода и слива, условно приняв их равными в соединениях между гидроаппаратами (так как определить их можно только после установления свойств элементов подсистем на дальнейших этапах разработки ГУ).*

**Ключевые слова:** монтажный корпус, гидравлические потери, гидроблоки управления, технологические машины, гидроаппараты, критерий оптимальности.

Ранее установлено [1], что оптимальные пространственные компоновки ГУ можно получить за счет использования монтажного корпуса в виде многогранной призмы с различным числом ( $n$ ) площадок для установки гидроаппаратов, concentрично расположенных вокруг сквозных магистральных каналов подвода и слива рабочей жидкости. Установлено также [1], что нормирующими множителями при расчетах пространственной компоновки ГУ будут:  $\Delta p^*$  – гидравлические потери давления,  $V^*$  – объем монтажного корпуса и  $S^*$  – площадь наружной поверхности монтажного корпуса. При этом, следует принимать  $V^*$  и  $S^*$  при  $n = 3$ , а  $\Delta p^*$  при  $n = 7$  (при указанных значениях  $n$  параметры  $\Delta p^*$ ,  $V^*$  и  $S^*$  будут иметь минимальные значения).

После подстановки нормирующих множителей  $\Delta p^*$ ,  $V^*$  и  $S^*$  и соответствующих преобразований получим [1]

$$X = \left( \begin{array}{l} \frac{0,33K}{(N-1)/7+1} + \frac{0,33nK}{4\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)\sqrt{3}[(N-1)/3+1]} + \\ \left[ \frac{na/2\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right) + bnK}{\sqrt{3}a/2 + 3b[(N-1)/3+1]} \right] 0,33 \end{array} \right) \rightarrow \min \quad (1)$$

По результатам численных исследований выражения (1) получена зависимость общего критерия оптимальности ГУ  $X$  от числа граней  $n$  монтажного корпуса (рис. 1). По оси абсцисс на рисунке 1 отложены значения  $N$  – число гидроаппаратов, используемых в процессе разработки ГУ. По оси ординат отложены расчетные значения  $X(N, n, b)$  – общего критерия оптимальности ГУ при  $b = 0,6$ . С увеличением количества гидроаппаратов в гидросхеме кратность размера  $b$  призмы учитывалась коэффициентом  $K$ . Соотношение высоты призмы  $b$  к ее ширине  $a$  рассматривалось исходя из минимального числа гидроаппаратов в гидросхеме  $N = 3$ , в пределах  $b/a = 0,3-0,9$ . В расчетах принималось  $a = 1$ .

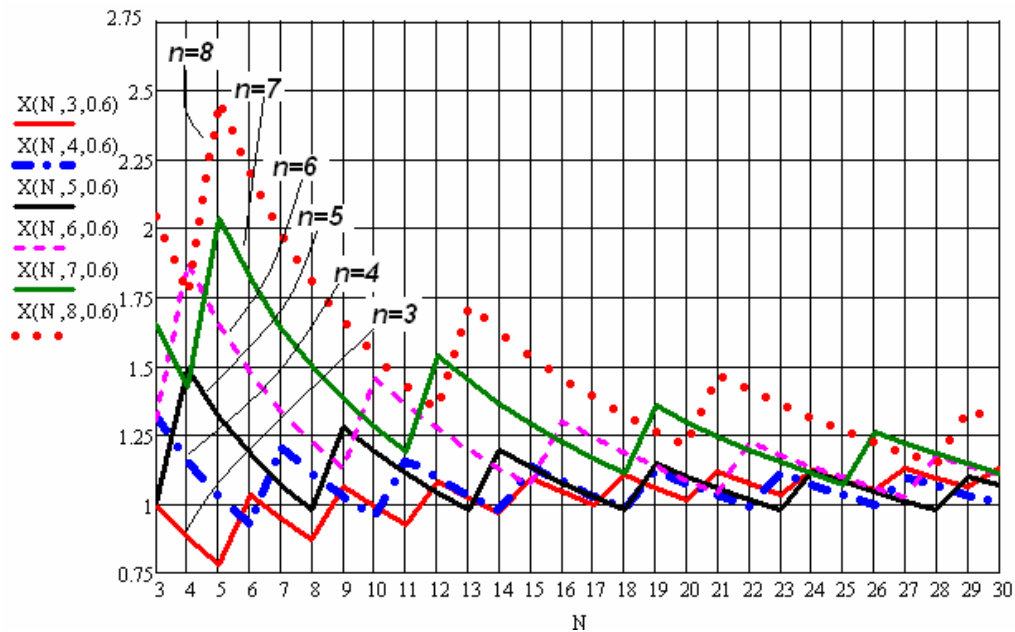


Рис. 1. График расчетных значений целевой функции  $X(N, n, b)$  для  $n = 3, 4, 5, 6, 7, 8$  и  $b = 0,6$

Число гидроаппаратов в принципиальной гидросхеме рассматривалось в пределах  $N = 3 - N_{\max}$  (в нашем случае  $N_{\max} = 30$ ), а число граней монтажного корпуса – в пределах  $n = 3, \dots, n_{\max}$  ( $n_{\max} = 8$ ). Аналогично строятся графики функции  $X(N, n, b)$  для остальных значений числа  $b$ .

Полученные графики целевой функции  $X(N, n, b)$  позволяют провести выборку числа граней многогранной призмы монтажного корпуса ГУ  $x_i$  и числа гидроаппаратов  $y_j$ , ( $i = 3, \dots, N_{\max}$ ;  $j = 3, \dots, n_{\max}$ ), удовлетворяющих условию  $X(N, n, b) \rightarrow \min$ . Для решения этой задачи по расчету параметров оптимальной компоновки агрегатно-модульных ГУ применим выборочный метод в статистических исследованиях.

Оптимизацию компоновки агрегатно-модульных ГУ по числу граней монтажного корпуса осуществим с помощью функции плотности нормального распределения по параметру  $n$  [3]:

$$f_n(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot D_n}} \exp\left(-\frac{1}{2D_n}(n - m_n)^2\right), \quad (2)$$

а оптимизацию компоновки агрегатно-модульных ГУ по двум параметрам: числу граней монтажного корпуса  $n$  и числу гидроаппаратов в принципиальной гидросхеме  $N$ , выполним при помощи двумерной функции плотности нормального распределения:

$$f(n, N) = \frac{1}{2\pi\sqrt{D_n D_N (1-R^2)}} e^{-\left[ \frac{1}{2(1-R^2)} \left( \frac{(n-m_n)^2}{D_n} - \frac{2R(n-m_n)^2(N-m_N)^2}{\sqrt{D_n D_N}} + \frac{(N-m_N)^2}{D_N} \right) \right]}, \quad (3)$$

где, в формулах (2) и (3) для нашего случая:

- математическое ожидание  $m_n = \frac{1}{N_{\max} - 2} \sum_{i=3}^{N_{\max}} x_i$  и  $m_N = \frac{1}{n_{\max} - 2} \sum_{j=3}^{n_{\max}} y_j$ ;
- дисперсия  $D_n = \frac{1}{N_{\max} - 2} \sum_{i=3}^{N_{\max}} (x_i - m_n)^2$  и  $D_N = \frac{1}{n_{\max} - 2} \sum_{j=3}^{n_{\max}} (y_j - m_N)^2$ ;
- коэффициент корреляции, учитывающий взаимосвязь параметров,

$$R = \frac{\sum_{i=3}^{N_{\max}} \sum_{j=3}^{n_{\max}} (x_i - m_n)(y_j - m_N) v_{i,j}}{\sqrt{D_n D_N}}.$$

Для определения вероятностей  $\mathbf{n}_{i,j}$  [3] оптимальных значений  $n$  и  $N$ , присутствующих в расчетной формуле коэффициента корреляции  $R$ , используем выражение, устанавливающее взаимосвязь этих параметров. В итоге получим:

$$v_{i,j} = \frac{K_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N_{\max}-2} \sum_{j=1}^{n_{\max}-2} K_{i,j}}, \quad (4)$$

где  $K_{i,j}$  – элементы матрицы двумерной функции Антье.

В формуле (4) должно выполняться условие нормировки двумерных вероятностей [3]

$$\sum_{i=1}^{N_{\max}-2} \sum_{j=1}^{n_{\max}-2} v_{i,j} = 1.$$

В нашем случае  $R = -0,00792$  (отрицательное значение), следовательно, для двумерного нормального распределения с увеличением числа граней  $n$  происходит уменьшение числа гидроаппаратов  $N$ .

Использование метода математического моделирования позволяет определить конструкционные параметры монтажного корпуса, с наименьшими затратами разработать гидравлический привод технологического оборудования.



## Литература

1. Пинчук, В. В. Расчет присоединительных размеров компонентов агрегатно-модульных гидроблоков управления гидроаппаратов технологических машин / В. В. Пинчук, А. В. Мархуленко, Д. Г. Ворочкин // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 1. – С. 20–25.
2. Блок модулей гидро- и пневмосистемы: а. с. 1087710 СССР, МКИФ15С5/00 / В. В. Пинчук [и др.] (Гомел. ГСКТБ ГА). – № 3477692 // 18–24; заявлено 03.08.82; опубл. 23.04.82 // Открытия. Изобрет. – 1984. – № 4. – С. 62.
3. Лисьев, В. П. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики. – М. : Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики, 2006. – 199 с.

**СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ  
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ****Ю. А. Храпуцкая***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

*Дан анализ способов, применяемых для предотвращения гидравлических ударов при эксплуатации мобильных объектов. Анализ данных способов позволил разработать схему гидравлическую принципиальную гидропривода рабочих органов агрегата подъемного АП-90.*

**Ключевые слова:** гидропривод подъемного агрегата, гидравлические удары, гидросистема, мобильные объекты.

Цель работы – обосновать схмотехническое решение гидравлического привода рабочих органов агрегата подъемного АП-90 как результат анализа способов предотвращения гидравлических ударов при эксплуатации, требований к точности движения и позиционирования, надежности и безопасности работы.

Гидравлический удар – это колебательный процесс, который возникает в упругом трубопроводе с капельной жидкостью при внезапном изменении ее скорости. Этот процесс характеризуется чередованием резких повышений и понижений давления [1].

Изменение давления при гидроударе связано с упругими деформациями жидкости и стенок трубопровода. Поскольку повышение давления при гидроударе может привести к разрушению трубопровода, требуемая прочность его стенок связана именно с этим параметром, и часто под гидроударом подразумевается резкое повышение давления в напорном трубопроводе при внезапном торможении потока жидкости.

Гидравлический удар чаще всего возникает при быстром закрытии или открытии органа управления потоком либо внезапный пуск или остановка насоса.

Схмотехнические решения для предотвращения гидравлических ударов при эксплуатации гидропривода [2]:

1. Использование гидроаккумулятора в качестве демпфирующего элемента (рис. 1). Использование в гидросистеме гидроаккумулятора позволяет избежать резких перепадов давления жидкости, тем самым помогает погасить гидравлический удар в трубопроводе.

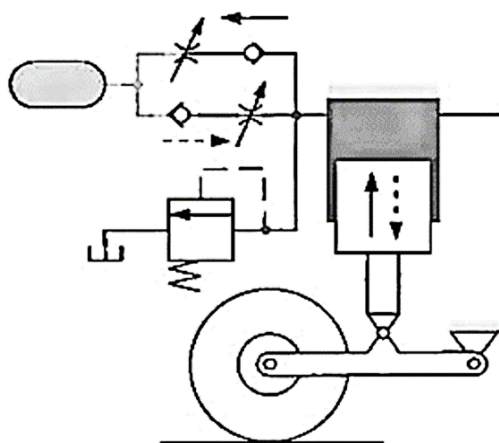


Рис. 1. Аккумулятор в качестве демпфирующего элемента

2. Использование клапана сброса давления, клапана с внешней разгрузкой. Для отслеживания гидравлического удара и возможности его погашения, используются клапаны сброса давления (установка его в напорной линии, который будет открываться при достижении заданного уровня давления) и клапаны с внешней разгрузкой (рис. 2). Клапаны разгрузки используются с насосами постоянного объема или в линии аккумулятора для сохранения энергии привода. Разгрузка в клапанах с внешней разгрузкой осуществляется по команде пилотного давления из другой гидролинии.

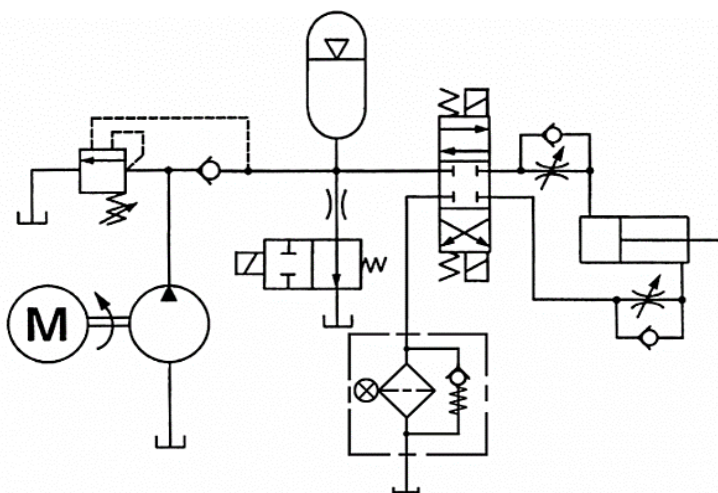


Рис. 2. Клапан с внешней разгрузкой в гидросистеме

На данной гидросхеме ограничение давления происходит как от внешнего, так и от внутреннего пилотного давления. При увеличении любого пилотного давления сверх показания установленного происходит открытие клапана.

Гидравлический удар можно смягчить. Необходимо увеличить время переключения распределителя использованием различных компенсаторов (гасителей) удара.

Агрегат подъемный АП-90 (рис. 3) предназначен для освоения и ремонта нефтяных и газовых скважин, а также подъема насосно-компрессорных и обсадных труб, установки эксплуатационного оборудования на устье скважин и ликвидации аварий. Гидравлическая система обеспечивает привод движения всех рабочих органов.

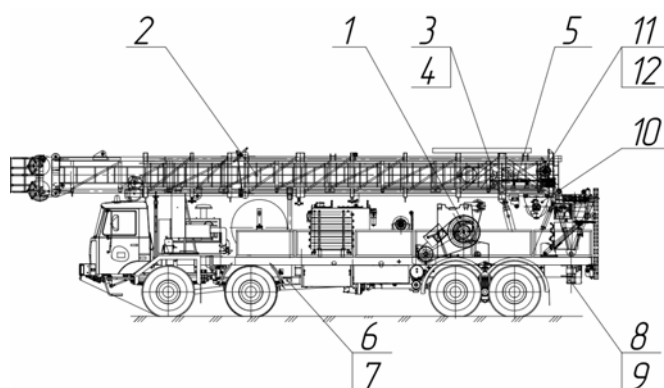


Рис. 3. Агрегат подъемный АП-90:

- 1 – лебедка грузовая; 2 – мачта; 3, 4 – гидродомкраты подъема мачты;  
 5 – гидрораскрепитель; 6, 7 – передние аутригеры; 8, 9 – задние аутригеры;  
 10 – гидроротор; 11 – лебедка выдвижения верхней секции мачты;  
 12 – лебедка вспомогательная

В соответствии с условиями эксплуатации гидравлический удар может возникнуть при реверсе движения лебедок, при резком опускании мачты и при задвижении аутригеров в время перехода агрегата из рабочего в транспортное положение.

На основании проведенного анализа разработана принципиальная схема гидропривода агрегата подъемного АП-90 (рис. 4) с учетом рассмотренных способов предотвращения гидравлических ударов. Предохранительные клапаны устанавливаются непосредственно возле гидромоторов лебедок для предотвращения превышения максимального давления при реверсе; гидрозамки устанавливаются у каждого гидроцилиндра для самофиксирования рабочих органов и защиты от самопроизвольного опускания приложенных масс; гидропривод снабжен манометрами для индивидуальной настройки давления для каждой группы гидродвигателей.

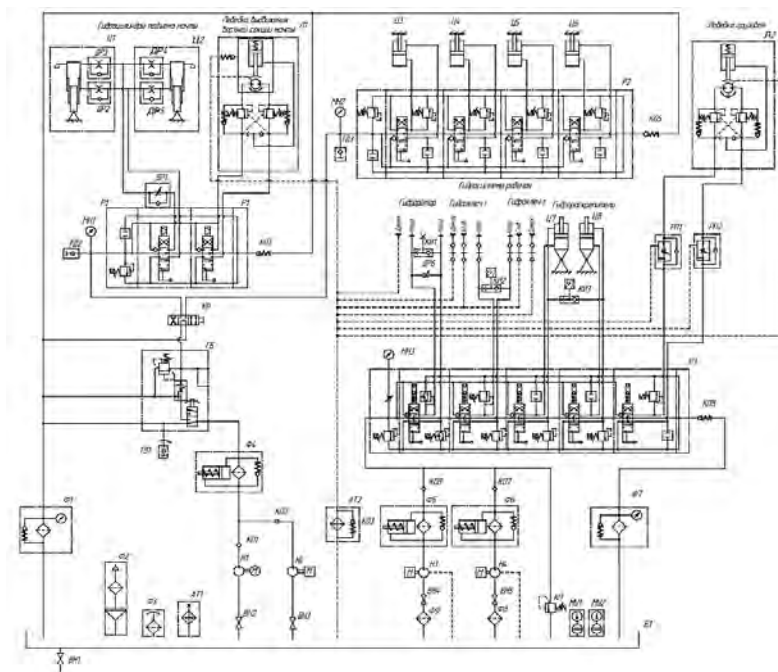


Рис. 4. Гидравлическая схема агрегата подъемного АП-90

В результате анализа условий эксплуатации агрегата подъемного, нагрузочных режимов работы исполнительных механизмов гидропривода, выявлены возможные условия возникновения гидравлических ударов, проанализированы способы их предотвращения и разработана гидравлическая схема, обеспечивающая необходимую безопасность и надежность работы гидросистемы.

#### Литература

1. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) : учеб. для вузов / Р. Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 672 с.
2. Башта, Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1972. – 320 с.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ ЧКАЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. А. Бугримов

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

Научный руководитель В. Д. Порошин

*Изложены общие сведения о Чкаловском нефтяном месторождении. Рассмотрены особенности его геологического строения и нефтегазоносности, выполнен литолого-стратиграфический и тектонический анализ продуктивных горизонтов.*

**Ключевые слова:** геологическое строение, Чкаловское месторождение, нефтегазоносность, литология, стратиграфия, тектоника.

Цель исследования – провести изучение геологического строения и нефтеносности Чкаловского месторождения.

В 1989 г. впервые запасы Чкаловского месторождения поставлены на баланс ПО «Белорусгеология» В 1994 г. месторождение передано на баланс РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». Первые притоки нефти были получены в открытом стволе поисковой скважины №3 из интервала 4133-4171 м и в интервале перфорации 4180-4187 м дебитами 360 м<sup>3</sup>/сут и 98 м<sup>3</sup>/сут, соответственно.

Чкаловское месторождение расположено в пределах южных крыльев Речицко-Вишанской зоны поднятия. В геологическом строении Чкаловской площади принимают участие породы кристаллического фундамента архейско-нижнепротерозойского возраста и осадочного чехла, представленные верхнепротерозойскими, палеозойскими и мезокайнозойскими образованиями. Нефтяные залежи приурочены к верхнедевонским отложениям боричевских слоев лебедянского горизонта верхней соленосной толщи и отложениям петриковского, елецкого и задонского горизонтов межсолевого комплекса [1]. Коллекторами в лебедянском горизонте служат известняки.

Основные запасы нефти Чкаловского месторождения связаны с межсолевыми карбонатными отложениями. Межсолевой комплекс включает отложения домановичского, задонского, елецкого и петриковского горизонтов. Общая вскрытая толщина комплекса изменяется от 20 м (скважина № 1) до 376 м (скважина № 23). По поверхности межсолевого комплекса Чкаловская структура представляет собой узкую, вытянутую с севера-запада на юго-восток полуантиклинальную складку, осложненную разрывными нарушениями субмеридионального простирания, которые делят структуру на два блока – западный и восточный. С севера и северо-востока ме-

сторожение ограничено зоной отсутствия межсолевых отложений. Коллекторами в петриковском и задонском горизонтах являются известняки и доломиты, а в елецком – преимущественно доломиты. По характеру пустотного пространства они относятся к порово-каверново-трещинному типу. Залежи нефти межсолевого комплекса сводовые, тектонически экранированные, ограничены контуром нефтеносности на отметке – 4150 м. По степени заполнения ловушки отнесены к массивно-пластовым.

Знание особенностей геологического строения залежей нефти любого нефтедобывающего района имеет большое практическое значение, так как они являются объектами дальнейшего освоения. Представленные материалы могут быть использованы при доразведке месторождения и проектировании его дальнейшей разработки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Полезные ископаемые Беларуси / редкол.: П. З. Хомич [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.

## О ПРИМЕНЕНИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ КЕРНА С НИЗКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

**Н. В. Бочаров**

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

Научный руководитель В. М. Ткачев

*Рассмотрены основные средства удаления шума (фильтрации) на изображениях компьютерной томографии керна с целью подготовки их для дальнейшей сегментации. Рассмотренные исходные изображения компьютерной томографии характеризовались низким разрешением. Среди предложенных фильтров наилучшую классификацию вокселей по градациям оттенков серого цвета показал фильтр нелокального среднего, позволяющий производить уравнивание цветовой интенсивности соседних вокселей по критерию схожести с сохранением границ между различными объектами.*

**Ключевые слова:** цифровой керн, компьютерная томография, фильтрация, фильтр нелокального среднего.

В настоящее время нефтегазовая отрасль претерпевает активную цифровизацию всех ее направлений. Блок геологоразведочных работ всегда был на передовой во внедрении различных инновационных цифровых решений. Важной задачей перед специалистами ведущих нефтегазовых инжиниринговых компаний является внедрение цифровых технологий в лабораторные исследования керна с последующей интеграцией полученных результатов в систему «цифрового месторождения». Одним из таких решений стало создание «цифрового керна», который представляет собой совокупность данных об объемной структуре породы, элементном, химическом и минеральном составе ее компонентов: пустотном пространстве, органическом веществе, рудных и драгоценных металлов, совмещенная на различных масштабах от метров до нанометров, а также результатов компьютерной обработки трехмерных моделей внутреннего строения образцов и моделирования физических свойств с привязкой получаемых данных к ГИС и ГТИ [1].

Целью данной работы является рассмотрение существующих алгоритмов первичной подготовки изображений компьютерной томографии (КТ) керна – фильтрации – с низким разрешением для последующей обработки и анализа.

Цифровой керн на данный момент понимается как модель пустотного пространства или поросетевая модель микрообразца (от мм до нескольких мкм) горной породы для осуществления гидродинамического моделирования различных физических процессов. Для построения таких моделей используется КТ с высоким разрешением с размером вокселя на несколько порядков меньше, чем наименьшая структурная единица (зерна или поры) исследуемого образца. При этом кратно увеличивается время таких исследований и требуемые вычислительные мощности.

В данной работе рассматривались кавернозные образцы карбонатных горных пород для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) около крупных каверн и трещин, которые являются естественными концентраторами напряжения и местом инициализации локального разрушения массива горных пород. С геомеханической точки зрения межзерновая микропустотность не имеет особого интереса для моделирования НДС образца и может рассматриваться как матричный материал с одинаковым распределением механических свойств. Данный факт позволяет для создания цифрового керна использовать КТ изображения с низким разрешением, где сохраняются только геомеханически значимые объекты.

Первым этапом создания цифровой модели на основе изображений КТ является фильтрация. Как и все методы визуализации, рентгеновская визуализация подвержена воздействию шума. Шум может создавать нежелательные артефакты, вызывать размытие изображения и часто может быть визуально описан как «соль и перец». Для устранения шума было разработано множество алгоритмов фильтрации, однако у каждого фильтра есть свои преимущества и недостатки, когда речь заходит об устранении зернистости при сохранении контуров объекта. В частности, в образцах горных пород, где плотность объектов очень близка, иногда бывает трудно различить их границы. Эти две характеристики, зернистость и сохранность краев, важные аспекты фильтрации изображений и сегментации различных фаз. Результирующее отфильтрованное изображение должно сохранять границы различных фаз и пустот. Таким образом, важно, чтобы отфильтрованное изображение не было слишком размытым. В данной работе обработка изображений осуществлялась в программном комплексе Avizo 3D, в котором сравнивалось несколько алгоритмов фильтрации: медианный фильтр, фильтр нелокального среднего, мажоритарный фильтр, гауссовский фильтр, билатеральный фильтр.

Фильтры – это математические алгоритмы, которые реализуются в каждом пикселе и его соседях. Фильтры обычно пытаются заменить любое значение пикселя, которое несовместимо с его соседями. Самый простой подход заключается в свертке ядра (матрицы) изображения. Ядро содержит некоторые значения, которые могли бы изменить изображение, и в зависимости от значений может быть выполнено несколько задач, таких как уменьшение шума, размытие, повышение резкости и определение границ. Размер ядра может составлять два или три измерения в зависимости от изображения. При выборе размера ядра существует естественный компромисс: чем меньше ядро, тем больше время вычислений. Однако если ядро слишком велико, центральный воксель может быть сильно изменен из-за увеличения вероятности наличия существенно разных оттенков серого в соседних вокселях в большом ядре. Большие размеры ядра также могут привести к размыванию деталей, что нежелательно.

На рис. 1 приведена качественная визуализация изменения качества изображения после применения фильтров.

В исходном изображении (рис. 1) присутствует четыре фазы: первая и вторая минеральные фазы, фаза пустотного пространства и фоновые воксели. По графику распределения вокселей по значению их оттенка серого (рис. 2) на исходном изображении эти фазы плохо выделяются, так как воксели имеют схожие значения от-

тенка серого. Применение мажоритарного фильтра не принесло изменений в вид кривой. После применения остальных фильтров начали выделяться пики, характеризующие различные минеральные фазы, причем фильтр нелокального среднего значительно уменьшил диапазон значений оттенка серого для каждой из фаз, что существенно образом улучшит качество их сегментации.

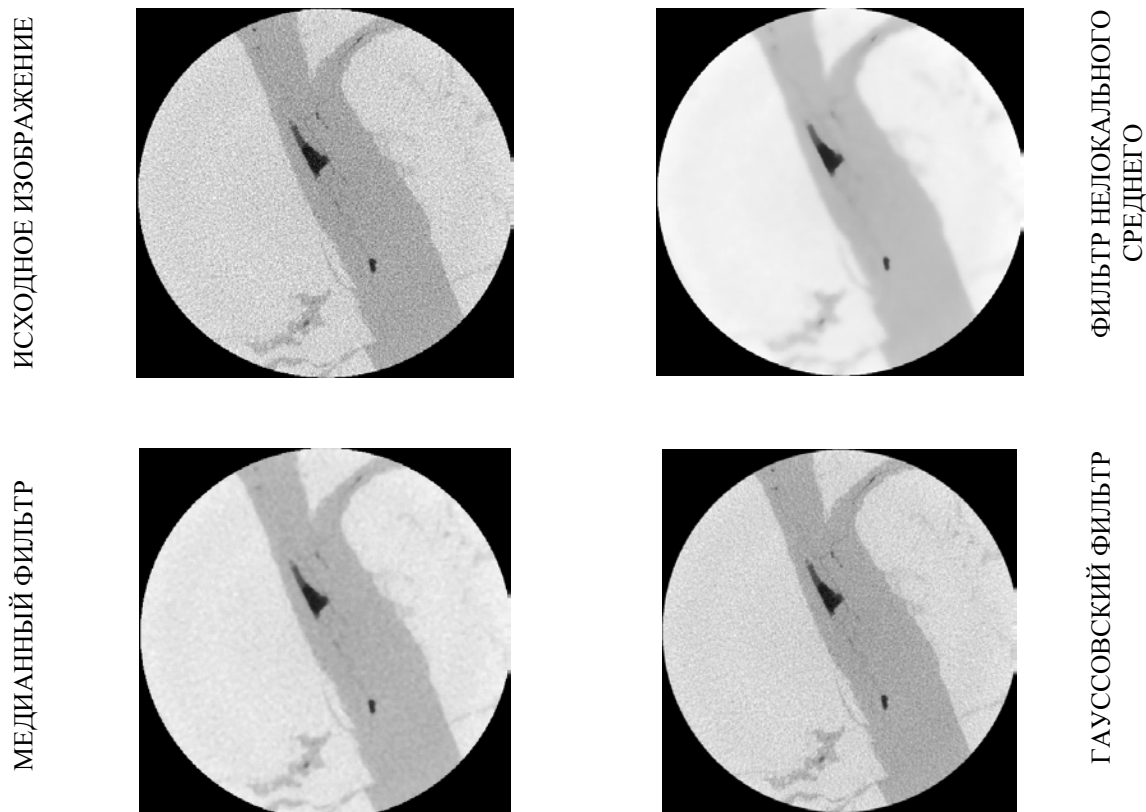


Рис. 1. Визуализация результатов применения фильтров



Рис. 2. График распределения вокселей по градациям значений оттенка серого цвета для исходного изображения и изображений после применения фильтров

Таким образом, в работе продемонстрированы результаты первичной обработки изображений компьютерной томографии с низким разрешением для последующего решения задач геомеханического моделирования. Был выбран ряд средств фильтрации для оценки их применимости для таких изображений. По результатам исследования был выбран фильтр нелокального среднего, как наиболее оптимальный вариант по соотношению качества результата и времени обработки.

*Работа выполнена при грантовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь.*

#### Литература

1. Технология анализа и цифрового моделирования керна как составляющая часть инфраструктуры «цифрового месторождения». От геологоразведки до промышленной эксплуатации / В. Я. Шкловер [и др.] // Недропользование XXI век. – 2018. – № 5 (75). – С. 84–97.
2. Digital rock physics benchmarks. Part II: Computing effective properties / Andrä, Heiko [et al.]” *Comput. Geosci*, 50, 2013. – P. 33–43.
3. Guntoro, P. I.; Ghorbani, Y.; Koch, P.-H.; Rosenkranz, J. X-ray Microcomputed Tomography ( $\mu$ CT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods. *Minerals*. – 2019. – P. 9, 183. DOI.org/10.3390/min9030183

## ИСТОЧНИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ПОТОКЕ ДОБЫВАЕМОЙ ЖИДКОСТИ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУЙНОГО НАСОСА ДЛЯ ОСВОЕНИЯ СКВАЖИН ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

**В. С. Горбаченко**

*Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти,  
г. Гомель*

Научный руководитель Н. А. Демяненко

*Одним из осложняющих факторов в добыче нефти по многим нефтедобывающим регионам является наличие повышенной концентрации механических примесей в потоке добываемой продукции. Это часто приводит к отказу или снижению напорно-расходных характеристик скважинного насосного оборудования. В данной работе рассмотрены причины появления механических примесей в продукции скважин на месторождениях Припятского прогиба и опыт применения струйного насоса для очистки ствола скважины и призабойной зоны пласта от механических примесей перед спуском в скважины глубинно-насосного оборудования.*

**Ключевые слова:** механические примеси, освоение скважины, струйный насос.

Как показывает практика, на скважинах месторождений Припятского прогиба, введенных в эксплуатацию после бурения, капитального или подземного ремонтов, в начальный период времени их эксплуатации (до 30 суток) отмечается повышенная концентрация твердых частиц в потоке добываемой продукции. Высокое содержание механических примесей в потоке добываемой жидкости приводит к отказу глубинно-насосного оборудования (заклинивание, слом элементов) или снижению его напорно-расходных характеристик. Это требует проведения внепланового ремонта скважин по смене глубинно-насосного оборудования (ГНО). Поэтому направление по изучению вопросов о причинах появления механических примесей в потоке добываемой жидкости и методах очистки ствола скважины с призабойной зоной пласта (ПЗП) от них является актуальным.

Цель работы – определение источников механических примесей в потоке добываемой жидкости. Применение струйного насоса для освоения и эксплуатации скважин Припятского прогиба.



Для определения источников механических примесей в добываемой продукции выполнялись отборы проб твердой массы из поднятого со скважин насосного оборудования. Лабораторный анализ показал, что основными составляющими отобранных проб являются:

- 1) глина, песок;
- 2) резиновая крошка, древесные опилки;
- 3) проппант;
- 4) металлические частицы, продукты коррозии.

Глина и песок в большей степени отмечаются в пробах, отобранных из насосного оборудования, поднятого из скважин после бурения и в меньшей степени – из скважин после капитального и подземного ремонтов. Вынос песка или глины из нефтенасыщенных коллекторов Припятского прогиба маловероятен, так как коллектора представлены крепкими консолидированными карбонатными и цементированными терригенными породами. Следовательно, глина и песок заносятся в скважину в процессе ее бурения и выполнения ремонтных работ.

Резиновая крошка и древесные опилки добавляются в буровой раствор с целью ликвидации интенсивных поглощений раствора в пласты с низким пластовым давлением, что объясняет их проявление на скважинах после бурения или после перехода на другой интервал/горизонт.

В случае рассмотрения проппанта в качестве загрязнителя ГНО, данный компонент может попасть в скважину при проведении гидравлического разрыва пласта, при котором расклинивающий материал (проппант) либо не полностью закачивается в трещину, либо плохо закреплен в трещине, либо не отмыт из скважины после освоения.

Наличие металлических частиц и продуктов коррозии в потоке добываемой жидкости отмечается на скважинах после проведения любых работ. При выполнении спускоподъемных операций (замены) ГНО происходит обтирание внутренней поверхности эксплуатационной колонны наружной поверхностью колонны насосно-компрессорных труб (НКТ). В результате чего продукты коррозии, образовавшиеся на соответствующих поверхностях эксплуатационной колонны и НКТ, срываются и попадают в скважинную жидкость. В случае интенсификации притока жидкости из продуктивного пласта при помощи кислоты процесс коррозии взаимодействующих с кислотой элементов усиливается. В результате коррозионных процессов образуются продукты коррозии, представляющие собой твердые частицы, которые в процессе эксплуатации скважины оседают на забой или выносятся потоком добываемой жидкости на дневную поверхность. Если рассматривать нововведенные скважины (после бурения), то в этом случае металлические частицы образуются в результате выполнения перфорационных, фрезеровочных и тому подобных работ.

Поэтому для снижения вероятности выхода из строя глубинно-насосного оборудования необходимо на скважинах после геолого-технических мероприятий осуществлять как очистку ствола скважины, так и ПЗП.

Для выполнения очистных мероприятий на скважинах месторождений Припятского прогиба применяются следующие технологии: компрессирование, комплексная очистка скважины (желонкой очистной с тарельчатыми клапанами), колтюбинг с гидромониторными насадками, прямая/обратная промывка или комбинированный подход. Однако представленные выше способы не позволяют создать на пласт депрессию, достаточную для извлечения из ПЗП всех механических примесей, что снижает качество очистки ПЗП.

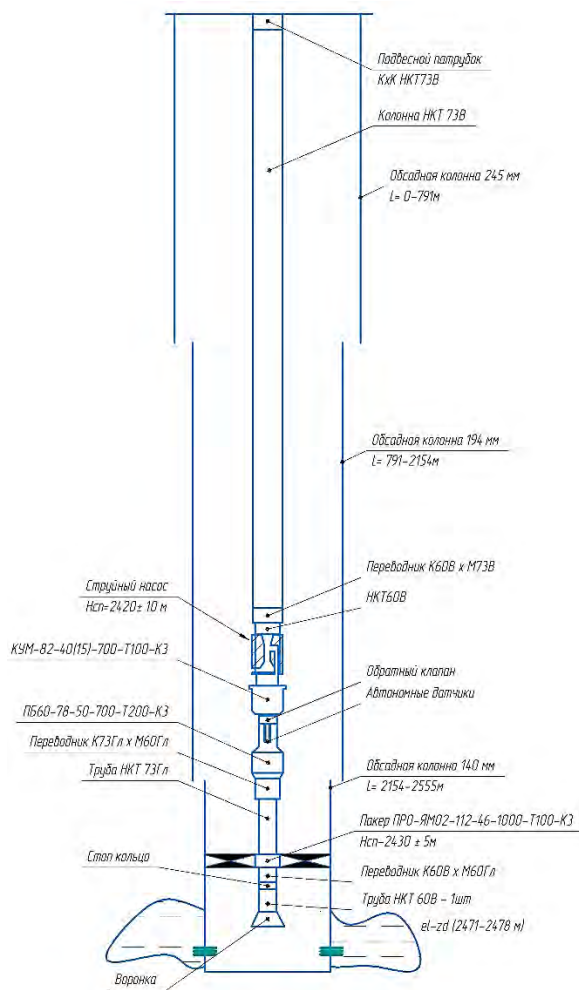


Рис. 1. Технологическая схема размещения подземного оборудования

Одним из возможных способов освоения скважин, позволяющих очистить ствол скважины и ПЗП от механических примесей, является технология воздействия глубокими переменными депрессиями с применением струйного насоса. Для адаптации рассматриваемой технологии к условиям эксплуатации скважин на месторождениях Припятского прогиба было подобрано технологическое оборудование, разработаны технологические схемы, сконструирован наземный фильтр тонкой очистки. Конструкция рассматриваемого струйного насоса позволяет выполнять следующие виды работ:

1) освоение скважины, в случае применения вставки при которой рабочая жидкость нагнетается в колонну насосно-компрессорных труб, а пластовая продукция поднимается на дневную поверхность по затрубному пространству скважины;

2) добыча нефти в длительном режиме, в случае применения вставки при которой рабочая жидкость нагнетается в затрубное пространство скважины, а добываемая пластовая продукция поступает на дневную поверхность по НКТ;

3) закачка химического реагента (к примеру, кислоты) в пласт при установке блокирующей вставки в корпус струйного насоса;

4) опрессовка колонны НКТ и затрубного пространства (пакер, эксплуатационную колонну) при установке опрессовочной вставки в корпус струйного насоса;

5) проведение гидродинамических исследований.

Была разработана программа работ и проведены опытно-промысловые испытания данной технологии на четырех скважинах Припятского прогиба. На основании испытаний было установлено, что данная технология позволяет выполнить очистку ствола скважины и призабойной зоны пласта от механических примесей, а также проводить гидродинамические исследования по определению пластового давления и коэффициента продуктивности скважины.

В результате испытаний доработаны технологические схемы размещения и обвязки подземного и наземного оборудования, которые представлены на рис. 1 и 2.

Выполненные опытные работы позволили обосновать критерии выбора объектов, на которых целесообразно проводить очистку ствола скважины и ПЗП с применением технологии дренирования пласта струйным насосом. Эту технологию рекомендовано применять на скважинах:

- после ГТМ, где суммарный период освоения с выходом на установившийся режим работы планируется не более семи суток;
- вновь пробуренных, по которым необходимо выполнить экспресс-оценку добычных возможностей и на которых отсутствует инфраструктура (нефтелиния, ВЛ)
- с низким пластовым давлением, по которым необходимо произвести глубокую очистку призабойной зоны пласта;
- в которых отмечались поглощения буровых растворов;
- в которых пласты вскрывались бурением с высокими репрессиями на пласт (более 5,0 МПа);
- по которым имеется необходимость проведения как очистки ПЗП, так и гидродинамических исследований с целью корректного подбора погружного оборудования.

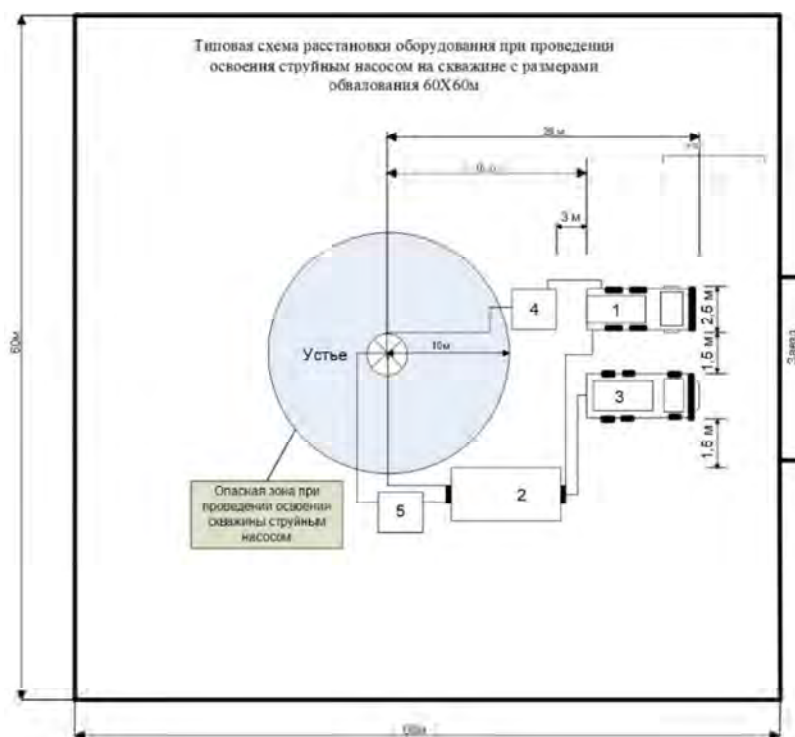


Рис. 2. Технологическая схема обвязки наземного оборудования:  
 1 – агрегат УН-12 или Н-505; 2 – мерная емкость;  
 3 – автоцистерна; 4 – блок фильтрации; 5 – насос для раскочки жидкости из емкости в н/л

Наличие твердых взвешенных частиц в потоке добываемой жидкости является актуальной проблемой для скважин Припятского прогиба. Для очистки ствола скважины и ПЗП рассмотрена технология струйного насоса с замкнутой системой подачи рабочей жидкости.

Разработанные технологические схемы, выбранное и сконструированное оборудование позволяют выполнять освоение и эксплуатацию, а также проводить гидродинамические исследования скважин месторождений Припятского прогиба с использованием струйного насоса.

## К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

К. В. Ридкина

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

Научный руководитель С. И. Кириллук

*Рассмотрен вопрос повышения тягово-эксплуатационных показателей работы почвообрабатывающих машин за счет рационального распределения тягового сопротивления между энергетическим и технологическим (опорная тележка с ведущими колесами) модулями мобильного агрегата при наименьшей величине потерь мощности на буксование движителей.*

**Ключевые слова:** мобильное энергосредство, тяговое усилие, тяговое сопротивление, тяговая мощность, тенденции, эффективность.

Перспективное направление для использования высокоэнергонасыщенных мобильных энергосредств на обработке почвы открывает модульная схема построения агрегата. Так, на пахоте эта схема включает энергетический модуль (источник энергии, в качестве которого используется тяговое энергосредство) и технологический модуль, получающий привод от энергетической установки основного модуля. Между модулями предполагается навесить рабочую машину – плуг. Технологический модуль – это приспособление в виде опорной тележки с ведущими колесами.

Привод ведущих колес технологического модуля осуществляется от двигателя трактора посредством гидравлической системы или электрической системы с гидравлической или электромеханической бесступенчатой трансмиссией. В таком агрегате тяговое усилие будет создаваться как сумма масс энергетического и технологического модулей. Масса технологического модуля используется для создания дополнительной силы тяги. При этом только часть мощности двигателя трактора будет реализовываться через его ходовую систему, и его удельная материалоемкость может быть снижена. В зависимости от соотношения сцепных весов трактора и технологического модуля может быть обеспечен прирост тягового усилия в пределах от 30 до 70 %. Это позволяет увеличить тяговую мощность мобильных энергосредств в таком агрегате можно в 1,3–1,5 раза в сравнении с агрегатами, построенными по традиционной схеме.

Производительность выполняемого технологического процесса будет зависеть от характера распределения тягового сопротивления почвообрабатывающей машины между энергетическим и технологическим модулями мобильного энергетического средства при работе агрегата. Тогда тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины  $F_{\text{ТЯГ}}$  будет равно:

$$F_{\text{ТЯГ}} = F_{\text{МЭС}} + F_{\text{М}};$$

где  $F_{\text{МЭС}}$ ,  $F_{\text{М}}$  – тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины преодолеваемое, соответственно, энергетическим и технологическим модулями, Н.

Доля тягового сопротивления почвообрабатывающей машины, приходящаяся на энергетической модуль, представим как отношение технологического модуля к тяговому сопротивлению:

$$\eta_{\text{МЭС}} = \frac{F_{\text{МЭС}}}{F_{\text{ТЯГ}}} = \frac{F_{\text{МЭС}}}{F_{\text{МЭС}} + F_{\text{М}}}.$$

Тогда тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины, преодолеваемое энергетическим и технологическим модулями, соответственно, можно представить как произведение доли тягового сопротивления почвообрабатывающей машины к тяговому сопротивлению:

$$F_{\text{МЭС}} = \eta_{\text{МЭС}} P_{\text{МЭС}}; F_{\text{М}} = \eta_{\text{М}} P_{\text{T}} = (1 - \eta_{\text{T}}) P_{\text{T}},$$

где  $\eta_{\text{М}}$  – доля тягового сопротивления почвообрабатывающей машины, приходящаяся на технологический модуль.

В процессе работы почвообрабатывающего агрегата всегда обеспечивается равенство, где доля тягового сопротивления почвообрабатывающей машины с долей тягового сопротивления почвообрабатывающей машины, приходящиеся на энергетический модуль, равны 1:

$$\eta_{\text{МЭС}} + \eta_{\text{М}} = 1.$$

Проанализируем потери мощности на буксование  $N_{\delta}$  при работе почвообрабатывающего агрегата, имеющего приводные опорные колеса технологического модуля, у которого и вес рабочей машины используется для создания касательной силы тяги. Величина теряемой мощности  $N_{\delta}$  в агрегате, построенном по модульной схеме, пропорциональна величине буксования движителей энергетического и технологического модулей и определяется по уравнению:

$$N_{\delta_{\text{маш}}} = N_{\delta_{\text{МЭС}}} + N_{\delta_{\text{М}}} = (F_{\text{МЭС}} + G_{\text{МЭС}} f_{\text{МЭС}}) \frac{v \delta_{\text{МЭС}}}{1 - \delta_{\text{МЭС}}} + (F_{\text{М}} + G_{\text{М}} f_{\text{М}}) \frac{v \delta_{\text{М}}}{1 - \delta_{\text{М}}},$$

где  $N_{\delta_{\text{МЭС}}}$ ,  $N_{\delta_{\text{М}}}$  – потери мощности на буксование движителей, соответственно, энергетического и технологического модулей, Вт;  $G_{\text{МЭС}}$ ,  $G_{\text{М}}$  – сцепной вес, соответственно, энергетического и технологического модулей, Н;  $f_{\text{МЭС}}$ ,  $f_{\text{М}}$  – коэффициент сопротивления качению, соответственно, энергетического и технологического модулей;  $\delta_{\text{МЭС}}$ ,  $\delta_{\text{М}}$  – буксование движителей, соответственно, энергетического и технологического модулей.

Достаточно полно результаты тяговых испытаний мобильных энергосредств колесной формулой 4К4 в пределах буксования движителей 0,05–0,15 можно аппроксимировать линейным уравнением, которое имеет вид:

$$\delta_{\text{МЭС}} = a_{\text{МЭС}} \frac{F_{\text{МЭС}}}{G_{\text{МЭС}}} = a_{\text{МЭС}} \frac{P\eta_{\text{МЭС}}}{G_{\text{МЭС}}};$$

$$\delta_{\text{М}} = a_{\text{М}} \frac{F_{\text{М}}}{G_{\text{М}}} = a_{\text{М}} \frac{P(1 - \varepsilon_{\text{М}})}{G_{\text{М}}},$$

где  $a_{\text{T}}$ ,  $a_{\text{М}}$  – постоянный безразмерный коэффициент, определяемый по результатам тяговых испытаний, соответственно, энергетического и технологического модулей.

В пахотном агрегате на основе МЭС энергетический и технологический модули работают в одинаковых почвенных условиях. В связи с этим можно представить их в виде:

$$F_{\text{МЭС}} = F_{\text{М}} = F; \quad a_{\text{МЭС}} = a_{\text{М}} = a.$$

Доля тягового усилия энергетического модуля в тяговом сопротивлении почвообрабатывающей машины при минимуме потерь мощности на буксование будет равна:

$$\varepsilon_{\text{МЭС}} = \frac{G_{\text{МЭС}}}{G_{\text{МЭС}} + G_{\text{М}}}.$$

Преобразовывая вышеприведенные формулы, можно получить выражения для определения тяговых усилий энергетического и технологического модулей в агрегате, построенных по модульной схеме. Для пахотного агрегата эти формулы примут вид:

$$F_{\text{МЭС}} = P \frac{G_{\text{МЭС}}}{G_{\text{МЭС}} + G_{\text{М}}};$$

$$F_{\text{М}} = P \frac{G_{\text{М}}}{G_{\text{МЭС}} + G_{\text{М}}}.$$

Величина буксования движителей энергетического и технологического модулей определится в виде следующей формулы:

$$\delta_{\text{МЭС}} = \delta_{\text{М}} = a \frac{P}{G_{\text{МЭС}} + G_{\text{М}}}.$$

Таким образом, перспективным направлением для использования высокоэнергонасыщенных мобильных энергосредств колесной формулой 4К4 является возможность модульного построения схемы почвообрабатывающего агрегата. Тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины в таком агрегате должно распределяться между энергетическими и технологическими модулями пропорционально доли их сцепных весов в общем, сцепном весе, что обеспечит рациональное повышение эксплуатационных показателей работы тяговой мощности за счет минимума потерь мощности на буксование движителей. Передавая часть мощности двигателя энергетического средства на привод колес технологического модуля можно повышать тяговую мощность мобильного энергосредства или снижать общий вес само-

ходной машины, что будет в итоге способствовать снижению затрат топлива на выполнение технологического процесса обработки почвы и повышению производительности.

#### Литература

1. Мисуно, О. И. Распределение тягового сопротивления почвообрабатывающей машины между модулями мобильного энергетического средства / О. И. Мисуно, Д. А. Жданко // Агротрансформация. – 2023. – № 2 (155). – С. 2–6.
2. Экспериментальные исследования мобильного энергетического средства МЭС-330 «Автомобиль» на пахоте / В. В. Адамчук [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства: вып. 51. – Минск : Беларус. навука, 2018. – С. 25–28.

## ПОВЫШЕНИЕ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ПНУ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭНЕРГОСРЕДСТВА СЭУ-350

В. О. Литвинова

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

Научный руководитель В. Б. Попов

*Уборочная техника проектируется с использованием математического моделирования на основе функциональных математических моделей функциональных математических моделей. Использование функциональных математических моделей позволяет получить рациональное решение, уменьшить при этом объем испытаний.*

**Ключевые слова:** грузоподъемность, передаточное число, средство универсальное энергетическое, математическая модель, управляемость, функциональная математическая модель.

Появление на рынке ряда универсальных энергетических средств с приводной, а не тяговой, как у тракторов, концепцией, с набором сменных адаптеров для выполнения различных сельскохозяйственных работ. Одним из опытных проектов стала модель СЭУ-350 «Полесье-350», предназначенная для работы с уборочными сельскохозяйственными машинами и комбинированными агрегатами различного класса (рис. 1).

Цель работы – повысить грузоподъемность подъемно-навесного устройства (ПНУ) СЭУ-350 при одновременном соблюдении требований по управляемости.

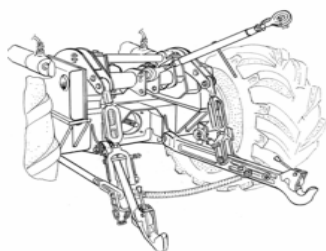


Рис. 1. Подъемно-навесное устройство СЭУ-350 «Полесье»

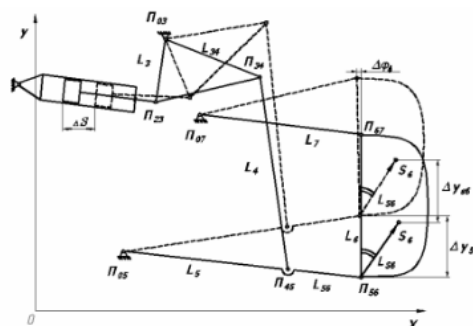


Рис. 2. Схема плоского аналога механизма навески (МН) СЭУ-350

Для определения грузоподъемности ПНУ используются процедуры геометрического и кинематического анализа. Геометрический анализ предполагает определение углов, образуемых звеньями механизма навески (МН) в правой декартовой системе координат и координат подвижных параметров, а также центра тяжести МН (рис. 2).

$$X_{56}(S) = X_{05} + L_{56} \cdot \cos(\varphi_5(S));$$

$$Y_{56}(S) = Y_{05} + L_{56} \cdot \sin(\varphi_5(S)).$$

Проверка

$$X_{67}(S) = X_{07} + L_7 \cdot \cos(\varphi_7(S));$$

$$X_{671}(S) = X_{56}(S) + L_6 \cdot \cos(\varphi_6(S));$$

$$Y_{67}(S) = Y_{07} + L_7 \cdot \sin(\varphi_7(S));$$

$$Y_{671}(S) = Y_{56}(S) + L_6 \cdot \sin(\varphi_6(S));$$

$$X_{S6}(S) = X_{56}(S) + L_{S6} \cdot \cos(\varphi_{S6} + \varphi_6(S));$$

$$Y_{S6}(S) = Y_{56}(S) + L_{S6} \cdot \sin(\varphi_{S6} + \varphi_6(S)).$$

Результаты расчетов процедуры геометрического анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов процедуры геометрического анализа

S =	X <sub>67</sub> (S) =	Y <sub>67</sub> (S) =	X <sub>S6</sub> (S) =	Y <sub>S6</sub> (S) =	X <sub>671</sub> (S) =	Y <sub>671</sub> (S) =
0.571	1.123	0.78	2.236	0.473	1.123	0.78
0.596	1.174	0.871	2.279	0.537	1.174	0.871
0.621	1.21	0.957	2.308	0.6	1.21	0.957
0.646	1.237	1.04	2.329	0.664	1.237	1.04
0.671	1.255	1.12	2.341	0.728	1.255	1.12
0.696	1.266	1.199	2.347	0.792	1.266	1.199
0.721	1.271	1.276	2.346	0.855	1.271	1.276
0.746	1.27	1.352	2.339	0.917	1.27	1.352
0.771	1.262	1.427	2.326	0.978	1.262	1.427
0.796	1.249	1.5	2.307	1.039	1.249	1.5
0.821	1.231	1.573	2.282	1.097	1.231	1.573

Процедура кинематического анализа состоит в определении аналогов угловых скоростей звеньев, их передаточных отношений и передаточных чисел МН ПНУ.

Например, аналог угловой скорости поворотного рычага определяется по выражению.

$$\varphi_3(S) = \frac{2S}{\sqrt{4 \cdot L_{13}^2 \cdot L_3^2 - [S^2 - (L_3^2 + L_{13}^2)]^2}}.$$



Передаточные отношения, характеризующие соотношение угловых скоростей звеньев, приведены ниже:

$$U_{53}(S) = \frac{L_{34} \cdot \sin(\varphi_{34}(S) - \varphi_4(S))}{L_5 \cdot \sin(\varphi_5(S) - \varphi_4(S))};$$

$$U_{63}(S) = U_{65}(S) \cdot U_{53}(S).$$

Определение основного передаточного числа МН [1]:

$$I_s(S) = I_m(S) + \varphi_6(S) L_{S6} \cdot \cos(\varphi_{S6} + \varphi_6(S)).$$

Определение передаточного числа МН на оси подвеса [1]:

$$I_m(S) = \varphi_5(S) L_{56} \cdot \cos(\varphi_5(S)).$$

Для проверки правильности кинематического анализа используем выражения для передаточных чисел МН, полученных другим способом [2]. В результате имеем:

$$I_{sp}(S) = \varphi_6(S)(X_{S6}(S) - X_p(S));$$

$$I_m p(S) = \varphi_6(S)(X_{56}(S) - X_p(S));$$

$$a(S) = (X_{05} - X_{56}(S))(Y_{67}(S)X_{07} - Y_{07} \cdot X_{67}(S));$$

$$X_p(S) = \frac{(Y_{56}(S)X_{05} - Y_{05} \cdot X_{56}(S))(X_{07} - X_{67}(S)) - a(S)}{(Y_{07} - Y_{67}(S))(X_{05} - X_{56}(S)) - (X_{07} - X_{67}(S))(Y_{05} - Y_{56}(S))}.$$

Результаты проверки кинематического анализа ПНУ СЭУ-350 приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты проверки кинематического анализа ПНУ СЭУ-350

$I_m(S) =$	$I_{mp}(S) =$	$I_s(S) =$	$I_{sp}(S) =$
3.795	3.795	2.516	2.516
3.522	3.522	2.548	2.548
3.366	3.366	2.557	2.557
3.264	3.264	2.555	2.555
3.19	3.19	2.547	2.547
3.133	3.133	2.531	2.531
3.085	3.085	2.508	2.508
3.04	3.04	2.477	2.477
2.996	2.996	2.434	2.434
2.95	2.95	2.378	2.378
2.9	2.9	2.305	2.305

Грузоподъемность ПНУ  $G_s$  определяется по выражению приведенному ниже:

$$G_s(S) = p_c \cdot \eta \frac{SS}{I_s(S)}$$

где  $p_c$  – максимальное давление в гидроцилиндрах ПНУ;  $\eta$  – общий КПД ПНУ;  $SS$  – площадь поршней двух гидроцилиндров.

Из этого следует, что характеристика грузоподъемности обратно пропорциональна передаточному числу МН, что проиллюстрировано на рис. 3.

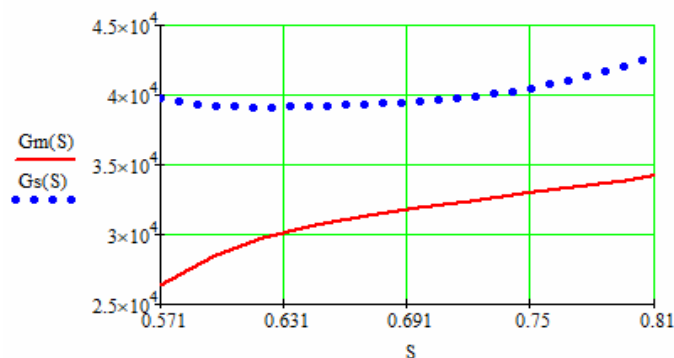


Рис. 3. График зависимости приведенной нагрузки, кН, от обобщенной координаты

Представленная на рис. 3 характеристика грузоподъемности на оси подвеса (сплошная красная линия) нужна для сравнения ПНУ различных универсальных средств.

Таким образом, используя процедуры геометрического и кинематического анализа ПНУ, мы имеем возможность рассчитывать грузоподъемность не только СЭУ-350, но и других мобильных энергетических средств.

#### Литература

1. Попов, В. Б. Расчет грузоподъемности подъемно-навесного устройства универсального энергетического средства третьего поколения / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 43–48.
2. Попов, В. Б. Аналитические выражения кинематических передаточных функций механизмов навески энергоносителей / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2000. – № 2. – С. 25–29.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО БУРЕНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

**Н. О. Капинский**

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

Научный руководитель П. П. Повжик

*Приведены описания скважин Припятского прогиба с горизонтальным окончанием, проанализированы технология наклонно-горизонтального бурения и многостадийного*

*разрыва пласта как наиболее успешно внедряемые на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов.*

**Ключевые слова:** наклонно-направленное бурение, Припятский прогиб, боковой ствол, гидравлический разрыв пласта.

С началом разработки в Республике Беларусь нефтяных месторождений стоял вопрос о совершенствовании технологии строительства скважин для более эффективного извлечения углеводородов из продуктивных горизонтов. Наиболее перспективными в этом направлении являются скважины с большим отходом от вертикали. В настоящее время подавляющая часть нефтяных месторождений Республики Беларусь находится на последней стадии разработки. В связи с этим для удержания ежегодного объема добычи поставлена задача поиска, разведки и разработки залежей нефти не только в традиционных коллекторах, но и в ультранизкопроницаемых плотных трещиноватых карбонатных отложениях нетрадиционных коллекторов [1]. К нетрадиционным коллекторам в Республике Беларусь относятся межсолевые плотные ультранизкопроницаемые карбонатные отложения верхнего девона, и прежде всего отложения I–III пачки петриковско-елецкого горизонта межсолевых отложений. На территории Республики Беларусь в пределах Припятского прогиба данные отложения наиболее перспективны на Речицком нефтяном месторождении. ERD (скважины с большим отходом от вертикали) – принято считать такие скважины, у которых отход от вертикали превышает в два раза глубину по вертикали.

Цель работы – краткий обзор промыслового применения на скважинах с большим отходом от вертикали Припятского прогиба технологий горизонтального наклонно-направленного бурения и гидроразрыва пласта.

Существует международный учет скважин ERD. С 1990 года базу данных вела компания Бритиш Петролиум (BP), с 2018 г. – организация IADC. Наиболее распространена классификация сложности скважин по соотношению отхода по вертикали к глубине по вертикали компании K&M Technology Group. Согласно данной классификации, скважина с горизонтальным окончанием 4000–5000 м на Речицкой площади попадает под категорию высокой сложности. Для оценки возможности проводки данных скважин были приняты условия: траектория скважины была основана на 426gРечицкая с удлиненным горизонтальным окончанием до 4000 м, что соответствует 6110 м по стволу. Конструкция скважины из мирового опыта строительства скважин ERD включает кондуктор, техническую колонну 324 мм, техническую колонну 245 мм в кровлю межсолевой толщи и эксплуатационную колонну 140 мм.

Наклонно-направленная скважина с углом искривления ствола 800 и выше называется горизонтальной. Горизонтальная часть ствола вскрывает продуктивный пласт вдоль и остается необсаженной. Длина горизонтального участка равна одному долблению. По радиусам кривизны стволов различают три типа профиля горизонтальных скважин: большой радиус (более 300 м); средний радиус (100–300 м); малый радиус (менее 10–60 м).

Горизонтальные с большим радиусом могут быть реализованы при кустовом способе бурения с большими отходами и при длине горизонтального участка в 1000 м и более. При этом используется стандартная техника и технология наклонно направленного бурения, позволяющая получать интенсивность искривления до 2,0–2,5 /10 м. Горизонтальные скважины с малым радиусом успешно используются при разбуривании месторождений, находящихся на поздней стадии эксплуатации, а также при бурении вторых стволов из ранее пробуренных скважин. Для этого вырезают окно

либо пользуются фрезерным участком обсадной колонны в 8–10 м. В этих условиях насосное оборудование помещают в основном стволе, причем желательно, чтобы значение зенитного угла на участке его установки и выше не превышало 200. Интенсивность искривления таких стволов может быть 1–200 на 1 м при радиусах 10–30 м, а длина горизонтального участка до 90–150 м. Если бурение по большому радиусу не требует специального оборудования, то проводка стволов со средним и коротким радиусом может быть осуществлена только с применением специальных бурильных труб и укороченных и коротких забойных двигателей, которые позволяют искривлять стволы с радиусом кривизны 25–50 м (вместо 250 м и более). Проектирование горизонтальной скважины начинают с определения протяженности, формы и направления горизонтального участка [2]. Эти параметры зависят от степени неоднородности продуктивного пласта, его толщины, литологии, твердости и устойчивости, угла падения пласта, т.е. от геологической характеристики пласта.

В настоящее время состояние нефтяной отрасли характеризуется вступлением все большего числа крупных и уникальных месторождений в позднюю и завершающую стадии разработки, что приводит к значительному снижению добычи нефти и росту обводненности продукции. На фоне постепенного падения уровней добычи нефти основные перспективы на зрелых месторождениях Припятского прогиба (рис. 1) во многом связаны с вовлечением в активную разработку низкопроницаемых коллекторов с трудноизвлекаемыми запасами нефти (ТРИЗ).

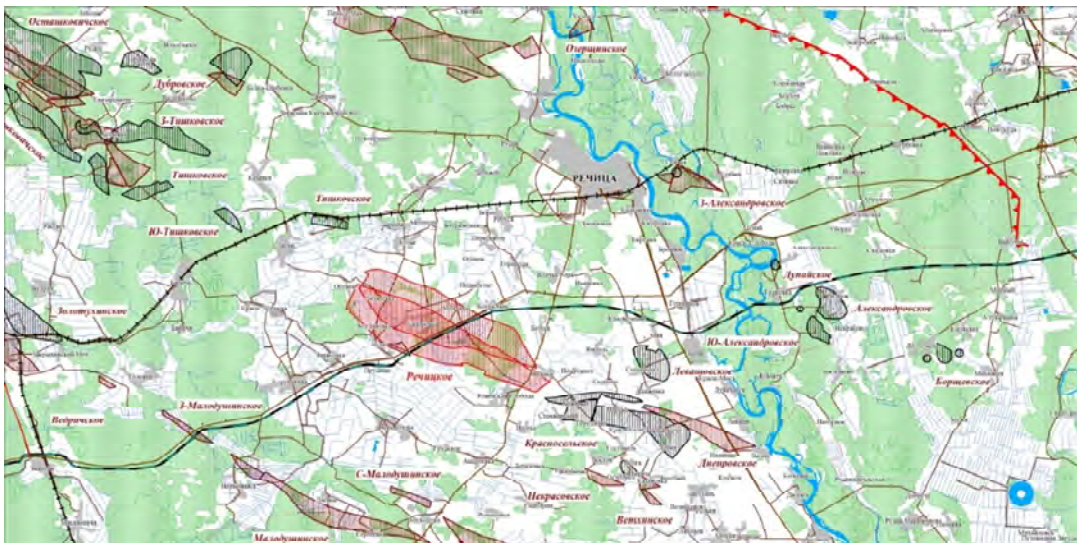


Рис. 1. Схема размещений нефтяных месторождений, расположенных на Припятском прогибе

Одной из наиболее критических технологий является гидроразрыв пласта (ГРП), включающий программное обеспечение моделирования, пропант, флот ГРП (рис. 2) и др. Учитывая современные тенденции в нефтегазовой отрасли Республики Беларусь, одной из наиболее актуальных задач является изучение опыта применения горизонтальных скважин с многостадийным ГРП (МГРП) [3]. Бурение горизонтальных скважин повышает требования к техническому оснащению буровых установок, что связано с увеличением нагрузок на колонну в процессе бурения горизонтальной части ствола скважины.





Рис. 2. Флот гидроразрыва пласта

Повышенные требования и увеличение времени бурения скважины приводит к росту стоимости скважин, наряду с увеличением рисков потери устойчивости ствола и снижения эффективности проходки по коллектору (в случае «потери» продуктивного пласта). Стоимость бурения скважины довольно часто линейно зависит от общей длины, которая ограничена возможностями буровой установки. В процессе разработки горизонтальные скважины менее управляемы: узкий круг возможных геолого-технических мероприятий и исследований, что в большей степени, связано с высокой стоимостью работ. При разработке горизонтальными скважинами с МГРП возникают риски соединения трещин между добывающими и нагнетательными скважинами (авто-ГРП).

В данный момент технология горизонтального бурения и многостадийного ГРП успешно применяется на месторождениях Припятского прогиба. Данные технологии показали свою эффективность на скважинах, которые ранее считались неперспективными. Технологии горизонтального бурения и многостадийного гидроразрыва пласта и далее будут модернизироваться, чтобы повысить их эффективность.

#### Литература

1. Повжик П. П. Прогноз продуктивности межсолевых и подсолевых карбонатных коллекторов нефтяных месторождений Припятского прогиба с целью применения эффективной технологии бурения и освоения скважин / П. П. Повжик, С. Н. Кадол // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2015. – № 3. – С. 47–51.
2. Демяненко, Н. А. Технологии интенсификации добычи нефти. Перспективы и направления развития / Н. А. Демяненко, П. П. Повжик, Д. В. Ткачев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 288 с.
3. Мироненко, К. В. Текущий статус и перспективы развития технологии ГРП в Республике Беларусь / К. В. Мироненко // Нефтяник Полесья. – 2022. – № 2 (42). – С. 88–97.

## АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ПЛАНЕТАРНО-ЭКСЦЕНТРИКОВОГО МЕХАНИЗМА

П. А. Пракопович

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет», Республика Беларусь

Научный руководитель М. И. Михайлов

*Проведен размерный анализ точности сборки редуктора. В результате размерного анализа установлено, что для обеспечения заданной точности сборки редуктора составляющие звенья должны быть изготовлены с допусками, соответствующими восьмому качеству точности.*

**Ключевые слова:** планетарно-эксцентрикковый механизм, размерный анализ, точность.

Данный привод выгодно отличается от массово применяемых механизмов колебательной шайбы и других приводов как по надежности, так и по скорости.

Вращательное движение от привода передается на основной вал, который вращаясь в подшипниках приводит в движение сателлит,двигающийся по внутренней неподвижной шестерне, на котором закреплен поводок с подшипником, который двигается только в прямолинейном направлении (рис. 1).

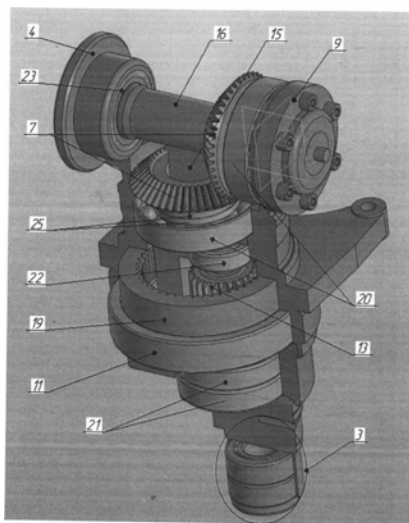


Рис. 1. 3D-модель зубчато-эксцентриккового механизма

Целью проведенной работы стал размерный анализ данного привода.

Замыкающим звеном при определении точности межосевого расстояния было принято расстояние между осями отверстий корпуса, так как точность межосевого расстояния определяется точностью расстояния между осями отверстий корпусной детали, отклонением от соосности наружных колец подшипников качения, зазорами между наружными кольцами подшипников и стенками отверстий в корпусе и др. (рис. 2). При обеспечении точности по перекосу осей валов замыкающим звеном является перекося осей отверстий корпуса. На перекося осей вращения валов влияют перекося осей отверстий под опоры валов в корпусной детали, отклонение от соосности дорожек качения наружных колец подшипников, зазоры в местах сопряжения подшипников с корпусом и радиальные зазоры в самих подшипниках.

Исходными данными являлись: межосевое расстояние зубчатой передачи, предельные отклонения межосевого расстояния передачи, предельные отклонения на перекося, характеристики исходного размера, вид опор и размеры подшипников.

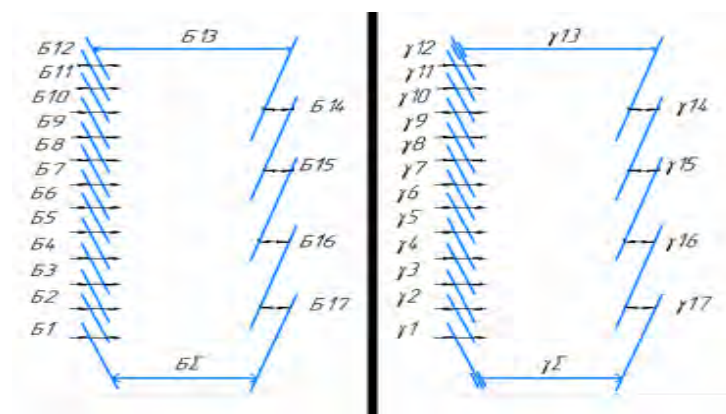


Рис. 2. Расчетные схемы

В разработанную расчетную схему входят звенья:

$B\Sigma$  – исходный размер – расстояние между осями вращения валов в средней плоскости зубчатых колес;

$\gamma\Sigma$  – исходный размер – перекося осей вращения колес;

$B1, B4, B7, B10, \gamma1, \gamma4, \gamma7, \gamma10$  – отклонения от соосности наружных колец подшипников;

$B2, B5, B8, B11, \gamma2, \gamma5, \gamma8, \gamma11$  – смещения осей наружных колец подшипников в пределах посадочного зазора в отверстии корпуса;

$B3, B6, B9, B12, \gamma3, \gamma6, \gamma9, \gamma12$  – смещения центров дорожек качения внутренних колец подшипников, вызванные наличием зазоров в подшипниках;

$B13$  – расстояние между осями отверстий корпуса;

$\gamma13$  – перекося осей отверстий корпуса;

$B14, \gamma14$  – отклонение от перпендикулярности опорного торца фланца корпуса к общей оси отверстий под подшипники водила<sup>4</sup>

$B15, \gamma15$  – отклонение от перпендикулярности опорного торца зубчатого колеса к оси зубчатого венца;

$B16, \gamma16$  – смещение оси зубчатого венца относительно оси отверстия под подшипник;

$B17, \gamma17$  – смещение оси зубчатого венца в пределах посадочного зазора при установке на подшипник водила.

На первом этапе были определены углы между плоскостью, в которой расположены оси валов, и направлением действия сил на опоры валов. Для этого последовательно определили вращающие моменты на валах, силы в зацеплении колес, реакции опор в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, их равнодействующие и равные им по значению, но противоположно направленные силы, действующие со стороны вала на опоры, и углы между этими силами и плоскостью расположения валов (рис. 3).

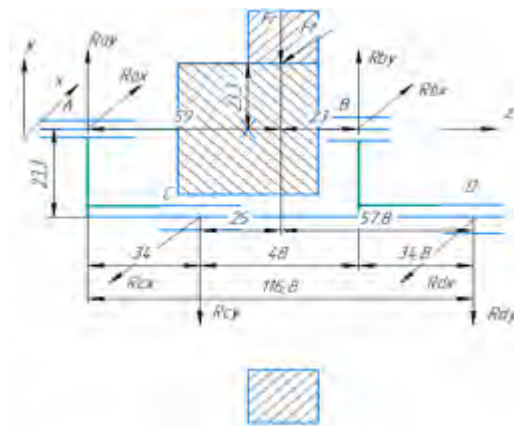


Рис. 3. Схема определения углов действия сил

По полученным углам определялись коэффициенты приведения, так как влияние отклонений от соосности колец подшипников и втулок на межосевое расстояние зависит от расположения передачи относительно опор и направлений выборки зазоров.

На втором этапе определялись допуски на влияющие размеры: радиальное биение дорожки качения наружных колец подшипников, отклонения от соосности, предельные отклонения наружных колец всех подшипников, предельные отклонения отверстий корпуса, смещения наружных колец подшипников в пределах зазора. Для всех влияющих размеров определялись коэффициенты  $\alpha_i$  и  $K_i$ .

Полученные данные отражены в таблицах.

Точность межосевого расстояния										Точность по перекосу осей									
Обозн.	$\varepsilon$	$y_{\text{гр}}^{\text{гр}}$	$\text{см}$	$\mu$	$y_{\text{гр}}^{\text{гр}}$	$\text{см}$	$\mu$	$\alpha$	$K$	Обозн.	$\varepsilon$	$y_{\text{гр}}^{\text{гр}}$	$\text{см}$	$\mu$	$y_{\text{гр}}^{\text{гр}}$	$\text{см}$	$\mu$	$\alpha$	$K$
Б2	-	23.3-0.06	0	0.12	-	-	-	0	1.12	γ2	-	0-0.045	0	0.09	-	-	-	0	1.12
Б1	0.719	0 <sup>+0.035</sup>	0	0.035	-	-	-	0	0.75	γ1	1.39	0 <sup>+0.035</sup>	0	0.035	-	-	-	0	0.75
Б2	-0.492	0.035	0.0175	0.035	-	-	-	-0.1	1.2	γ2	-1.013	0.035	0.0175	0.035	-	-	-	-0.1	1.2
		0.015	-0.0075	0.015	-	-	-	0.1				0.015	-0.0075	0.015	-	-	-	0.1	
Б3	-0.492	0 <sup>+0.01</sup>	0	0.01	-	-	-	0	1	γ3	-1.013	0 <sup>+0.01</sup>	0	0.01	-	-	-	0	1
Б4	0.28	0 <sup>+0.015</sup>	0	0.015	-	-	-	0	0.75	γ4	1.39	0 <sup>+0.015</sup>	0	0.015	-	-	-	0	0.75
Б5	-0.192	30 <sup>+0.021</sup>	0.0105	0.021	-	-	-	-0.1	1.2	γ5	-1.013	0 <sup>+0.021</sup>	0.0105	0.021	-	-	-	-0.1	1.2
		-0.009	-0.0045	0.009	-	-	-	0.1				-0.009	-0.0045	0.009	-	-	-	0.1	
Б6	-0.192	0 <sup>+0.019</sup>	0	0.019	-	-	-	0	1	γ6	-1.013	0 <sup>+0.019</sup>	0	0.019	-	-	-	0	1
Б7	0.302	0 <sup>+0.04</sup>	0	0.04	-	-	-	0	0.75	γ7	1.268	0 <sup>+0.04</sup>	0	0.04	-	-	-	0	0.75
Б8	-0.207	130 <sup>+0.04</sup>	0.02	0.04	-	-	-	-0.1	1.2	γ8	0.924	0.04	0.02	0.04	-	-	-	-0.1	1.2
		-0.018	-0.009	0.018	-	-	-	0.1				-0.018	-0.009	0.018	-	-	-	0.1	
Б9	-0.207	0 <sup>+0.031</sup>	0	0.031	-	-	-	0	1	γ9	0.924	0 <sup>+0.031</sup>	0	0.031	-	-	-	0	1
Б10	0.698	0 <sup>+0.035</sup>	0	0.035	-	-	-	0	0.75	γ10	1.268	0 <sup>+0.035</sup>	0	0.035	-	-	-	0	0.75
Б11	-0.478	90 <sup>+0.015</sup>	0.0175	0.035	-	-	-	-0.1	1.2	γ11	0.924	0 <sup>+0.015</sup>	0.0175	0.035	-	-	-	-0.1	1.2
		-0.013	-0.0075	0.015	-	-	-	0.1				-0.013	-0.0075	0.015	-	-	-	0.1	
Б12	-0.478	0 <sup>+0.022</sup>	0	0.022	-	-	-	0	1	γ12	0.924	0 <sup>+0.022</sup>	0	0.022	-	-	-	0	1
Б13	1	-	-	-	-	-	-	0	1.2	γ13	1	-	-	-	-	-	-	0	1.2
Б14	0.18	0 <sup>+0.01</sup>	-	0.01	-	-	-	0	0.85	γ14	0.18	0 <sup>+0.01</sup>	-	0.01	-	-	-	0	0.85
Б15	0.23	0 <sup>+0.01</sup>	-	0.01	-	-	-	-		γ15	0.23	0 <sup>+0.01</sup>	-	0.01	-	-	-	-	
Б16	1	0 <sup>+0.01</sup>	-	0.01	-	-	-	-		γ16	1	0 <sup>+0.01</sup>	-	0.01	-	-	-	-	
Б17	1	0 <sup>+0.022</sup>	0.012	0.022	-	-	-	-				-0.014	-0.0095	0.019	-	-	-	-	

Рис. 4. Таблицы характеристик расчетных схем

При определении точности межосевого расстояния также учли распорные силы в зацеплении.

На третьем этапе были рассчитаны величины, входящие в формулу определения допуска замыкающего звена. Рассчитали: сумму характеристик рассеяния векторных величин, сумму характеристик рассеяния сопряжений с зазором, влияние распорных сил, суммарную характеристику сопряжений с зазором. Подставив полученные данные в расчетные формулы, определяли допуски на размер и допуск на перекося осей замыкающего звена.



Также были определены предельные расчетные отклонения замыкающих звеньев.

Таким образом, проведен размерный анализ точности редуктора. В результате размерного анализа установлено, что для обеспечения заданной точности редуктора, составляющие звенья должны быть выполнены с допусками, соответствующими восьмому качеству точности.

## СЕКЦИЯ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

---

### АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДОВОДКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Е. А. Грицаев, М. С. Ковалёва

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель А. А. Куликова

*Рассмотрены суперфиниширование и хонингование как современные технологии доводки поверхностей, определяется более эффективная технология и перспективы применения данных технологий в рамках торгового и рекламного оборудования.*

**Ключевые слова:** низкоскоростная обработка поверхности, технологии доводки, суперфиниширование, хонингование.

В современном производстве доводка широко используется как финишный метод обработки поверхностей особо важных деталей. Она может использоваться не только для изготовлений узлов и разнообразных соединений, но и в ситуациях, когда детали требуют ремонтных работ. Главным образом доводка позволяет не только уменьшить шероховатость поверхности обрабатываемой детали, но и обеспечивает более точные качественные характеристики обрабатываемых поверхностей детали, значительно уменьшает погрешность геометрии форм.

Суперфиниширование и хонингование являются ходовыми технологиями доводки, используемыми для улучшения качества поверхности заготовки, но они служат разным целям и имеют разное применение. В данной статье мы рассмотрим, какая из этих технологий актуальнее, в том числе в рамках торгового и рекламного оборудования.

Суперфиниширование – процесс полирования поверхности с использованием высокоабразивных лент или специализированных суперфинишных камней. Технология обычно используется для улучшения качества поверхности высокоточных деталей, таких как подшипники, шестерни и валы. Его также можно использовать для уменьшения трения и улучшения характеристик движущихся деталей.

Хонингование – процесс преимущественно низкоскоростной обработки поверхности с использованием хонинговальных камней/стержней. В процессе их поступательного перемещения удаляются частицы металла. После обработки поверхность обладает высокой точностью, детали получают максимально симметричными. Данный вид обработки может применяться для обработки широкого спектра материалов, включая металлы, керамику и композиты.

**Сравнительный анализ.** С точки зрения универсальности, хонингование, как правило, считается более универсальным, чем суперфиниширование, поскольку его можно использовать для более широкого спектра материалов и областей производства. Однако суперфиниширование более эффективно для достижения более гладкой поверхности и часто используется в высокоточных областях производства, где важны жесткие допуски и низкое трение. При хонинговании используется абразивная

обработка для оптимизации отделки поверхности и геометрии детали, в то время как суперфиниширование обычно является заключительным этапом производственного процесса, который позволяет достичь определенного качества поверхности и рельефа. Проще говоря, суперфиниширование аналогично хонингованию, но при ограниченном запасе материала для удаления, достигается более тонкая или меньшая шероховатость поверхности.

В сфере торгового и рекламного оборудования для повышения производительности и функциональности различных компонентов можно использовать как суперфиниширование, так и хонингование. Приведем несколько примеров использования этих процессов.

Суперфиниширование используется для обработки следующих деталей:

- подшипники (для получения гладкой поверхности деталей подшипников, снижения трения и повышения общей производительности);
- шестерни (для снижения шума, вибрации и износа, что приводит к бесшумной и эффективной работе);
- печатающие ролики (для обеспечения точного переноса чернил и получения высококачественных результатов печати).

Хонингование используется для обработки следующих деталей:

- отверстия цилиндров (для улучшения качества поверхности и геометрии отверстий цилиндров в двигателях, что обеспечивает надлежащую смазку и уплотнение для оптимальной работы);
- гидравлические цилиндры (для достижения жестких допусков и получения гладкой поверхности, что повышает их функциональность и долговечность);
- компоненты насоса (для улучшения их прилегания, уменьшения утечек и повышения общей эффективности).

В целом выбор между хонингованием и суперфинишированием зависит от конкретных требований конкретной области применения и желаемого качества поверхности. Оба процесса имеют свои преимущества и ограничения, поэтому при выборе технологии обработки важно учитывать конкретные потребности проекта.

Как суперфиниширование, так и хонингование играют решающую роль в повышении производительности, долговечности и качества компонентов торгового и рекламного оборудования. Используя эти процессы обработки, производители могут добиться превосходной отделки поверхности, более жестких допусков и улучшенной функциональности своих изделий.

#### Литература

1. Передрей, Ю. М. Технология машиностроительного производства. Ч. 1. Теоретические основы технологии машиностроения : учеб. пособие / Ю. М. Передрей. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2005. – 236 с.
2. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухаркин. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.
3. Кривко, Г. П. Основы совершенствования способов и технологических процессов механической обработки деталей подшипников / Г. П. Кривко. – Минск : Технопринт, 2001. – 220 с.
4. Ярушин, С. Г. Технологические процессы в машиностроении : учеб. для бакалавров / С. Г. Ярушин. – М. : Юрайт, 2014. – Ч. 1. – 564 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ZrCN

Е. Д. Кузьменко

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет», Российская Федерация

Научный руководитель С. В. Матренин

В проведенном исследовании изучены механические свойства керамики на основе карбида и нитрида циркония, спеченной методом горячего прессования при температуре 2000 °С. В ходе работы установлено, что с усложнением кристаллохимического строения механические свойства образцов улучшаются.

**Ключевые слова:** керамика, карбид циркония, нитрид циркония, механические свойства.

Керамика на основе карбида и нитрида циркония известна в своем применении с 80-х гг. XX в. в качестве термостойкой керамики. Дальнейшее развитие данной керамики связано с разработкой инструментальных материалов. Благодаря своим значительным физико-механическим свойствам, таким как высокая твердость и прочность, высокая температура плавления и стойкость к агрессивным химическим средам, данные материалы являются перспективными для дальнейших исследований [1, 2].

В проведенной работе были исследованы свойства керамики, спеченной методом горячего прессования. Спекание осуществлялось при температуре 2000 °С с выдержкой при заданной температуре 15 мин. В ходе работы были исследованы образцы следующих составов: ZrC, 50 мас. % ZrC – 50 мас. % ZrN, ZrN. Целью работы являлось исследование механических свойств спеченных образцов.

Механические свойства исследуемых образцов были изучены на приборе NanoIndenterG200. Так, при работе на данном приборе были получены кривые нагружения исследуемых образцов (рис. 1).

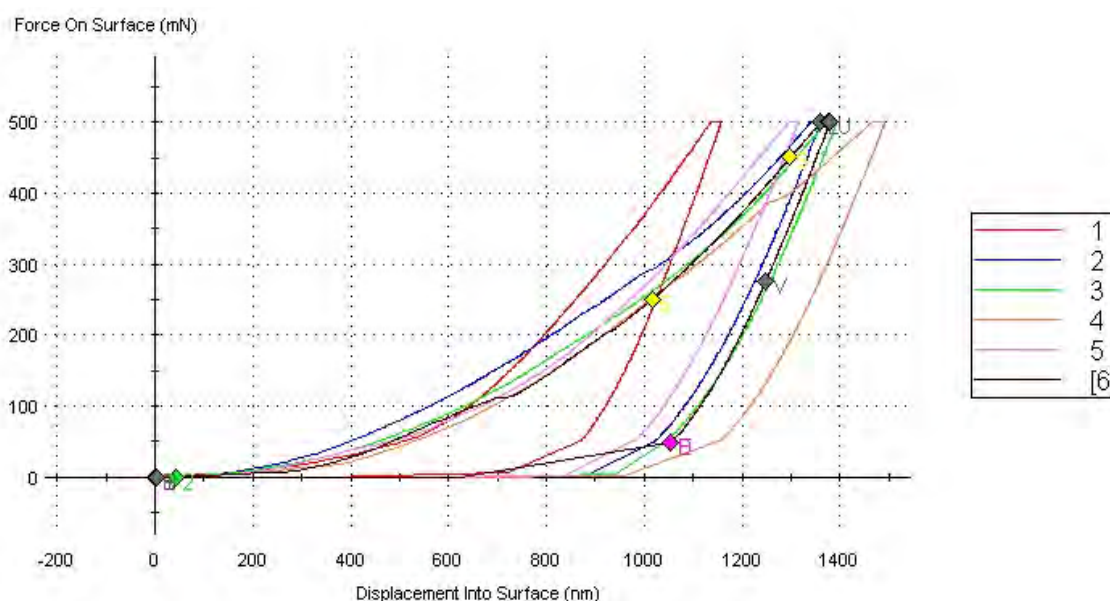


Рис. 1. Кривая нагружения образца ZrC

При анализе построенных кривых нагружения становится возможным определить модули упругости исследуемых образцов. В ходе исследования было установлено, что модуль упругости образца состава 50 мас. % ZrC – 50 мас. % ZrN был наибольший среди исследуемых керамик, что связано с усложнением кристаллохимического строения по сравнению с образцами составов ZrC, ZrN (рис. 2).

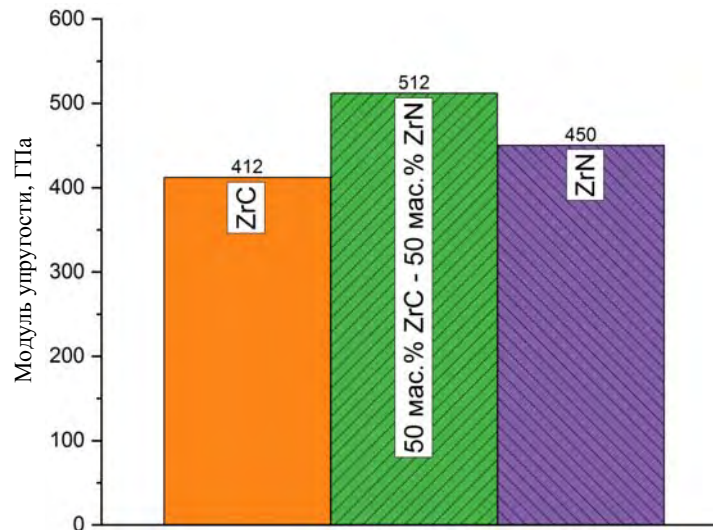


Рис. 2. Модуль упругости исследуемых образцов

Твердость исследуемых образцов определялась на приборе ПМТ-3 по Виккерсу. Также, как и в случае с модулем упругости, наибольшая твердость среди исследуемых образцов была зафиксирована для образца состава 50 мас. % ZrC – 50 мас. % ZrN (рис. 3).

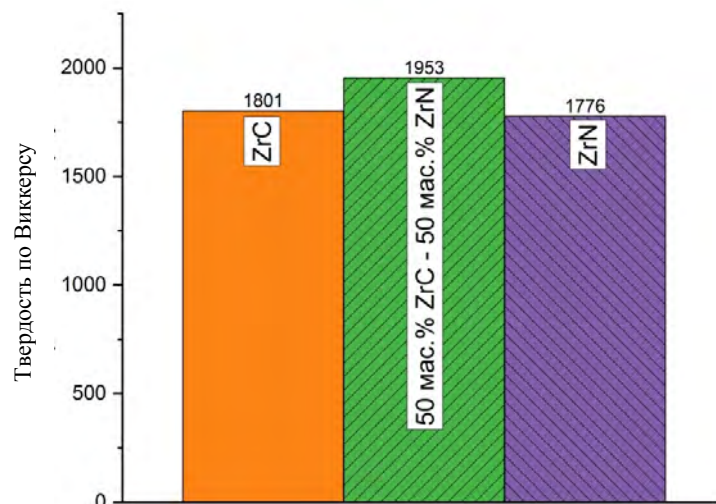


Рис. 3. Твердость исследуемых образцов

Таким образом, при усложнении кристаллохимического строения, достигаемого введением двух исходных компонентов: карбида и нитрида циркония, при спекании методом горячего прессования наблюдалось увеличение механических свойств исследуемых образцов.

#### Литература

1. Harrison, R. W. Processing and properties of ZrC, ZrN and ZrCN ceramics: a review / R. W. Harrison, W. E. Lee // *Advances in Applied Ceramics*. – 2016. – Vol. 115, № 5. – P. 294–307.
2. Lengauer, W. Transition metal carbides, nitrides, and carbonitrides / W. Lengauer. – Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008. – P. 202–252.

### ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ X18H10T, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Д. А. Бронов

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

Научный руководитель Н. Н. Черенда

*Представлены результаты рентгеноструктурного анализа, оптической микроскопии и измерения микротвердости поверхностного слоя стали X18H10T, легированного атомами титана и алюминия, при воздействии компрессионных плазменных потоков. Установлены зависимости изменения фазового состава, рельефа поверхности, интенсивности эрозии и микротвердости от плотности поглощенной энергии.*

**Ключевые слова:** аустенитная нержавеющая сталь, микротвёрдость, фазовый состав, легирование, компрессионные плазменные потоки.

Аустенитные хромо-никелевые стали являются одним из распространенных конструкционных материалов. Из-за своих прочностных характеристик, жаропрочности, жаростойкости и высокой коррозионной стойкости стали данного класса нашли широкое применение в условиях повышенных температур, высоких доз облучения и агрессивных средах. Поэтому изучение поведения данного класса сталей в таких условиях является актуальной задачей. Для улучшения свойств аустенитные стали могут легироваться дополнительными элементами. Одним из способов легирования поверхностного слоя материалов является нанесение тонкопленочного покрытия и дальнейшее воздействие высокоэнергетическими потоками частиц [1]. Легированный слой образуется в результате конвективного массопереноса в расплаве, формируемом при высокоэнергетическом воздействии. Целью настоящей работы являлось изучение структурно-фазового состояния и механических свойств поверхностного слоя стали X18H10T, легированного атомами титана и алюминия, при воздействии компрессионных плазменных потоков. Известно, что добавление титана приводит к увеличению жаростойкости, а алюминия приводит к интерметаллидному упрочнению стали и повышению коррозионной стойкости стали [2].

Объектом исследования являлись образцы аустенитной стали марки X18H10T с покрытием Ti–Al, нанесенным при помощи катодно-дугового метода. Обработка образцов осуществлялась тремя импульсами КПП длительностью 100 мкс при расстоянии между образцом и электродами 8–14 см, что вело к изменению плотности энергии, поглощенной поверхностным слоем образца в диапазоне 22–10 Дж/см<sup>2</sup>

за импульс. В качестве рабочего вещества плазмы использовался азот, его давление в вакуумной камере составляло 3 тор. Рентгеноструктурный анализ проводился при помощи дифрактометра Rigaku Ultima IV. Морфология поверхности исследовалась на оптическом микроскопе Altami MET-1. Микротвердость измерялась на микротвердомере MVD402 Wilson Instruments при нагрузке 100 грамм методом Виккерса. Относительная погрешность измерения составила 10 %.

Как известно, воздействие КПП на материал приводит к структурно-фазовым превращениям в поверхностном слое [1]. На рис. 1 представлены диффрактограммы образцов до и после воздействия. Видно, что в образце до облучения присутствует преимущественно аустенитная фаза железа, а также наблюдаются дифракционные пики от покрытия Ti–Al. После облучения аустенитная фаза исчезает и в поверхностном слое появляется феррит. Это может быть связано с тем, что Ti и Al являются феррито стабилизирующими элементами. Также в поверхностном слое образуется нитрид титана. С увеличением поглощенной энергии интенсивность пиков нитрида уменьшается и наблюдается сдвиг линий твердого раствора феррита к эталонным значениям, что связывается с уменьшением концентрации легирующих элементов в твердом растворе.

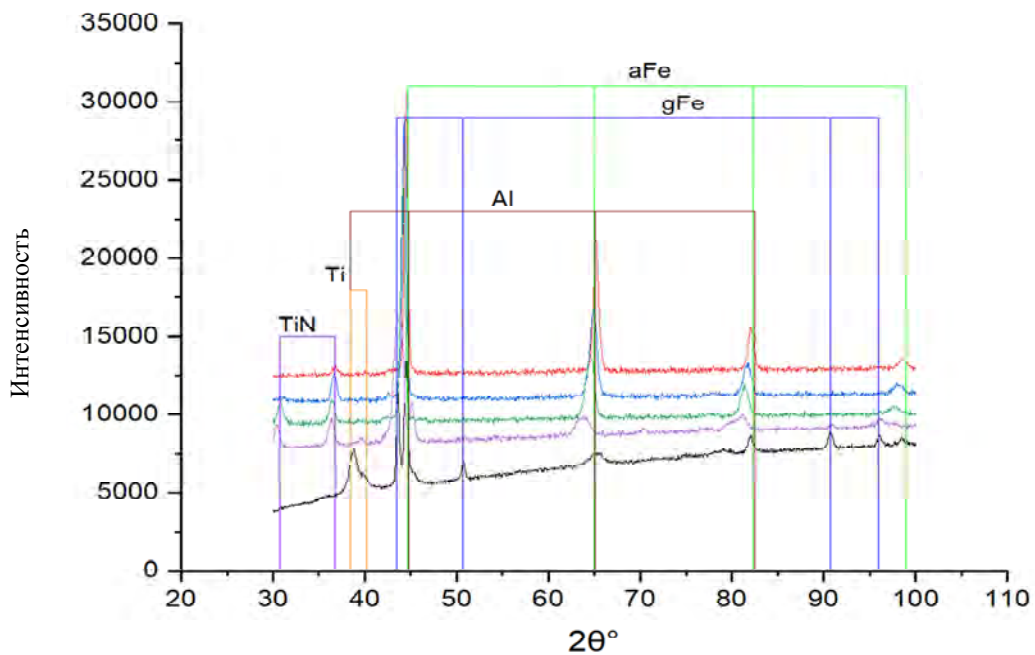


Рис. 1. Дифрактограммы системы Ti–Al/сталь X18H10T до и после воздействия с различной плотностью поглощенной энергии:  
 — X18H10T с покрытием Ti–Al; — 22 Дж/см<sup>2</sup>;  
 — 19 Дж/см<sup>2</sup>; — 13 Дж/см<sup>2</sup>; — 10 Дж/см<sup>2</sup>

Воздействие КПП приводит к плавлению поверхностного слоя и последующему конвективному массопереносу в жидкости [1]. На рис. 2 изображены оптические снимки поверхности после воздействия при разной плотности поглощенной энергии. Видно, что на поверхности наблюдается рельеф, характерный для плавления. Кроме того, уменьшение энергии воздействия приводит к увеличению количества трещин.



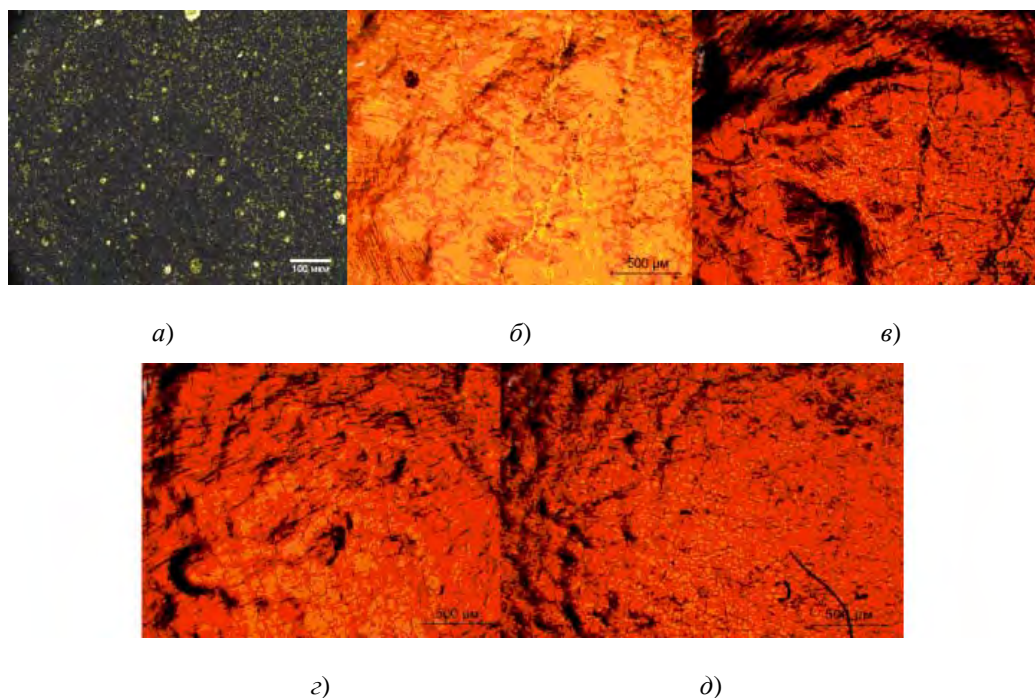


Рис. 2. Морфология поверхности образцов до облучения (а) и обработанной с различной плотностью поглощенной энергии: б – 22 Дж/см<sup>2</sup>; в – 19 Дж/см<sup>2</sup>; г – 13 Дж/см<sup>2</sup>; д – 10 Дж/см<sup>2</sup>

Увеличение количества трещин является следствием неоднородного перемешивания легирующих элементов с материалом подложки в жидкости, за счет уменьшения времени существования расплава [1]. Среднее расстояние между трещинами уменьшается с уменьшением энергии воздействия КПП. Так для образца, обработанного с плотностью поглощенной энергии 19 Дж/см<sup>2</sup>, среднее расстояние составляет ~ 250 мкм, а для образца, обработанного при 10 Дж/см<sup>2</sup>, ~ 50 мкм.

Возникновение расплава на поверхности материала и его ускорение под действием плазменных потоков приводит к эрозии поверхности, т. е. выбросу материала за пределы образца. На рис. 3 представлены данные изменения массы образцов на единицу площади до и после облучения.

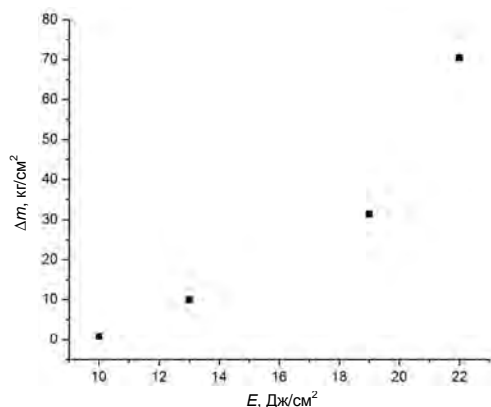


Рис. 3. Зависимость изменения массы образца от плотности поглощенной энергии

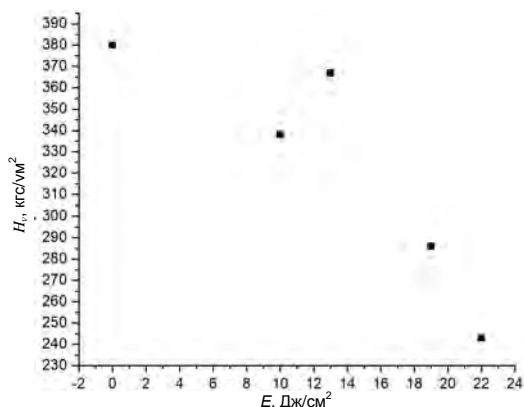


Рис. 4. Зависимость микротвердости от плотности поглощенной энергии



Видно, что при уменьшении энергии воздействия, величина удаленной массы уменьшается. Это связано с уменьшением времени существования расплава при воздействии КПП [1].

Структурно-фазовые изменения приводят к изменению механических свойств материала [1]. На рис. 4 представлены результаты измерения микротвердости образцов после обработки по сравнению со сталью X18H10T без покрытия.

Из графика видно, что при уменьшении плотности поглощенной энергии наблюдается тенденция к увеличению микротвердости, что может быть связано с формированием твердых растворов на основе феррита.

В результате проведенных исследований установлено, что легирование поверхностного слоя атомами титана и алюминия под действием КПП приводит к появлению твердого раствора на основе б-фазы. Уменьшение плотности поглощенной энергии при воздействии приводит к увеличению количества трещин и увеличению микротвердости. Уменьшение плотности поглощенной энергии также приводит к уменьшению интенсивности эрозии поверхностного слоя, что связано с уменьшением времени существования расплава.

#### Л и т е р а т у р а

1. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.]. – Минск : БГУ, 2013. – 248 с.
2. Конструкционные материалы ядерных реакторов: в 2 ч. Ч. 2. Структура, свойства, назначение : учеб. пособие для вузов / Н. М. Бескоровайный [и др.] ; под общ. ред. Н. М. Бескоровайного. – М. : Атомиздат, 1977. – 256 с.

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ОРГАНОВ ЗРЕНИЯ

**П. С. Клячкова, А. Д. Левкина, Е. В. Зайцев**

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

Научный руководитель Ж. В. Кадолич

*Работа посвящена моделированию с помощью 3D-технологий окклюдера для лечения и коррекции заболеваний органов зрения, обеспечивающего изоляцию глаза от света. Выявлены недостатки имеющихся моделей окклюдеров. При помощи 3D-сканирования собраны данные о конфигурации (рельефе) лица заказчика. Для 3D-печати прототипа окклюдера предложено использовать метод FDM. Основная часть окклюдера состоит из пластиковой основы, дополнительная часть – клейкая поверхность. Сформирована пористая структура изделия, представленная переплетением микроканалов и предназначенная для циркуляции воздуха. В качестве материала для производства окклюдера рекомендовано использовать полиэтилентерефталатгликоль, который отличается нетоксичностью, гидрофобностью и способностью легко дезинфицироваться.*

**Ключевые слова:** зрение, окклюдер, 3D-сканирование, 3D-печать.

В настоящее время аддитивные технологии продолжают менять мир и привносят новые возможности развития в различных отраслях, включая машиностроение, медицину, авиацию, архитектуру, дизайн и др. Применение 3D-технологий в медицине является мировым трендом сегодняшнего дня. С помощью 3D-моделирования и печати возможно развитие технологий изготовления практически всех видов протезов (шейный позвонок, суставы, сосуды), выращивания органов и тканей (сердце,

почки, печень, роговица глаза, среднее ухо и их элементы, искусственные зубы), получения лекарственных форм, индивидуальных датчиков, детекторов и т. п. Кроме того, возможности аддитивных технологий позволяют в широких пределах варьировать конструкции различных устройств и подбирать применяемые для них материалы, адаптируя их к конкретной медицинской задаче [1].

Современная техника, различные биологические факторы, условия работы (большинство профессий сопровождается работой за компьютером в течение минимум 30–40 % рабочего времени), травмы и многое другое – все эти факторы привели к тому, что за последние три года количество людей с различными заболеваниями глаз, плохим зрением увеличилось на 40 %. Примерно 40 % от этого количества составляют дети и взрослые с амблиопией («ленивый глаз»), 15 % – косоглазием или страбизмом, 15 % – восстановительный процесс после операции. Одним из распространенных и доступных методов лечения описанных заболеваний является окклюзионная терапия [2]. Этот метод обычно заключается в наложении на парный глаз специального приспособления (окклюдера), в перечне которых значатся окклюдер-повязка (рис. 1), окклюдер-пластырь (патч) – представляет собой специальный пластырь, который наклеивается на сильный глаз, чтобы ограничить его видимость и заставить слабый глаз работать активнее (рис. 2), окклюдер-насадка – устройство, которое крепится на линзы очков для блокировки или ограничения видимости здорового глаза (рис. 3).

Следует отметить, что все из перечисленных выше приспособлений обладают недостатками, в числе которых можно отметить недостаточную изоляцию глаза от света, что не позволяет обеспечить полноценное лечение. Кроме того, окклюдер-пластырь является одноразовым, отклеивается при намокании (когда потеет глаз или ребенок плачет), может вызывать раздражение, а окклюдер-насадка предусматривает крепление только на очки, просто снимается, недолговечен и пропускает свет.



Рис. 1. Окклюдер-повязка



Рис. 2. Окклюдер-пластырь



Рис. 3. Окклюдер-насадка

Цель работы – разработать модель окклюдера, который будет обеспечивать полную изоляцию глаза от света, прочно крепиться и обладать эстетичным внешним видом.

Рост внимания к 3D-моделированию и 3D-печати медицинских изделий и овладение данными методами молодых специалистов, начиная с вуза, обуславливают

значительные перспективы внедрения аддитивных технологий на практике, что повлияло на решение использовать в работе методы 3D-сканирования и 3D-печати.

В процессе работы при помощи 3D-сканирования собирались данные о лице заказчика – снимается точный слепок лица, несущий информацию о биологических маркерах, на использовании которых строится конфигурация изделия. Подобный шаг в 3D-проектировании позволяет максимально точно подогнать изделие под рельеф лица и тем самым исключить возможность нарезания, расхождения в размере и в целом улучшить качество лечения (рис. 4).

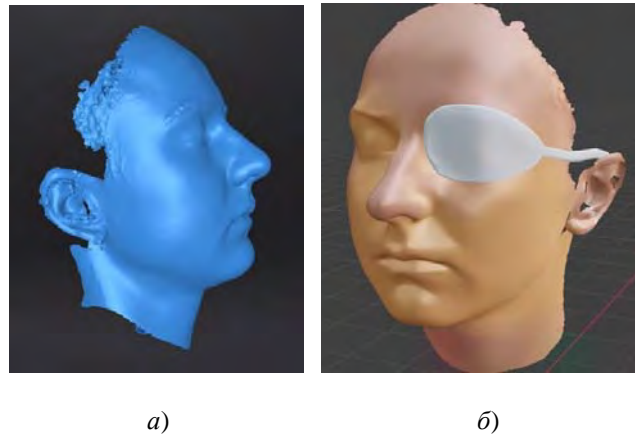


Рис. 4. Сканирование лица (а) и создание модели окклюдера с учетом биометрических данных пациента (б)

Для печати изделия предложено использовать метод послойного наложения (FDM). Важно, что при производстве прототипа используемый материал не должен вызывать раздражения или дискомфорта. Как следствие, разрабатываемая модель окклюдера была разделена на две части при обосновании выбора материала для 3D-печати:

- основная часть окклюдера состоит из пластиковой основы, имеет форму, соответствующую контуру лица и области вокруг глаза, полностью его покрывает и закрывает от внешнего света; в его основе делается углубление, соответствующее форме глаза для более удобной и длительной носки, а также для избавления от напряжения, создаваемого трением ресниц при моргании;

- дополнительная часть – это клейкая поверхность, для которой рекомендуется применять биосовместимый с кожей клей, двухстороннюю клейкую ленту или специальный композиционный материал с эффектом памяти формы.

Также стоит отметить, что технология FDM позволяет создать очень сложную пористую структуру, представленную многочисленным переплетением микроканалов [3]. Такая структура позволяет воздуху свободно циркулировать между окружающей средой и закрытой частью лица, что исключает возможность запотевания (подобный эффект оказывает окклюдер-пластырь) при ношении разрабатываемой модели окклюдера.

На данный момент произведен прототип изделия (рис. 5) из PETG – полиэтилентерефталатгликоля [4]. В числе отличительных свойств этого материала значатся нетоксичность, гидрофобность, способность легко дезинфицироваться.

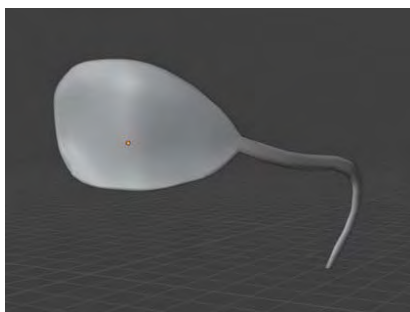


Рис. 5. Прототип разработанной модели окклюдера

Таким образом, в настоящей работе продемонстрированы возможности 3D-печати окклюдера, модель которого выполнена с учетом имеющегося опыта подобных разработок. Благодаря использованию современных технологий и материалов, предложенный вариант дизайна и конструкции окклюдера способен обеспечивать полную изоляцию глаза от света, прочно крепится на лице пациента и обладает, по мнению авторов работы, эстетичным внешним видом.

#### Литература

1. Путеводитель по 3D-печати в медицине. – Режим доступа: <https://vektor.us/blog/3d-tehnologii-v-meditsine.html#3d-modelirovanie-v-medicine>. – Дата доступа: 10.08.2023.
2. Бирич, Т. Офтальмология : учебник / Т. Бирич, Л. Марченко, А. Чекина. – Минск : Новое знание, 2021. – 496 с.
3. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. : НАМИ, 2015. – 220 с.
4. Поздняков, Е. П. Материалы аддитивного синтеза : пособие / Е. П. Поздняков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 283 с.

### **НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ ДЛЯ УСЛОВИЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА, ОСЛОЖНЕННЫХ УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОРРОЗИЕЙ**

**Ю. И. Попкова**

*Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти  
Республиканское унитарное предприятие «Производственное  
объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

Научный руководитель А. Я. Григорьев

*Государственное научное учреждение «Институт механики  
металлополимерных систем имени В. А. Белого  
Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель*

*Представлены результаты коррозионных испытаний сталей насосно-компрессорных труб, отличающихся по составу и структуре, марок 32Г1А N80 (Q), 30X L80 (1), 32ХГ Р110, 30ХГМА-1 С90, 13Cr, изготовленных в соответствии со стандартом APISpecification 5CT, 37Г2Ф Е, 18ХЗМФБ Е, 15Х5МФБ Е, изготовленных в соответствии с ГОСТ 633, 25ХГБ К72 ГОСТ 31446, а также насосно-компрессорных труб с внутренним эпоксидно-фенольным полимерным покрытием. Исследования проведены для условий нефтяных месторождений Припятского прогиба, попутно добываемая вода которых представляет собой крепкие рассолы хлоридно-кальциевого типа, содержащие углекислый газ. Выявленные закономерности влия-*

*ния характеристик трубных сталей и эксплуатационных факторов легли в основу разработанных научных принципов выбора материалов насосно-компрессорных труб. Разработанные принципы применяются в условиях нефтяных месторождений Беларуси, что позволило исключить преждевременные подъемы погружного оборудования по причине коррозии насосно-компрессорных труб.*

**Ключевые слова:** коррозия, скважина, нефтяное месторождение, трубная сталь, элементный состав, микроструктура, выбор материалов.

В настоящее время экономически целесообразным является эксплуатация нефтяных месторождений Припятского прогиба, находящихся на поздней стадии разработки, которая характеризуется высокой обводненностью добываемой продукции. Однако в таких условиях возникает проблема коррозии нефтепромыслового оборудования. Потери нефти и рост затрат на добычу становятся причиной повышенного спроса на оборудование с более длительным сроком службы. Особенно актуальным является повышение эксплуатационной наработки насосно-компрессорных труб (НКТ) в условиях углекислотной коррозии, на долю которых приходится основное количество преждевременных подъемов по причине коррозии в условиях нефтяных месторождений Беларуси. В последние годы производители трубной продукции осваивают выпуск сталей НКТ с содержанием хрома 1, 3 и 5 % (здесь и далее – масс.), позиционируемых как трубные стали с повышенной коррозионной стойкостью. Широкое распространение находят НКТ с внутренним полимерным покрытием. Выпускаемые трубные стали различаются по составу и структуре при одинаковом содержании хрома, что может оказывать значительное влияние на их коррозионную стойкость. Немаловажным фактором являются условия эксплуатации. Проведенный анализ отечественных и зарубежных литературных источников и результатов выполненных научно-исследовательских работ позволяет сделать заключение о недостаточной изученности ряда вопросов и необходимости разработки научных принципов выбора марок трубных сталей для нефтяных месторождений Припятского прогиба [1–4].

Цель работы – разработка научных принципов выбора НКТ для условий углекислотной коррозии нефтяных месторождений Припятского прогиба.

**Методика проведения испытаний.** Из патрубков НКТ, предоставленных заводами-производителями, изготавливались образцы-свидетели коррозии (ОСК). Испытания проводились на установке для моделирования скважинных условий «АА-КОНКОР», представляющей собой замкнутый циркуляционный контур с вертикальным участком для установки ОСК.

Испытания проводились в реальных скважинных средах, представляющих собой крепкие рассолы хлоридно-кальциевого типа, содержащие растворенный углекислый газ: рН 5,7–6,3, минерализация 196–284 г/л, содержание растворенного углекислого газа 20–38 мг/л при отсутствии сероводорода. Давление рабочей среды составляло 15 МПа, температура +55, +70 °С, скорость потока 0,2–0,6 м/с, что соответствует условиям эксплуатации добывающих скважин месторождений Беларуси, осложненных коррозией. Исследования элементного состава, микроструктуры и морфологии поверхности ОСК проводились в соответствии со стандартными методиками в ГНУ «Институт порошковой металлургии имени О. В. Романа». Оценку характеристик внутреннего полимерного покрытия проводили в ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси» в соответствии с требованиями соответствующих ГОСТов.

**Объекты исследований:** трубные стали, применяемые при изготовлении НКТ – среднеуглеродистые марганцовистые стали марок 32Г1А N80 (Q), 30X L80 (1), 32ХГ P110, 30ХГМА-1 С90, 13Cr, изготовленных в соответствии со стандартом APISpecification 5СТ, 37Г2Ф Е, 18Х3МФБ Е, 15Х5МФБ Е, изготовленных в соответствии с ГОСТ 633, 25ХГБ К72 ГОСТ 31446; НКТ с внутренним полимерным покрытием марки MPLAG17 производства «Majorgasck» (РФ). В качестве базы сравнения выбрана промышленно применяемая среднеуглеродистая марганцовистая сталь марки 32Г1А N80 (Q).

**Результаты и обсуждение.** На основании проведенных исследований установлено, что в условиях углекислотной коррозии, кроме содержания хрома существенное влияние на коррозионную стойкость трубных сталей оказывает содержание марганца и структура трубных сталей, что необходимо учитывать при выборе материалов НКТ [5].

Установлено, что в условиях нефтяных месторождений Припятского прогиба применение среднеуглеродистой марганцовистой стали марки 32Г1А N80 (Q) допускается в условиях слабо- и среднеагрессивных сред: при дебите жидкости менее 30 м<sup>3</sup>/сут, объемной обводненности добываемой продукции менее 50 %, температуре скважинной жидкости менее +55 °С, объемном содержании углекислого газа в попутно добываемом газе менее 0,28 % при отсутствии сероводорода. При достижении граничных показателей требуется применение НКТ с повышенной коррозионной стойкостью.

На основании результатов лабораторных и натурных испытаний разработаны требования к трубным сталям НКТ для обеспечения требуемой коррозионной стойкости в условиях нефтяных месторождений Беларуси, попутно добываемая вода которых представляет собой крепкие рассолы хлоридно-кальциевого типа: минимальным является содержание хрома 0,3 % при условии ее микролегирования кальцием и бором 0,0019–0,0024 и 0,0001–0,0004 % соответственно, обеспечивающим получение зерна на уровне 12 балла по ГОСТ 5639 после закалки с высоким отпуском при содержании марганца до 1,5 % (трубная сталь марки 30Г2 группы прочности N80 (Q)/ L80 (1)). При отсутствии микролегирования минимальное содержание хрома должно составлять 1 % при условии содержания марганца до 0,8 % после закалки с высоким отпуском при размере действительного зерна не крупнее 10 балла по ГОСТ 5639 (трубная сталь марки 30X группы прочности L80 (1)). Кроме указанных требований к данным сталям установлены требования в отношении серы и фосфора (не более 0,03 % каждого элемента), неметаллических включений (сульфидов – не более 1 балла, остальных – не более 2 балла по ГОСТ 1778), полосчатости – не более 3 балла по ГОСТ 5640. Повышение коррозионной стойкости хромсодержащих сталей обусловлено образованием аморфного слоя Cr(OH)<sub>3</sub>, который является связкой между кристаллами карбоната железа и защищает последние от растворения скважинной средой. Измельчение структурных составляющих и их равномерное распределение в металле выравнивает потенциал поверхности, уменьшает ток микропар и снижает скорость коррозии. Установлено, что основным фактором, ограничивающим применение трубных сталей с содержанием хрома до 1 %, является содержание хлорид-ионов, снижающих защитные свойства продуктов коррозии – более 150 г/л при общей минерализации более 260 г/л. Коррозионная стойкость трубных сталей в этом случае проявляется при содержании в них хрома 3 % и более.

Применение низколегированных сталей, в частности, 30X L80 (1) является не только технологически, но и экономически выгодной технологией в сравнении с промышленно применяемой ингибиторной защитой от коррозии методом постоян-

ного дозирования реагента в затрубное пространство скважины. Применение трубной стали с содержанием хрома 3 % и более экономически нецелесообразно несмотря на технологический эффект. В таком случае альтернативной, экономически более выгодной технологией становится применение НКТ с внутренним полимерным покрытием. На основании натуральных испытаний доказана коррозионная стойкость двухслойного эпоксидно-фенольного полимерного покрытия внутренней поверхности НКТ при толщине покрытия не менее 150 мкм, при шероховатости поверхности менее 15 мкм, термостойкости не менее +150 °С, адгезии не менее 10 МПа в отношении локальной язвенной коррозии в условиях добывающих скважин, попутно добываемая вода которых представлена крепкими рассолами хлоридно-кальциевого типа, содержащими углекислый газ, при температуре до +90 °С и давлении до 27 МПа при скорости потока до 0,4 м/с. Однако обнаружено, что полимерное покрытие MPLAG17 не обладает стойкостью в отношении эрозионной коррозии, для защиты от которой требуется применение специального защитного устройства [6].

**Практическая значимость.** Разработаны принципы выбора материалов НКТ для условий нефтяных месторождений Беларуси, определены требования к НКТ с повышенной коррозионной стойкостью и условия их применения. На основании разработанных подходов проводится закупка НКТ для промышленного внедрения в условиях нефтяных месторождений Припятского прогиба, осложненных углекислотной коррозией.

#### Литература

1. Schmitt, G. Fundamental aspects of CO<sub>2</sub> metal loss corrosion – Part II: Influence of different parameters on CO<sub>2</sub> corrosion mechanism / G. Schmitt, M. Horstemeier // Mechanism CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S metal loss corrosion: 10-year review / ed. Y. Gunaltum. – Houston, 2017. – P. 31–56.
2. Effect of microstructure on corrosion of steels in aqueous solutions containing carbon dioxide / S. Al-Hasan [et al.] // Mechanism of CO<sub>2</sub> corrosion. – Houston, 2017. – Vol. 2. – P. 47–58.
3. Борисенкова, Е. А. Механизм образования защитного слоя продуктов углекислотной коррозии на низколегированных сталях с 1 % хрома / Е. А. Борисенкова, М. К. Ионов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Серия техн. науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 195–200.
4. Особенности коррозионного разрушения нефтегазопроводных труб в условиях эксплуатации Коми и Западной Сибири / А. В. Иоффе [и др.] // Вектор науки ТГУ. – 2010. – № 4 (14). – С. 50–53.
5. Попкова, Ю. И. Влияние состава стали на коррозионную стойкость насосно-компрессорных труб в условиях углекислотной коррозии / Ю. И. Попкова // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1. – С. 48–62.
6. Попкова, Ю. И. Определение условий применения насосно-компрессорных труб из различных материалов при эксплуатации нефтяных месторождений, находящихся на поздней стадии разработки / Ю. И. Попкова, А. Я. Григорьев // Инженер. практика. – 2023. – № 11/12. — С. 38–47.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СОВРЕМЕННЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Д. Гладышева

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

Научный руководитель И. Ю. Ухарцева

*Представлены результаты исследования физико-механических и усадочных свойств современных многослойных газоселективных полимерных упаковочных материалов, полученных методами раздува «двойного пузыря» и соэструзии. Полученные данные свиде-*

*тельствуют о высоких физико-механических характеристиках упаковочных пленок и неблагоприятном воздействии перепадов температур на термоусадочные и эксплуатационные характеристики данных материалов.*

**Ключевые слова:** газоселективные упаковочные материалы, термоусадка, эксплуатационные свойства.

В последние годы упаковочная промышленность предлагает большое количество новых видов упаковок для пищевых продуктов с использованием различных материалов. Современные упаковочные материалы становятся все более функциональными, привлекательными, экологичными, что способствует расширению сферы их применения.

Среди различных материалов, применяемых для упаковывания пищевых продуктов, лидирующие позиции занимают полимерные материалы, доля которых достигает 60 %. Они сохраняют высокое качество пищевых продуктов в течение длительного времени, эффектно представляют товар при продаже, максимально облегчают открывание, приготовление и употребление продукта, имеют минимальную массу и стоимость. В последние годы для упаковывания пищевых продуктов широко внедряются упаковочные материалы нового поколения, использование которых обеспечивает сохранность упаковываемого продукта в течение длительного времени без изменения качества и органолептических показателей.

Широкое применение в упаковочной отрасли находят комбинированные и многослойные материалы. Широта применения данных материалов объясняется практически неограниченными возможностями варьирования их свойств за счет выбора состава композитного материала; установления порядка чередования слоев; обеспечения необходимого уровня адгезионного взаимодействия между слоями; выбора оптимальной технологии и оборудования для получения конкретного материала [1, 2].

Цель исследования состояла в изучении некоторых эксплуатационных свойств современных газоселективных упаковочных пленок, широко применяемых при созревании и производстве сыров. Для сравнительной оценки были исследованы трехслойные упаковочные материалы фирм «Криовак», «Крехалон» и ПО «Каустик». Пленки фирм «Крехалон» и «Криовак» получены по технологии раздува двойного пузыря (double-bubble); материал ПО «Каустик» – методом соэкструзии.

Основой наружного и внутреннего слоев пленок фирмы «Криовак» и ПО «Каустик» является сополимер этилена с винилацетатом с высоким содержанием этилена; основа среднего слоя – поливинилиденхлорид (ПВДХ). Основой наружного слоя пленок фирмы «Крехалон» является линейный полиэтилен высокого давления ПЭВД, средний слой – ПВДХ; внутренний слой – иономерная смола (сурлин) с различным содержанием катионов металла. Пленки различаются толщиной слоев, природой используемых пластификаторов и красителей. Полученные данные основаны на результатах физико-химического анализа пленок: характера пиролиза, поведения в пламени, растворимости.

Физико-механические свойства многослойных упаковочных пленок для твердых сычужных сыров (прочность при растяжении, относительное удлинение и прочность сварного шва пленочных образцов) определяли в соответствии с требованиями действующих нормативных документов при скорости движения зажимов разрывной машины 100 мм/мин [3]. Результаты испытаний представлены в табл. 1.



## Физико-механические свойства газоселективных упаковочных пленок

Наименование материала	Прочность при растяжении, МПа				Относительное удлинение, %				Прочность сварного шва, Н/см
	вдоль		поперек		вдоль		поперек		
	Рекламная информация	Экспериментальные данные	Рекламная информация	Экспериментальные данные	Рекламная информация	Экспериментальные данные	Рекламная информация	Экспериментальные данные	
Криовак									
ВК1L	55	50,0	–	54,2	150	180	200	170	14,0
ВК4L	55	63,7	–	58,6	150	170	200	210	14,0
ВВ-3	65	48,3	–	42,2	150	170	150	180	13,5
Крехалон									
MLF-3	50–60	50–55	50–60	50–55	150–200	200–250	150–220	200–250	13,8
MLF-5	50–60	50–55	50–60	50–55	150–200	200–250	150–220	200–250	
ПО «Каустик»									
БКР-1	65	45,6	–	52,6		174	150	165	8,1

При исследовании физико-механических характеристик наружных слоев пленок ВК1L и ВК4L установлено, что прочность при растяжении наружного слоя ВК1L составляет 26,9 МПа, а прочность при растяжении наружного слоя ВК4L – 33,0 МПа; относительное удлинение – 138 и 145 % соответственно. Прочность при отслаивании наружного слоя от барьерного (ПВДХ) для ВК1L составляет 0,1–0,4 Н/см; для ВК4L – 0,3–0,8 Н/см. Внутренний слой указанных пленок механически не отделяется от барьерного.

Для образцов пленки БКР-1 характерно более прочное соединение наружного слоя с барьерным. Внутренний слой отделяется от барьерного с небольшим усилием (0,1–0,15 Н/см).

Также для данных образцов была определена усадка в продольном и поперечном направлениях по разработанной ранее методике [4]. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Для исследования влияния температурных режимов на усадку образцов газоселективных упаковочных пленок были проведены их испытания на стойкость к перепаду температур при следующих условиях: выдержка при  $T = -6$  °С в течение трех часов; выдержка при  $T = +30$  °С в течение одного часа. Количество циклов испытаний составило 30. После завершения испытаний определяли линейные размеры пленочных образцов и их усадку в соответствии с ГОСТ 25951 [5]. Линейные размеры испытанных образцов пленок не изменились по сравнению с исходными. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 2

## Термоусадка газоселективных упаковочных пленок

Наименование материала	Усадка, %						T, °C	Время, с
	вдоль			поперек				
	Рекламная информация	Экспериментальные данные	$\Delta$ , %	Рекламная информация	Экспериментальные данные	$\Delta$ , %		
Криовак								
BK1L	32	28,0 ± 1,7	6,0	45	45,6 ± 1,1	2,4	85	2
BK4L	32	32,5 ± 1,7	5,3	45	46,3 ± 1,4	1,4	85	2
BB-3	34	32,0 ± 1,8	5,5	26	19,6 ± 2,1	10,6	80	1
Крехалон								
MLF-3	35-40	39,4 ± 1,1	2,8	43-48	47,6 ± 1,1	2,3	85	2
MLF-5	35-40	40,0 ± 0,0	0	43-48	46,0 ± 0,0	0	85	2
ПО «Каустик»								
БКР-1	34	25,2 ± 5,7	22,7	26	17,2 ± 1,4	7,9	80	1

Таблица 3

## Термоусадка газоселективных пленок после циклических испытаний

Наименование материала	Усадка, %		T, °C	Время, с	Примечание
	исходного	после испытаний			
Криовак					
BK1L	28,0 ± 1,7	34	85	2	
BK4L	32,5 ± 1,7	34	85	2	
BB-3	19,6 ± 2,1	18,5	80	1	
Крехалон					
MLF-3	47,6 ± 1,1	48,4	85	2	Значительная потеря эластичности
MLF-5	46,0 ± 0,0	44,4	85	2	
ПО «Каустик»					
БКР-1	25,2 ± 5,7	41,2 (внутренний) 16,4 (внешний + барьерный)	80	1	Происходит полное отделение внутреннего слоя

Проведенные испытания свидетельствуют о том, что исследованные газоселективные пленки обладают высокими физико-механическими характеристиками. Исследование усадочных свойств показало, что, несмотря на отсутствие видимых внешних изменений и сохранение линейных размеров у пленочных образцов, перепады температур неблагоприятно сказываются на термоусадочных свойствах многослойных материалов. Это очень важно при создании условий хранения и эксплуатации таких пленок.

Литература

1. Лилишенцева, А. Н. Современные виды упаковки пищевых продуктов / А. Н. Лилишенцева, М. Ю. Бойко // Пищевая пром-сть: наука и технологии. – 2017. – № 4 (38). – С. 82–88.
2. Упаковка пищевых продуктов: материалы, технологии, экология / И. Ю. Ухарцева [и др.] ; под ред. В. А. Гольдаде. – Минск : Беларус. навука, 2023. – 286 с.
3. ГОСТ 14236. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение.
4. Ухарцева, И. Долговечность полимерных материалов. Дифференциальное и интегральное влияние различных факторов / И. Ухарцева, Л. Корецкая // LAP Lambert Academic Publishing. Omni Scriptum GmbH&Co. KG, Deutschland. – Германия, 2014. – 95 p.
5. ГОСТ 25951. Пленка полиэтиленовая термоусадочная. Технические условия.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ БЫТОВЫХ ПОЛИМЕРОВ

И. В. Селюков

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

Научный руководитель И. Ю. Ухарцева

*Приведен анализ современных тенденций в решении экологических проблем при утилизации бытовых полимеров. Представлена характеристика основных видов утилизации бытовых отходов, их достоинства и недостатки. Охарактеризованы новые виды полимерных материалов, предназначенных для производства изделий бытового назначения, – упаковок для различных видов непродовольственных и продовольственных товаров. Приведена характеристика экологически безопасных биоразлагаемых и съедобных упаковочных материалов.*

**Ключевые слова:** бытовые полимеры, утилизация, экологическая безопасность, биоразложение.

Изделия из полимерных материалов – неотъемлемая часть нашей жизни. Ежедневно в быту мы используем продуктовые контейнеры, упаковки для бытовой химии, детские игрушки и другие изделия, выполненные из полимеров. Объемы бытовых отходов в виде вышедших из употребления изделий из полимеров значительны и постепенно увеличиваются, составляя примерно 40 % бытового мусора. Особенно это касается промышленных и продовольственных товаров, медицинских средств, косметики и других изделий в полимерной упаковке, которые увеличивают объемы образования этих отходов. Использование полимерной упаковки сопряжено с образованием отходов в размере 40–50 кг/год в расчете на одного человека [1].

Такие отходы специфичны, так как не поддаются гниению, саморазрушению, загрязняют населенные пункты, водоемы, лесонасаждения. Ежегодно огромное количество использованных бытовых полимеров не только загрязняет среду обитания человека, но и оказывают негативное влияние на его здоровье.

Целью настоящего исследования является анализ современных тенденций в утилизации изделий из бытовых полимеров и их экологической безопасности.

Утилизация бытовых отходов в основном осуществляется двумя основными способами – захоронением и сжиганием. Оба этих способа являются нерациональными и неэкономичными. При захоронении из полезного использования изымаются участки земли до 50 га для каждой свалки. Кроме того, на свалки попадают отходы, которые могли бы использоваться в качестве вторичного сырья. Сжигание требует предварительной обработки бытовых отходов, при этом часто происходит выделение ядовитых продуктов, которые могут попадать в атмосферу, почву, воду, а через них и в организм человека. Оборудование мусоросжигающих предприятий стоит

недешево и довольно быстро изнашивается. Метод сжигания отходов, как правило, оправдывает себя только в случаях, когда разделение мусора невозможно и сжигание является единственным способом его уничтожения.

Наиболее экономически целесообразным и экологически безопасным способом утилизации бытовых отходов, например, использованной полимерной упаковки является рециклинг, который ввиду быстрого роста объема его применения позволяет сократить потребление первичных материальных ресурсов, снизить выбросы в окружающую среду и уменьшить потребление энергии [2]. Кроме повторного использования переработанных отходов бытовых полимеров важным является деградация и разложение до экологически безопасных продуктов.

В настоящее время высокие требования к защите окружающей среды диктуют появление новых видов переработки бытовых отходов путем их самодеструкции.

Наиболее актуальным направлением является производство экологически чистой биоразлагаемой упаковки. Технологии синтеза биоразлагаемых полимеров активно развиваются в США, странах Европы и Юго-Восточной Азии. Производство таких материалов начинают осваивать и в Республике Беларусь. Сегодня в мире насчитывается более 100 видов различных биоразлагаемых полимеров. Основой для производства таких полимеров является растительное и животное сырье. Биоразлагаемые упаковки способны подвергаться деструкции под действием биологических (плесневые грибы, почвенные бактерии, атмосферные микроорганизмы), физических (ультрафиолетовое излучение) и химических (реагенты в водных средах) факторов с образованием более простых соединений, которые не оказывают вредного влияния на окружающую среду.

Перечень высокомолекулярных соединений, предназначенных для синтеза биоразлагаемых изделий постоянно расширяется. Наиболее известными являются полимеры на основе молочной кислоты – полилактиды (*PLA*), которые получают в результате молочнокислого брожения сахаров кукурузы или другой биомассы. По своей прочности и прозрачности они не уступают полистиролу и полиэтилентерефталату. Из этих полимеров производят изделия для упаковки фруктов и овощей, соков и молочных продуктов.

Кроме полилактидов разрушаемыми биопластиками являются полиэфирные алкановых кислот, так называемые полигидроксиалканоаты (*PHA*). *PHA*-биопластики подобны полипропилену и полиэтилену, обладают антиоксидантными свойствами и характеризуются высокой биосовместимостью. Из них делают упаковочные и нетканые материалы, одноразовые салфетки и предметы личной гигиены, пленки и волокна, связывающие вещества и покрытия. Отходы изделий из такого материала разлагаются под действием природных факторов. Перспективным материалом является *PEF* (полиэтиленфураноат), новый полимер, похожий на полиэтилентерефталат, но на 100 % состоящий из биологического сырья. Полимер имеет превосходные барьерные и термические свойства, что делает его идеальным материалом для упаковки напитков, пищевых и непродовольственных товаров [3].

Немаловажное значение в процессе биоразложения имеют различные наполнители полимерных материалов. Большим разрушениям подвергаются материалы, в состав которых входят органические наполнители, являющиеся питательной средой для различных микроорганизмов. Созданы материалы, в состав которых входят добавки, способствующие разложению их отходов при участии воздуха, которые относят к оксоразлагаемым (*OXO*). Изделия из таких материалов подвергаются вторичной переработке, легко превращаются в биомассу в процессе разложения при компостировании или в грунте; разрушаются под действием света и тепла [4].

Единственным видом биоразлагаемой полимерной упаковки, которая не нуждается в индивидуальном сборе и особых условиях утилизации, являются съедобные пленки и покрытия на основе природных полимеров – полисахаридов. Наибольшее распространение получили производные крахмала, желатина и целлюлозы, альгинаты натрия и кальция, выделенные из бурых морских водорослей [5].

Съедобные полимерные пленки придают продукту формоустойчивость и устойчивость к изменению качества в целом, а также обеспечивают стерильность поверхности продукта и сохранение в них важных компонентов. Съедобные пленки на основе природных полимеров обладают высокой сорбционной способностью, могут регулировать вкусоароматические свойства собственно пищевого продукта в съедобной пленке, что особенно важно при приеме продуктов лечебно-профилактического действия. Кроме того, такие пленки способны удерживать различные соединения, что позволяет обогащать продукты питания минеральными веществами, витаминами, комплексами микроэлементов, биофлавоноидами, всевозможными экстрактами, компенсируя дефицит необходимых человеку компонентов пищи.

Исследователи всего мира продолжают активно работать над проблемой создания экологически чистых съедобных пленок. Американские ученые разработали пленку на основе фруктовых или овощных пюре. Бразильская корпорация сельскохозяйственных исследований создала съедобные пленки для упаковки пиццы из томатов, смешанных с наноматериалом, который обладает связующей функцией. Российские ученые изобрели упаковку, которая на 90 % состоит из тех же веществ, что и сам продукт с использованием альгината натрия.

Белорусские ученые разработали съедобную пленку, которая состоит из крахмала и пищевых полимеров на основе воды. Получаемый продукт не только экологически и клинически чист, а также пригоден в пищу и даже способен предупреждать ряд заболеваний. Инициатива ученых позволяет разумнее распоряжаться ресурсами страны, а в итоге будет выгодной и самому потребителю. Спектр применения съедобной упаковки широк: уже сегодня специалисты предлагают антикариесные пленки с добавлением антимикробных добавок – куркумы и гвоздики. Если обернуть в них шоколад, можно не бояться проблем с зубами. Съедобная упаковка не загрязняет окружающую среду и позволяет решить проблему сокращения количества бытовых отходов [6, 7].

Таким образом, экологические проблемы, связанные с утилизацией бытовых полимеров способствуют появлению более совершенных способов их переработки путем самодеструкции и разработке особого класса материалов – съедобных. Применение таких экологически безопасных материалов направлены на защиту окружающей среды и здоровья человека.

#### Л и т е р а т у р а

1. Рециклинг и утилизация тары и упаковки : учеб. пособие / А. С. Клинков [и др.]. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2010. – 112 с.
2. Ермаков, А. И. Утилизация тары и упаковки : учеб.-метод. пособие / А. И. Ермаков. – Минск : БНТУ, 2017. – 194 с.
3. Есенаманова, Ж. С. Физико-химические и биохимические аспекты биodeградации органических веществ на полигонах захоронения твердых бытовых отходов / Ж. С. Есенаманова, А. Е. Абуова, Г. Д. Батырбаева. – Режим доступа: [http://www.rusnauka.com/17\\_APSN\\_2013/Ecologia/4\\_140992.doc.htm](http://www.rusnauka.com/17_APSN_2013/Ecologia/4_140992.doc.htm). – Дата доступа: 20.03.2024.
4. Крутько, Э. Т. Технология биоразлагаемых полимерных материалов : учеб.-метод. пособие / Э. Т. Крутько, Н. Р. Прокопчук, А. И. Глоба. – Минск : БГТУ, 2014. – 105 с.

5. Савицкая, Т. А. Съедобные полимерные пленки и покрытия: история вопроса и современное состояние (обзор) / Т. А. Савицкая // Полимер. материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 6–36.
6. Утилизация упаковочных материалов как основа экологической безопасности: биоразлагаемые и съедобные материалы / И. Ю. Ухарцева [и др.] // Весн. Гродз. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Серыя 6, Тэхніка. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 74–89.
7. Упаковка пищевых продуктов: материалы, технологии, экология / И. Ю. Ухарцева [и др.] ; под ред. В. А. Гольдаде. – Минск : Беларус. навука, 2023. – 286 с.

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЧАСТИЦ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ НА СТАБИЛЬНУЮ РАБОТУ ВИБРОДОЗАТОРА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ

С. В. Рогов, В. Г. Гаврилин

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

*Исследована форма частиц порошка и их принудительная подача в зону наплавки с помощью вибрационного дозирующего устройства. Также проведен анализ основных факторов, влияющих на равномерность подачи порошка при ЭМН: режимы, время работы дозатора, гранулометрический состав порошка.*

**Ключевые слова:** порошок, вибродозатор, электромагнитная наплавка, подача.

Все большую актуальность, особенно в Республике Беларусь, приобретают ресурсосберегающие, восстанавливающие и ремонтные технологии. Нанесение износостойких покрытий позволяет резко сократить расход дорогостоящих легированных материалов и тем самым существенно повысить надежность деталей и в целом машин. Электромагнитная наплавка (ЭМН) представляет собой один из перспективных методов создания таких поверхностей [1].

Целью данного исследования является изучение зависимости величины подачи порошковых материалов от гранулометрического состава порошков и угла наклона лотка дозирующего устройства.

Ранее проведенные исследования показали, что масса покрытия пропорциональна изменению подачи порошка. Возможность регулировки подачи, т. е. управление этим технологическим параметром, зависит от работы дозирующего устройства. В данном исследовании была применена ранее описанная в работе [2] схема вибрационного дозирующего устройства.

При проведении эксперимента были использованы ферроборФБ-3 ГОСТ 14848–69 (размер частиц 315–400 мкм) и порошкибористого чугуна БЧ-1, БЧ-2 (размер частиц 315–400 мкм). Масса подаваемого порошка (величина подачи) определялась взвешиванием на аналитических весах ВЛК-500 с точностью до 0,001 г. Величину подачи порошка определяли усреднением результатов пяти опытов. Время подачи определялось секундомером с точностью до 0,05 с.

Воздействие вибрации на сыпучие тела вызывает возникновение в них изменений, особенности которых обуславливаются интенсивностью вибрации. По мере увеличения интенсивности вибрации в пределах амплитудных ускорений, не превышающих ускорения свободного падения, сыпучее тело приобретает подвижность, псевдотекучесть. Такое состояние сыпучего тела принято называть состоянием псевдооживления. В этом состоянии сцепление между частицами ослабевает, достигается

более компактная утрамбовка частиц. Вместе с этим сыпучее тело уплотняется и уменьшается число пор. Наибольшее уплотнение достигается при амплитудных ускорениях колебаний, близких к ускорениям свободного падения [3–5].

Увеличивая интенсивность вибрации, частицы порошка начинают терять контакт с вибрирующим рабочим органом, связи между частицами порошка уменьшаются и периодически нарушаются; сыпучее тело переходит как бы в состояние кипения. Это состояние, называемое виброкипением, характеризуется разрыхлением сыпучего тела и усиленной циркуляцией составляющих его частиц.

Переход от виброоживления к виброкипению происходит либо при сообщении сыпучему телу ускорений колебаний определенного уровня, либо при достижении определенного энергетического уровня. Переход от виброоживления к виброкипению осуществляется, как правило, при ускорениях, превышающих ускорение свободного падения. Критические ускорения и энергозатраты зависят от свойств сыпучего тела, толщины слоя, сил сцепления между частицами и других факторов.

При воздействии вибрации на мелкодисперсные сыпучие тела вследствие наличия значительных сил сцепления между частицами приходится применять значительно более интенсивные режимы колебаний, чем при обработке грубодисперсных сред.

На рис. 1 и 2 приведены результаты исследования процесса вибротранспортирования порошков различного гранулометрического состава.

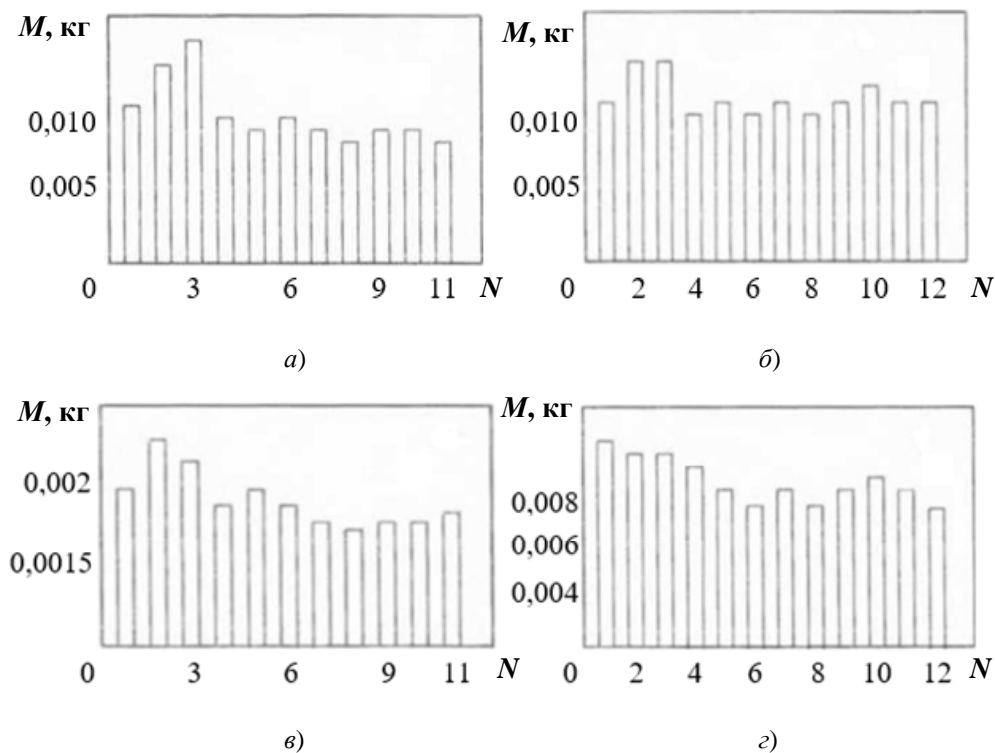


Рис. 1. Диаграммы стабильности величины подачи порошка  $M$  от количества циклов  $N$  работы дозатора:  
 а – ФБ-3 (400); б – ФБ-3 (315); в – БЧ-1 (400); г – БЧ-2 (315).  
 Интервал одного цикла – 20 с. Цифра в скобках указывает на номинальный размер частиц порошка в мкм

Из диаграмм на рис. 1 видно, что при увеличении размера частиц до 400 мкм наблюдается уменьшение подачи порошка, а не прогнозируемое увеличение. Также можно заметить, что для вибротранспортирования порошков со сферической формой (БЧ) вследствие наличия значительных сил сцепления между частицами приходится применять более интенсивные режимы вибрации, в отличие от порошков, имеющих форму частиц менее правильной формы (ФБ) (рис. 1).

Существует временной интервал, необходимый системе сыпучего тела на переход от состояния неустойчивой случайной структуры укладки, полученной в результате свободной засыпки, к состоянию «псевдооживления». Этот интервал составляет 60 секунд, что подтверждается аналогичными исследованиями других авторов [5, 6] (рис. 2).

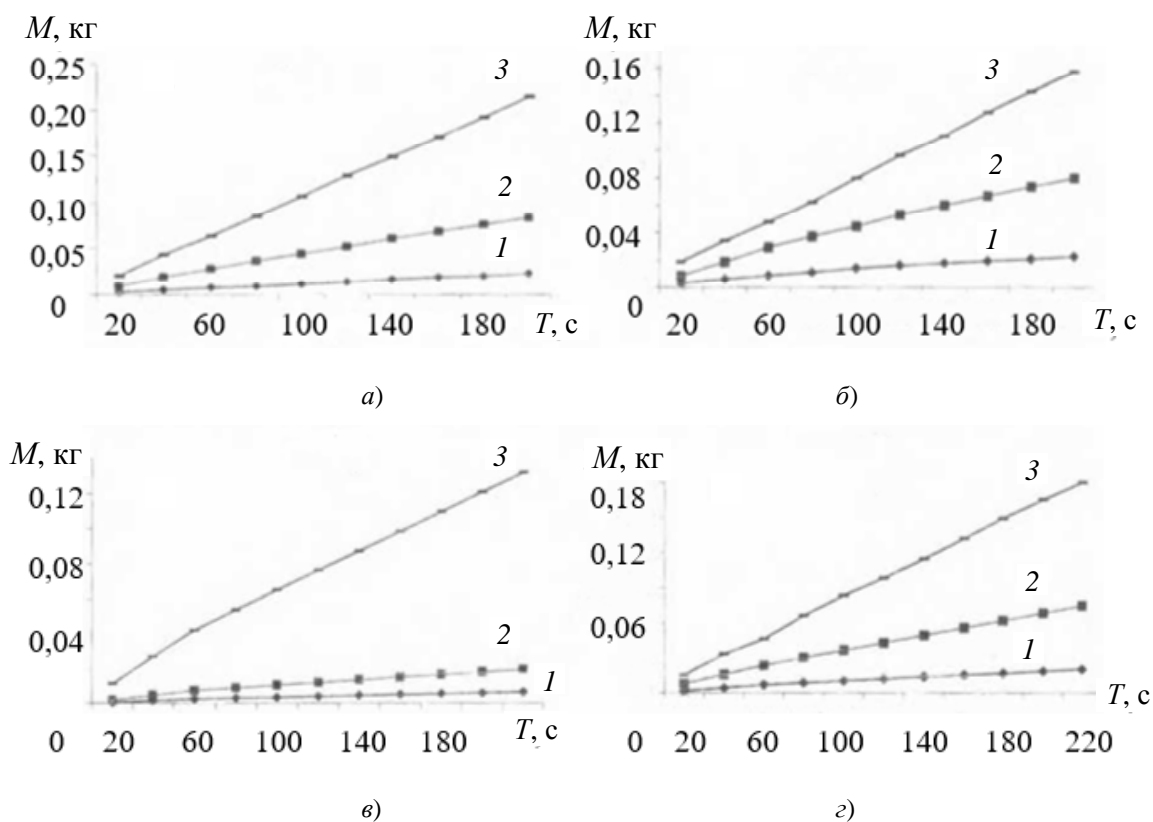


Рис. 2. Зависимость величины подачи ( $M$ ) от времени работы устройства и угла наклона лотка устройства:  
 а – ФБ-3 (315 мкм); б – ФБ-3 (400 мкм); в – БЧ-1 (400 мкм); г – БЧ-2 (315 мкм):  
 1 – угол наклона 10°; 2 – угол наклона 30°; 3 – угол наклона 50°

На рис. 2 также четко прослеживается у порошков различного гранулометрического состава зависимость подачи от угла наклона дозатора: с увеличением угла наклона лотка увеличивается подача порошка.

Основываясь на экспериментально полученных данных, можно сделать некоторые выводы: порошки со сферической формой частиц (БЧ) требуют более интенсивных режимов вибрации при вибротранспортировании, в отличие от порошков, имеющих форму частиц менее правильной формы (ФБ). Таким образом, управлять величиной подачи легче у порошков с частицами менее правильной формы.



## Литература

1. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф. И. Пантелеенко. – Минск : Технопринт, 2001. – 300 с.
2. Гринкевич, И. В. Устройство для электромагнитной наплавки наружных цилиндрических поверхностей / И. В. Гринкевич, М. П. Кульгейко, С. В. Рогов // Материалы, технологии, инструменты. – 2000. – № 2. – С. 100–102.
3. Кожуро, Л. М. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей машин ЭМН : дис. ... д-ра техн. наук / Л. М. Кожуро. – Минск : Белорус. аграр. техн. ун-т, 1985.
4. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Навука і тэхніка, 1998.
5. Блехман, Н. И. Что может вибрация?: О «вибрационной механике» и вибрационной технике / Н. И. Блехман. – М. : Наука, 1988.
6. О вибрационном уплотнении в порошковой металлургии / В. И. Лихтман [и др.] // Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 134, № 5. – С. 1150–1152.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**А. А. Кашперов, Д. А. Довгало, Д. С. Чувашов, И. А. Галушкин**

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

Научный руководитель Ж. В. Кадолич

*Показано, что симбиоз компьютерного моделирования и 3D-печати позволяет смоделировать и изготовить изделие медицинской техники с высокой точностью геометрических параметров. С помощью 3D-моделирования разработаны конструкции тотального эндопротеза височно-нижнечелюстного сустава и аноскопа, который обеспечивает максимально точное и эффективное исследование области прямой кишки, а также улучшает эргономические условия клинической практики. Сделан вывод, что 3D-печать способна конкурировать с традиционными способами изготовления изделий медицинского назначения.*

**Ключевые слова:** эндопротезирование, проктология, 3D-моделирование, 3D-печать.

Аддитивные технологии могут быть применены во многих отраслях и в настоящее время позволяют изготавливать значительное количество медицинских изделий, которые помогают в диагностировании и лечении, преодолении последствий заболеваний опорно-двигательного аппарата, сердечно-сосудистых, проктологических и других распространенных проблем со здоровьем. Следует отметить, что разработка изделий медицинской техники осуществляется, как правило, совместными усилиями специалистов естественных и технических наук. Рассмотрим несколько примеров применения аддитивных технологий, апробированных в отношении изделий медицинской техники в ходе выполнения научно-исследовательских работ на кафедре «Материаловедение в машиностроении» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого.

**Эндопротезирование.** На сегодняшний день эндопротезирование является одной из самых быстрорастущих отраслей медицины. Однако традиционные методы производства эндопротезов накладывают ряд ограничений на их использование. Поэтому все большее внимание специалистов направлено на реализацию преимуществ цифровых технологий, в частности, на возможность совместить компьютерное моделирование эндопротеза с его быстрым изготовлением при использовании методов 3D-печати.

Височно-нижнечелюстной сустав (ВНЧС) – сустав, позволяющий человеку открывать и закрывать нижнюю челюсть. Сам сустав нельзя назвать простым, так как он окружен мягкими тканями, отвечающими за те или иные функции [1].

Конструкция тотального эндопротеза ВНЧС представлена на рис. 1.

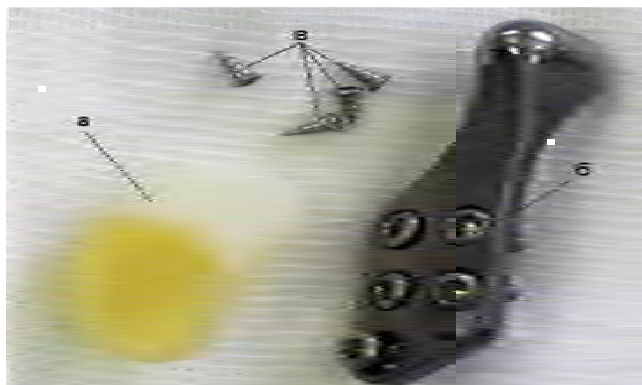


Рис. 1. Общий вид эндопротеза ВНЧС:  
а – суставная ямка височной кости; б – мышечковый отросток нижней челюсти; в – элементы крепления

Цель работы – создание оптимальной геометрии эндопротеза ВНЧС для 3D-печати.

Предпосылки работ в данном направлении состоят в том, что на сегодняшний день в Республике Беларусь в медицинской практике обычно удаляют пораженные части костной структуры ВНЧС с последующим сращиванием подвижного сустава. Очевидно, что подобная методика лечения даже при условии положительного исхода операции ухудшает качество жизни пациента в целом. Трехмерная печать решает вопрос индивидуального эндопротезирования, позволяя быстро изготовить «эксклюзивный эндопротез» с помощью компактного оборудования.

Первый этап изготовления эндопротезов ВНЧС с использованием аддитивных технологий [1] – это «виртуальное» планирование предстоящего операционного вмешательства. С помощью КТ-снимков (компьютерная томография) создается 3D-модель черепа конкретного пациента, на которой хирург отмечает зону удаления какой-либо части деформированных костных структур. Второй этап – моделирование структурных частей эндопротеза. Третий этап – 3D-печать индивидуальных эндопротезов ВНЧС.

Для преобразования КТ-снимков в работе использовали программу *3DSlicer*. При ее запуске импортируются данные пациента, полученные при КТ челюсти. Файлы должны иметь расширение *dcm*. С помощью вкладки *Segmentations–Exporttofiles* полученную модель сохраняли в формате *stl* и загружали в программу *Meshmixer*. С помощью инструментов выделения и удаления оставляли только нужную часть и получали модель ВНЧС, с помощью которой можно начинать разработку эндопротеза ВНЧС. Следует отметить, что перед началом работы необходимо иметь данные о приблизительных размерах ВНЧС. Для этого полученную ранее 3D-модель загружали в программу *3DSlicer* и с помощью инструмента *Ruler* проводили необходимые измерения. По полученным размерным параметрам в программе *Fusion 360* создавали 3D-модели структурных частей эндопротеза ВНЧС. Важно, что «эксклюзивные эндопротезы» всегда имеют разную форму в зависимости от индивидуальных особенностей человека, ввиду чего результаты моделирования должны быть обязательно согласованы с врачом, проводящим операцию [2].

Далее проверяли совместимость эндопротеза с костной структурой. Для этого в программе *3DSlicer* проводили виртуальную резекцию фрагмента кости. Далее в программу загружали модель эндопротеза ВНЧС, которая далее устанавливается на место удаленного фрагмента (рис. 2).

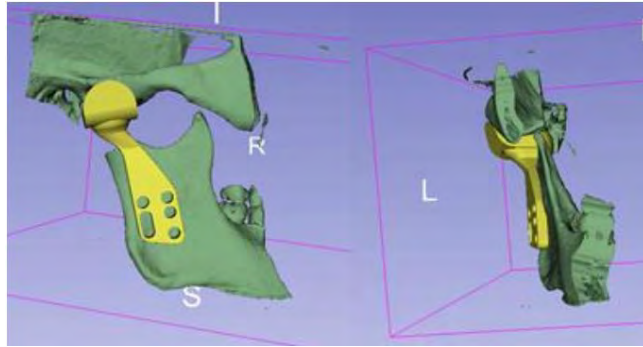


Рис. 2. Костная структура, совмещенная с эндопротезом ВНЧС

Полученную конструкцию подвергли топологической оптимизации в программе *Fusion 360*, по результатам которой в качестве экспериментального материала для изготовления мышечкового отростка нижней челюсти рекомендовано использовать титановый сплав *Ti6Al4V*, а для суставной ямки височной кости – сверхвысокомолекулярный полиэтилен либо композит на его основе. Кроме того, с помощью *Fusion 360* узнали, что масса мышечкового отростка в нашем случае составила 18,699 г, а на изготовление суставной ямки височной кости уйдет 2,85 мл фотополимера.

Завершающий этап работы – 3D-печать оптимизированной модели – достаточно тривиальная задача, которая технически реализуется специальными принтерами на основе соответствующих компьютерных файлов: *SLM*-печать для мышечкового отростка нижней челюсти и *FDM*-печать для суставной ямки височной кости [3].

Следует отметить, что описанный в работе способ производства эндопротезов ВНЧС не лишен проблемных моментов [1, 2]. В частности, внедрение трехмерных технологий в медицину в масштабах Республики Беларусь апробировано лишь на единичных примерах. Однако тот факт, что с 2016 г. в нашей стране началось бурное развитие работ в области 3D-печати [4], позволяет надеяться, что данный способ производства индивидуальных эндопротезов, в том числе ВНЧС, со временем займет свою нишу.

**Проктология.** Сидячий, малоподвижный образ жизни, неправильное питание, инфекции, травмы, плохая генетика и экология, влияние производственных факторов – все это может послужить появлению у человека очень распространенных в настоящее время заболеваний проктологического характера (геморрой, анальная трещина, проктит, пролапс и т. д.) [5]. Лечение таких заболеваний, в зависимости от их тяжести, может включать в себя не только изменение образа жизни, но и медикаментозную терапию или хирургическое вмешательство. Следует отметить, что используемый проктологический медицинский инструментарий имеет ряд функциональных и эргономических недостатков. Поэтому совершенствование конструкций, дизайна проктологических инструментов с целью придания им специализированных функций и возможности производства на территории нашей страны – актуальная задача, ускорить решение которой возможно при условии привлечения специалистов технического профиля, владеющих в том числе знаниями в области аддитивных технологий.

Цель работы – усовершенствование конструкции и дизайна пластикового операционного ректального аноскопа для приобретения им новых функций и возможностей. Для достижения поставленной цели проктологом были сформулированы следующие задачи: закрыть переднее отверстие в аноскопе и убрать ручку для освобождения руки врача.

Для 3D-моделирования в работе использовали программу *SolidWorks 2020*, которая позволяет создавать точные индивидуальные модели, в том числе медицинских изделий, а также проводить их виртуальное тестирование. Из четырех рабочих вариантов 3D-моделей объекта проектирования окончательный выбор был сделан в пользу конструкции с «язычками» (рис. 3), поскольку в этом случае, используя медицинский пластырь, возможно приклеить аноскоп за «язычки» к коже пациента, чтобы таким образом освободить руку врача. Целесообразным было также добавить освещение. Для этой цели рекомендована диодная LED-лампочка белого холодного света и три щелочные батарейки-таблетки LR626. Светодиод расположен таким образом, чтобы часть светового потока поступала в объем материала и посредством преломления света освещала аноскоп изнутри, тем самым позволяя диагностировать различные аномалии. Вторая часть светового потока проходит через материал и освещает непосредственно область операции, способствуя большей освещенности. Поскольку освещение осуществляется через корпус, в перспективе – провести анализ светового преломления с целью оценки эффективности решения по наличию осветительных устройств.

Результатом моделирования стало готовое изделие весом 43 г, время 3D-печати которого при условии использования FDM-технологии и ABS-пластика в качестве материала для 3D-принтера составило 2 ч 45 мин. В числе критериев выбора материала значился факт необходимости проведения стерилизации изделия на финише производственного процесса. Кроме того, ABS устойчив к воздействию на него таких веществ, как щелочь, соль, кислоты, выдерживает механические нагрузки, а также растворяется в ацетоне [6], что позволяет полировать изделие и корректировать при необходимости его некоторые геометрические параметры.

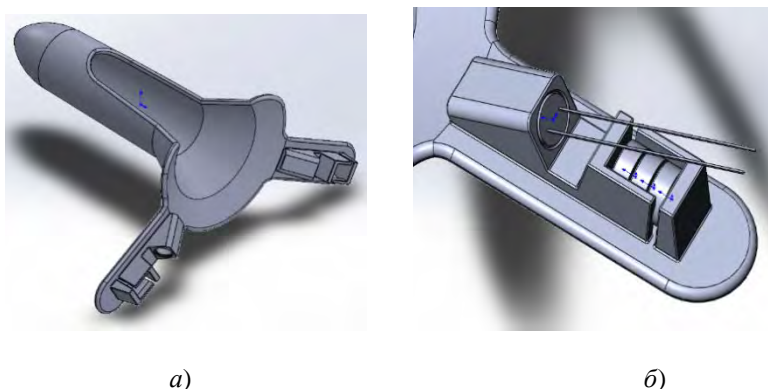


Рис. 3. 3D-модель модернизированного одноразового операционного аноскопа с «язычками» (а) и сборка осветительной части (б)

Предложенный вариант одноразового операционного аноскопа обеспечивает максимально точное и эффективное исследование области прямой кишки, минимизирует риск травмы внутренних органов, а также улучшает эргономические условия клинической практики. Невысокая стоимость готового изделия позволяет надеяться

на перспективность данной работы с точки зрения практического внедрения, а рост внимания к 3D-моделированию и 3D-печати медицинских изделий способны кардинально решить актуальную проблему импортозамещения в области медицины.

Л и т е р а т у р а

1. Епифанов, С. А. Протезирование височно-нижнечелюстного сустава / С. А. Епифанов, А. П. Поляков, В. Д. Скуредин // Вестн. Нац. мед.-хирург. центра им. Н. И. Пирогова. – 2014. – № 4. – С. 17–22.
2. Особенности трехмерного моделирования анатомических структур человека для повышения эффективности оперативного лечения в ортопедии и нейрохирургии / Е. В. Ковалев [и др.] // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. : в 2 ч. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – Ч. 1. – С. 125–127.
3. Применение трехмерных технологий для индивидуального эндопротезирования височно-нижнечелюстного сустава / Ж. В. Кадолич [и др.] // Полимер. материалы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 68–77.
4. Опыт разработки материалов и изделий медицинского и технического назначения с использованием аддитивных технологий / В. В. Дубровский [и др.] // Полимер. материалы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 2. – С. 78–85.
5. Алексеев, С. А. Основы колопроктологии: учеб. пособие / С. А. Алексеев, В. А. Гинюк. – Минск : Выш. шк., 2019. – 160 с.
6. Поздняков, Е.П. Материалы аддитивного синтеза : пособие / Е. П. Поздняков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 283 с.

**МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЦЕМЕНТОВАННЫХ СЛОЕВ  
СТАЛЕЙ 18ХГТ И 16CrMnS5**

**А. Д. Лёвкина, Е. П. Поздняков**

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

**Д. В. Куис**

*Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск*

**Т. И. Сидоренко, А. М. Коротцов**

*Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», г. Жлобин*

**А. Б. Найзабеков, С. Н. Лежнев**

*Рудненский индустриальный институт, Казахстан*

Научный руководитель И. Н. Степанкин

*Приведены результаты исследований влияния длительности цементации с последующей термической обработкой на структурообразование и микротвердость поверхностных слоев, сформированных на стали 18ХГТ и ее зарубежного аналога 16CrMnS5. Установлено, что слои стали 18ХГТ имеют более развитую карбидную фазу по отношению к аналогичным слоям стали 16CrMnS5.*

**Ключевые слова:** цементация, конструкционная сталь, карбиды, морфология, микроструктура, микротвердость.

Для повышения срока службы различных деталей, работающих в условиях усталостного изнашивания, используют методы термомодифицированного упрочнения

поверхностного слоя. Самым распространенным в промышленности является процесс имплантации углерода – цементация. Помимо высокой твердости поверхности необходимо учитывать и способность материала сердцевины противостоять продвижению трещин контактной усталости [1]. Для таких деталей широко распространена конструкционная низколегированная сталь 18ХГТ. В настоящее время на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (г. Жлобин) отлажена технология плавки новой марки стали 16CrMnS5 в соответствии с DIN EN 10084, экспортируемой в страны Европейского Союза. Однако на территории Республики Беларусь и стран ближнего зарубежья она не получила широкого распространения, что связано с недостаточной информативностью о ее свойствах.

Целью работы является установление длительности цементации на структурообразование поверхностного слоя конструкционной стали 18ХГТ и ее аналога 16CrMnS5.

Объектом исследований являлись науглероженные слои, сформированные на сталях 18ХГТ и 16CrMnS5. Диффузионное насыщение сплавов осуществлялось путем проведения цементации в твердом карбюризаторе при температуре 920 °С в течение 8-ми и 12-ти часов. После ХТО проводилась закалка в масле с температуры 860 °С и отпуск при 200 °С в течение 1 часа. Исследование микроструктуры осуществлялось на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление микрошлифов проводилось в 2,5%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Распределение микротвердости по сечению диффузионных слоев определялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 1,962Н. Определение объемной доли карбидной фазы, в диффузионном слое толщиной 0,1 мм от поверхности, определялось методом случайных секущих. Химический состав сталей приведен в таблице.

#### Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ti	P	S
16CrMnS5	0,20	0,25	1,20	1,22	0,003	0,014	0,031
18ХГТ	0,22	0,21	1,15	1,29	0,070	0,015	0,028

Микроструктура цементованных слоев сталей 18ХГТ и 16CrMnS5 после термической обработки представляет мартенситную основу с включениями остаточного аустенита и карбидов (рис. 1).

В диффузионном слое стали 18ХГТ при увеличении длительности цементации с 8 до 12 часов обнаружена коагуляция карбидной фазы. Заэвтектоидный слой структурно разделен на две зоны. В первой зоне карбиды представлены в виде отдельных сферических и вытянутых включений, максимальная длина которых не превышает 20 мкм. При увеличении времени диффузионного насыщения углеродом данная зона увеличивается с 90–100 мкм (рис. 1, а) до 120–140 мкм (рис. 1, б). Объемная доля карбидной фазы при изменении времени насыщения увеличилась с 35 до 50 об. %. Во второй зоне карбидная фаза представляет собой цементитную сетку.

Науглероженные слои, сформированные в стали 16CrMnS5, значительно различаются морфологически от слоев стали 18ХГТ. Объемная доля карбидной фазы составила 18 об. % после 8-часового насыщения и повысилась до 26 об. % при увеличении длительности ХТО до 12 часов (рис. 1, в, г). Обнаружено, что в стали 16CrMnS5 формируются более крупные включения неправильной вытянутой и остроугольной



формы, размеры которых достигают 40 мкм. Глубина их распространения составила около 80–100 мкм после 8-часовой цементации и достигла 100–110 мкм после 12-часовой цементации. Под ними формируется зона заэвтектоидного строения, которая характеризуется практически полным отсутствием скелетообразной сетки карбидов вокруг зерен  $\beta$ -фазы. Общая толщина слоев с заэвтектоидным строением для обеих сталей составила 300–400 мкм.

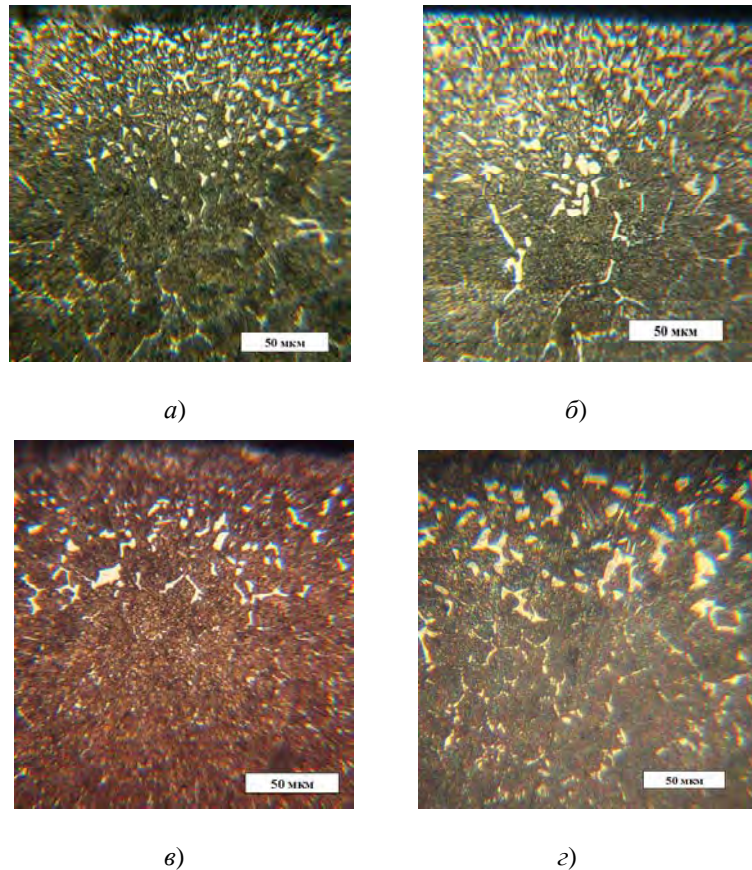


Рис. 1. Морфология карбидной фазы в заэвтектоидных слоях сталей 18ХГТ (а, б) и 16CrMnS5 (в, з) после проведения цементации в течение 8 (а, в) и 12 (б, з) часов

Изучение графиков распределения микротвердости по сечению науглероженных слоев стали 18ХГТ показало, что их зависимости имеют достаточно близкое распределение (рис. 2, а). Микротвердость поверхности при увеличении длительности цементации повысилась с 8000 до 8400 МПа. Микротвердость сердцевины составила 4500–4600 МПа в обоих случаях диффузионного насыщения. Общая толщина слоя повысилась с 1,8 до 2,0 мм при увеличении времени ХТО.

При определении микротвердости цементованных слоев, сформированных на стали 16CrMnS5, оказалось, что микротвердость значительно ниже и имеет большее отклонение, чем у аналогичных слоев стали 18ХГТ. Микротвердость поверхности составила 7100 МПа и 7500 МПа при увеличении времени цементации. Микротвердость сердцевины – 3800–4200 МПа. Общая толщина цементованных слоев оказалась на уровне около 1,9–2,0 мм.

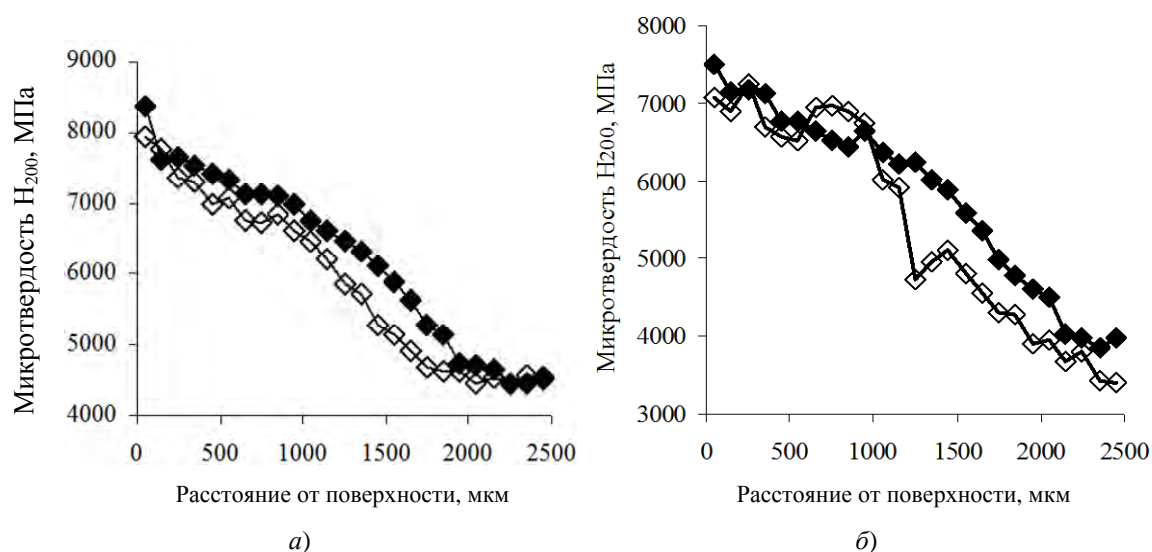


Рис. 2. Распределение микротвердости науглероженных слоев стали 18ХГТ (а) и 16CrMnS5 (б):  
 ◇ – 8-часовая цементация; ◆ – 12-часовая цементация

В результате изучения структуры и свойств цементованных слоев, сформированных на сталях 18ХГТ и 16CrMnS5, можно сделать следующие выводы:

1. Проведение цементации с последующей термической обработкой формирует мартенситно-аустенитную матрицу с различным содержанием объемной доли и морфологией карбидной фазы. В слоях стали 18ХГТ карбиды имеют сферическую и продолговатую форму, а в стали 16CrMnS5 – неправильную остроугольную. Их максимальные размеры не превышают 20 мкм в стали 18ХГТ, а в стали 16CrMnS5 достигают 40 мкм. Объемная доля карбидов в металлической матрице при увеличении длительности ХТО повысилась с 35 до 50 % в слоях стали 18ХГТ и с 18 до 26 % в слоях стали 16CrMnS5.

2. Микротвердость слоев стали 18ХГТ значительно превышает аналогичные слои стали 16CrMnS5. Данный показатель на поверхности слоев стали 18ХГТ составил 8000–8400 МПа, а у стали 16CrMnS5 – 7100–7500 МПа. Общая толщина слоев составила порядка 1,8–2,0 мм для всех исследованных случаев. Большие значения микротвердости и толщины слоев соответствуют 12-часовому диффузионному насыщению.

3. Установленные различия в количестве и морфологии карбидной фазы, а также в различии микротвердости слоев могут значительно повлиять на способность сплавов противостоять усталостному изнашиванию.

#### Литература

1. Материаловедение : учеб. пособие для вузов / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2015. – 557 с.



**ПОЛУЧЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДА ЦЕРИЯ  
МЕТОДОМ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ****О. В. Давыдова, Н. Е. Дробышевская, А. Д. Лёвкина***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Е. Н. Подденежный

*Изучен метод синтеза наноструктурированных порошков  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  путем термохимических реакций (горения) с использованием в качестве горючего смеси карбамида и гексаметилентетрамина. Показано, что при возбуждении ультрафиолетовым светом порошки  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  демонстрировали оранжево-красное излучение.*

**Ключевые слова:** оксид церия, ультрадисперсные порошки, активирование, оптически-активные ионы, термохимический метод.

Интерес к оксиду церия ( $\text{CeO}_2$ ) связан с возможностью использования его в составе высокоэффективных фотокатализаторов и систем дожигания газовых выбросов [1], а также в оптоэлектронных приборах в качестве люминофора, излучающего в оранжево-красной области спектра [2]. Ультрадисперсные порошки оксида церия, активированные оптически-активными ионами, могут быть получены с использованием прямого высокотемпературного спекания, в золь-гель процессах, гидротермальным методом и путем соосаждения гидроокисей с последующим прокаливанием осадков [3].

Целью данной работы является изучение новых методов синтеза наноструктурированных порошков  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  путем термохимических реакций (горения) с использованием в качестве горючего смеси карбамида и гексаметилентетрамина и изучение влияния условий проведения реакций на структурные, физико-химические и спектрально-люминесцентные характеристики.

Для изучения физико-химических, структурных и люминесцентных свойств синтезированных материалов были использованы методы рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр ДРОН-7), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (микроскоп TESCAN, Чехия). Спектры люминесценции регистрировались с помощью спектрофлуориметра СДЛ-2 при комнатной температуре.

Для получения люминесцентных ультрадисперсных порошков оксида церия, активированного ионами европия, проводили процесс термохимических реакций (горения) гелеобразной смеси солей  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  и  $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$  и карбамида  $-\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , взятых в молярном соотношении безводная соль : карбамид, равном 1 : 2, с добавлением гексаметилентетрамина (ГМТА) в качестве инициатора реакции окисления-восстановления.

Ингредиенты для синтеза  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  в виде азотнокислых солей церия и европия растворяли в дистиллированной воде, добавляли в смесь ГМТА и карбамид. Затем раствор в термостойкой выпарительной чаше ставили в термощкаф с температурой 80–100 °С и при помешивании концентрировали смесь до состояния вязкого геля (1,5–2 ч). Затем закрывали чашу алюминиевой фольгой, проделывали отверстия для выхода газов, помещали эту чашу в муфельную печь, нагретую до температуры 350 °С. В печи, под воздействием быстрого нагрева, происходила бурная химическая реакция окисления-восстановления, инициируемая гексаметилентетрамином. Продукт выдерживали в печи при температуре 650 °С в течение 1 ч. За время выдержки удалялись остаточные молекулы воды, выгорали остатки органических реагентов.

После остывания печи извлекали выпарительную чашу, в которой сформировался пенообразный пористый продукт (рис. 1, а). Концентрация ионов  $\text{Eu}^{3+}$  в структуре оксида церия составляла 6,0 ат. %, что является оптимальным для получения эффективной оранжево-красной люминесценции. Термохимический процесс формирования оксида церия осуществляется в несколько этапов: раствор – золь – гель – кристаллическая фаза. На стадии упаривания смеси образуются комплексные соединения нитратов церия и европия с карбамидом состава  $[\text{Ce}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{Ur})_2(\text{NO}_3)_3]$  и  $[\text{Eu}(\text{H}_2\text{O})(\text{Ur})_4(\text{NO}_3)_2]\text{NO}_3$ , в виде гелеобразного прекурсора, который разлагается с образованием соответствующих кристаллических оксидов. Ионы европия замещают в узлах решетки часть ионов церия, способствуя формированию люминесцирующего порошка.

Применение в качестве восстановителя смеси карбамида и ГМТА в процессе формирования легированного оксида иттрия методом горения приводит к образованию агломерированных рыхлых порошков с большим количеством пустот и размерами агломератов, лежащими в пределах 10–200 мкм. Такие агломерированные порошки легко диспергируются в агатовой ступке или шаровой мельнице до размеров частиц 0,2–0,5 мкм (рис. 1, б).

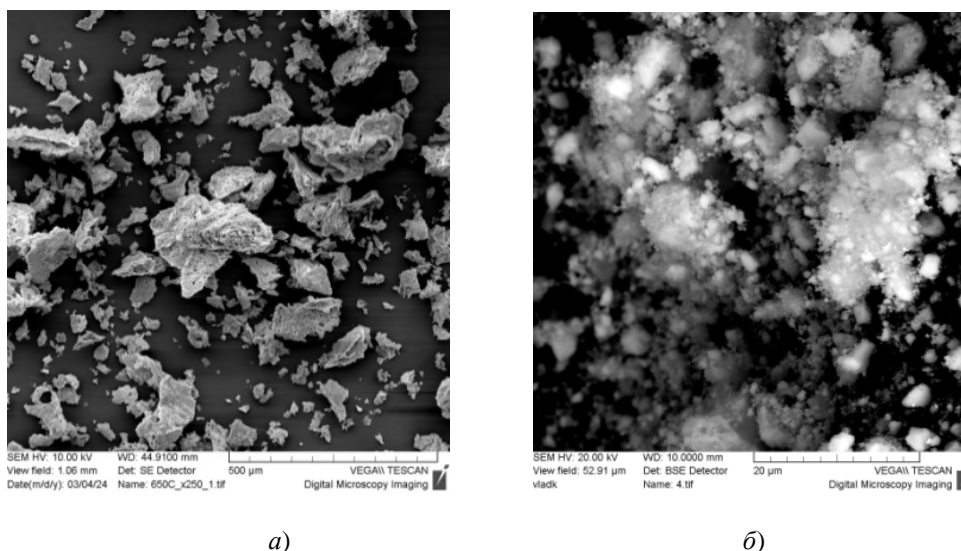


Рис. 1. СЭМ-изображение порошка  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$ , полученного горением в карбамиде и ГМТА после синтеза и прокаливания при 650 °C (а) и размолотого в агатовой ступке (б)

Спектры люминесценции образцов, прокаленных при различных температурах приведены на рис 2. При возбуждении ультрафиолетовым светом порошки  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  демонстрировали оранжево-красное излучение, обусловленное 4f-4f переходами ионов  $\text{Eu}^{3+}$ . В спектрах возбуждения  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  преобладала широкая полоса при 300–390 нм, что свидетельствует об эффективной передаче энергии от состояния  $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Ce}^{4+}$  с переносом заряда к легирующему  $\text{Eu}^{3+}$ . Порошки, прокаленные при 1100 °C, продемонстрировали самую высокую интенсивность люминесценции, которая резко снизилась с увеличением температуры. Причиной этого может быть увеличение количества кислородных вакансий при повышении температуры прокаливании.

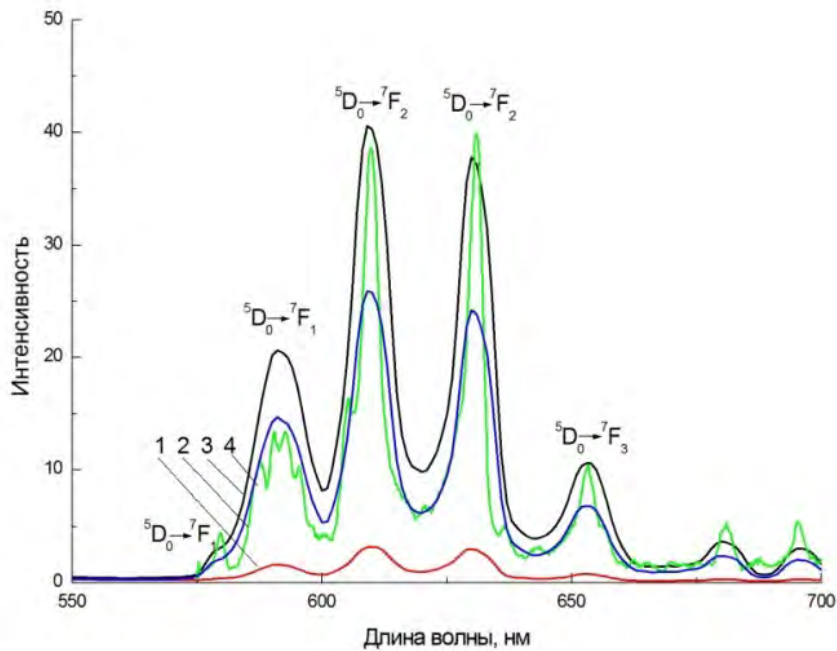


Рис. 2. Спектры люминесценции порошков  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$ , полученных горением в карбамиде и ГМТА в зависимости от температуры прокаливания: 1 – 650 °C; 2 – 900 °C; 3 – 1100 °C; 4 – 1200 °C;  $\lambda_{\text{возб}} = 300$  нм

В результате обобщения вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Изучен метод синтеза наноструктурированных порошков  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  путем термохимических реакций (горения) с использованием азотнокислых солей церия и европия, а в качестве горючего – смеси карбамида и гексаметилентетрамина.
2. Процесс осуществляли при температуре поджига смеси 350 °C и температуре прокаливания 650 °C (1 ч) в муфельной печи в условиях слабо-окислительной среды. В результате получали агломерированные рыхлые порошки с большим количеством пустот и размерами агломератов, лежащими в пределах 10–200 мкм.
3. При возбуждении ультрафиолетовым светом порошки  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  демонстрировали оранжево-красное излучение; в спектрах возбуждения  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  преобладала широкая полоса при 300–390 нм. Порошки, прокаленные при 1100 °C, продемонстрировали самую высокую интенсивность люминесценции.

#### Литература

1. Europium-doped cerium oxide nanoparticles: investigating oxygen vacancies and their role in enhanced photocatalytic and magnetic properties / A. Ankita [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2024. – Vol. 31, № 1. – P. 1276–1287. DOI: 10.1007/s11356-023-30686-3
2.  $\text{CeO}_2$  phosphor / D. Chandrakar [et al.] // Luminescence. – 2015. – Vol. 30, № 8. – P. 1201–1206. DOI: 10.1002/bio.2881
3. Structural studies and luminescence properties of  $\text{CeO}_2 : \text{Eu}^{3+}$  nanophosphors synthesized by oxalate precursor method / G. Vimal [et al.] // Applied Nanoscience. – 2014. – Vol. 5, № 7. – P. 837–846. DOI: 10.1007/s13204-014-0375-5

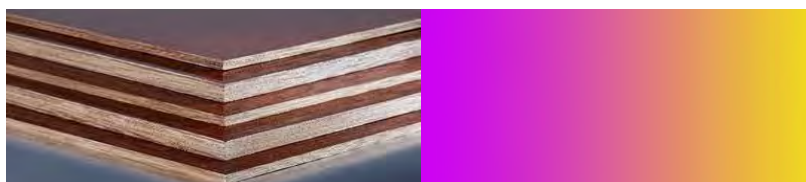
**ГРАДИЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. СОЗДАНИЕ ПРОБЛЕМЫ  
ИЛИ ЕЕ РЕШЕНИЕ****А. А. Пинчук***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

*Дан аналитический обзор информации по новому направлению в материаловедении – разработке функционально градиентных материалов. Обоснована их целесообразность, выявлены проблемы и обозначены пути их решения.*

**Ключевые слова:** функционально градиентные материалы, металлы, сплавы, полимеры, композитные материалы, градация, консолидация.

Развитие современного машиностроения, авиационно-космической техники, электротехники и многих других областей постоянно требует создания новых материалов с экстремальными свойствами по прочности, твердости, легкости конструкций, пластичности и износостойкости металлорежущего инструмента, жаростойкости и долговечности конструкций миниатюрности и высокой электроемкости электронных компонентов. Конечно, многие задачи успешно решают композиционные материалы с различными наполнителями и функциональными добавками. Преимущества композиционных материалов являются очевидными и в то же время они достигаются сложными технологическими комбинациями для достижения совместимости компонентов. Такой успех отражается на стоимости материалов. И как оказалось, часто нет необходимости в использовании таких материалов во всей конструкции создаваемого объекта. Достаточно применение его только в данной функционально работающей области, например, износостойкий материал режущей кромки инструмента, жаропрочная обшивка космических аппаратов. Конечно, такую цель можно достичь путем создания слоистых материалов – композитных материалов с множеством слоев, выполняющих различные функции. Однако у таких материалов появляется недостаток, который перечеркивает все – разрушение материала может возникнуть раньше, чем будут реализованы уникальные свойства. Ресурс и непрерывная работа материала в экстремальных условиях эксплуатации, например, в области высоких температур или интенсивных упругих деформаций в условиях наличия четких границ раздела между отдельными компонентами, имеющими разные коэффициенты температурного расширения или величины модуля упругости, приводит к расслоению или трещинообразованию, сопровождаемыми разрушением композиционного материала. Места соединения слоев, их адгезия – это скопление деформаций, напряжений, дефектов и разрушение при эксплуатации происходит именно там.



а)

б)

Рис. 1. Структура композитных материалов:  
а – слоистый; б – градиентный

Концепция функционально градиентных материалов (ФГМ) – соединить несоединимое, используя преимущества каждого, реализуемая смарт-, нано- и высокоимпульсными технологиями, показала огромный потенциал в традиционных и современных областях применения конструкционных материалов. Такие материалы с пространственно неоднородной микроструктурой и градиентными функциональными свойствами востребованы в таких областях, как энергетика, керамические двигатели, газовые турбины, термоядерный синтез, оптоэлектроника, бронезащита и т. д. Экстремальные условия требуют материала с повышенной прочностью и одновременно пластичностью, прочного как металл и жаростойкого как керамика. Новый сплав с градиентной структурой неравномерно встроенных в кристаллическую решетку металла керамических частиц решает проблему – формирует внешний слой высокой твердости и более вязкий внутренний слой. Еще одна область – это медицина будущего, которая направлена на создание функционально градиентных биоматериалов, повторяющих особенности строения биологических объектов, наличием областей, имеющих различную структуру, а следовательно, и механические свойства, например, бедренного или коленного сустава, сердечного клапана, сухожилий или сосудов. При этом – это материалы без четкой границы раздела слоев, по которому обычно происходит разрушение.

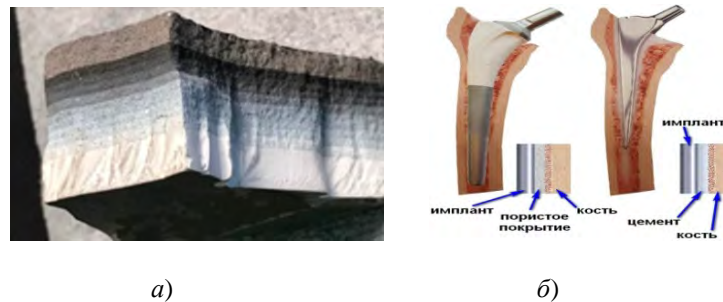


Рис. 2. Структура ФГМ биологического назначения (а), конструкция эндопротеза с использованием ФГМ (б)

Цель данной работы состояла в проведении анализа существующей информации в области разработки и применения ФГМ для оценки достоинств и недостатков этого нового направления, определения его целесообразности и значения.

Основанием для создания ФГМ являются наиболее широко известные материалы: металлы и сплавы, полимеры и композиты, керамика. Функционально градиентные материалы разрабатываются по приоритетному параметру: составу, структуре, виду и форме компонентов, однако, очевидно, что в конечном счете градиент материала выражается в свойствах, т. е. параметры (градиенты) – это аргументы, а свойства (градиенты) – это функция. Такая сложная взаимосвязь требует сначала на основании требований к свойствам материала задать величину градиента и его распределения в объеме материала, а затем аналитически связать это с вкладом каждого компонента. Необходимо отметить, что установление этих закономерностей и воспроизведение их в готовом материале представляет собой непростую задачу.

Чтобы решить вопрос о применении ФГМ в той или иной области необходимо взвесить достоинства и недостатки конкретных ФГМ, определить возникающие проблемы на пути не только их производства, но и эксплуатации.

При анализе преимуществ ФГМ на первое место, конечно, выходит возможность создания материалов с уникальными свойствами, позволяющими реализовать не только пионерские технические решения, но и воспроизвести материалы, созданные природой. Следующее – это экономное их расходование, так как ФГМ применяется только в востребованной области объекта, устройства, механизма, конкретно по месту работы.

Далее – проблемы. Получение ФГМ состоит из двух основных этапов: градации и консолидации. На каждом из этапов возникают принципиально разные проблемы. На первом этапе – это выбор технологии создания градиента. На втором – выбор технологии сохранения градиента.

Как показал обзор существующей информации, для градации – создания градиента предпочтительно использование высоко импульсных методов, которые требуют точности дозирования и управления энергетическими и силовыми потоками. Кроме того, применение их является затратным и небезопасным процессом. Для ФГМ материалов традиционного технического назначения применяются классические методы получения – формование, спекание, напыление, управляемые химические реакции (полимеризация, поликонденсация), осаждение дисперсных и волокнистых материалов. Исследуются возможности применения аддитивных технологий для получения ФГИ. Последние материалы не предназначены для эксплуатации в экстремальных условиях.

Сложнее оказался этап консолидации – сохранение созданного градиента. Наличие градиента это всегда термодинамически неустойчивое состояние объекта, что неизменно приводит к возникновению движущей силы, направленной к равновесному состоянию. В технологических процессах закрепления градиента возможно изменение структуры, фазового состава, образование новых химических соединений и в конечном счете – деградация.

В связи с этим идут интенсивные поиски новых, комбинированных, модифицированных методов как для создания ФГМ (использование дифференцированных, дисперсных, волокнистых, металлических, полимерных, неорганических материалов), так и закрепления их свойств (спекание отпуск).

Таким образом, определение преимуществ и проблем ФГМ поставили принципиальные вопросы в области их разработки и применения. Функционально градиентные материалы – приоритет или альтернатива, создание проблемы или ее решение?

Предъявляемые требования однородности структурных характеристик материалов, еще недавно очевидные и обоснованные для большинства изделий независимо от условий эксплуатации и характера функциональных нагрузок, больше не являются приоритетными. Во многих случаях наличие градиентной структуры материала позволяет разрабатывать материалы и изделия с новыми, ранее неизвестными и уникальными характеристиками. Проблемы, неизменно возникающие при разработке новых направлений в науке и технике, требуют своих решений, базирующихся на научных и практических результатах.

#### Литература

1. Градиентные полимерные материалы / А. А. Аскадский [и др.] // Обзор. журн. по химии. – 2012. – Т. 2, № 4. – С. 263–318.
2. Минько, Д. В. Теория и практика получения функционально-градиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д. В. Минько, К. Е. Белявин, В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2020 – С. 450.
3. Функционально-градиентные материалы. – Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/pdf/197430176.pdf>.



## СПОСОБЫ ПРЕФОРМАЦИИ ПРОВОЛОКИ ПОСЛЕ ВОЛОЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Н. С. Турцевич

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

Научные руководители: Ю. В. Мартьянов, Ю. Л. Бобарикин

*Описаны и проанализированы способы преформации и намотки проволоки на приемную катушку. Проведен анализ возможных регулировок рихтовального устройства. Описаны и проанализированы схемы намотки тонкой проволоки на приемную катушку. Определено влияние схем заправки на технологические свойства проволоки.*

**Ключевые слова:** проволока, остаточные напряжения, намотка, преформация.

В процессе волочения проволоки образуются остаточные напряжения, которые негативно влияют на свойства проволоки. Остаточные напряжения образуются из-за неоднородности пластической деформации материала, вызванной неоднородным холодным деформированием по сечению. Некоторые слои металла подвергаются большому растяжению по сравнению с другими, и после снятия нагрузки в них образуются остаточные сжимающие напряжения, в то время как в менее деформированных слоях возникают растягивающие остаточные напряжения.

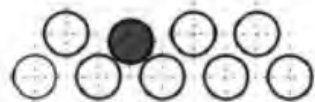
Для компенсации неравномерности деформации при правке и роликовой рихтовке используются парные блоки рихтовальных устройств, расположенные во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Повышение технологических свойств тонкой проволоки за счет уменьшения остаточных напряжений возможно при роликовой рихтовке с одинаковой вертикальной настройкой всех роликов [1]. Однако индивидуальная настройка роликов рихтовального устройства определенно имеет свои преимущества, но данный вопрос недостаточно глубоко изучен на сегодняшний день.

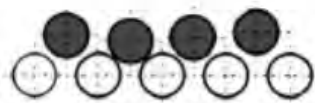
Согласно [2] в дополнение к равномерному регулированию роликов существует несколько типов регулирования роликов рихтовального устройства, представленные на рис. 1.



**Клиновое регулирование**



**Индивидуальная регулировка**



**Экспоненциальная регулировка**

Рис. 1. Виды регулирования положения роликов

Ролики для правки должны быть настроены относительно друг друга, учитывая свойства материала, которые изменяются при деформации на устройстве для правки. Эта регулировка относится к абсолютному положению роликов для правки относительно соответствующей базовой линии. С технической точки зрения эти настройки могут быть выполнены различными методами. Два подходящих варианта – это регулировка по рельсам и индивидуальная регулировка. В рамках регулировки по рельсам, по меньшей мере, одна серия роликов прикреплена к рельсу, который может быть установлен на место путем вращения или перемещения. Благодаря вращению рельса оператор может получить различные интервалы между роликами для правки, в зависимости от угла поворота. Метод индивидуальной регулировки позволяет настраивать положение каждого отдельного ролика. Стандартные устройства для правки включают машины с одной серией фиксированных роликов и несколькими сериями роликов с индивидуальной регулировкой, а также машины, где все ролики могут быть отрегулированы независимо друг от друга. Максимальная степень свободы регулирования роликов достигается, когда все ролики устройства для правки могут быть отрегулированы индивидуально. В этом случае, например, можно осуществить экспоненциальное изменение начальной кривизны относительно конечной кривизны. Для эффективного изменения начальной кривизны в области начальной кривой рекомендуется использовать большие настройки в передней части устройства для правки, где происходит предварительное изгибание. Это позволяет достичь максимальной кривизны, которая затем уменьшается для достижения конечной кривизны путем изменения рабочих роликов в последующих секциях устройства для правки с использованием мелких настроек [2].

В волочильном стане в узле намотки проволоки на приемную катушку имеется рихтовальный блок. Рихтовальный блок содержит преформатор, который деформирует материал с помощью роликов, расположенных в разных плоскостях. Положение роликов можно регулировать вручную или автоматически, чтобы достичь нужной степени выпрямления. Рихтовальный блок также может иметь магазин для обрабатываемого материала, который компенсирует изменения скорости в процессе преформации. Рихтовальный блок может быть оснащен изгибающим роликом с тормозом, который создает дополнительное растягивающее напряжение в материале перед преформацией [2].

Рихтовальный блок позволяет обрабатывать различные типы материалов с разными характеристиками и требованиями к качеству. Оно также обладает высокой гибкостью и производительностью, так как позволяет быстро переключаться между разными рихтовальными устройствами, винтовыми спиральными рихтовальными машинами и «успокаивающими» рихтовальными механизмами [2].

Варианты правильных и неправильных заправок проволоки в преформатор представлены на рис. 2 [2].

Согласно рис. 2 видно, что для повышения эффективности преформаторов необходимо исключить разнонаправленную намотку проволоки при прохождении через направляющие ролики на катушку. Разнонаправленная намотка и намотка в разных плоскостях вызывает неравномерность деформации, что, в свою очередь, приводит к формированию остаточных напряжений по сечению проволоки. Такие же правила действуют при заправке проволоки в преформатор.





Рис. 2. Схемы заправки проволоки в узле намотки на приемную катушку

По результатам исследований определена физическая сущность преформации проволоки для повышения технологических свойств. Определены подходы к проектированию новых эффективных преформирующих узлов, связанные со способами заправки проволоки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Tensile straightening and roller straightening of fine drawn wire / Kazunari Yoshida, Hiroyuki Sato, Tsuyoshi Sugiyama // Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 2009. – № 11. – С. 788–793.
2. Альберт, Э. Мы делаем ее ровной. Правка проволоки / Э. Альберт, М. Пех, М. Шиллинг. – Rosch-BuchDruckerei GmbH, 2000. – 208 с.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И СВОЙСТВ ИСХОДНОГО ОГНЕУПОРНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

В. А. Соловьёва

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

Научный руководитель И. Н. Прусенко

*Представлены результаты исследований влияния качественных характеристик формовочных кварцевых песков на эксплуатационные свойства литейных стержней. Установ-*

лена зависимость структуры стержневой смеси от формы и чистоты поверхности зерен огнеупорного наполнителя.

**Ключевые слова:** литейные стержни, стержневая смесь, Novake процесс, форма зерен песка.

Качественные характеристики огнеупорного наполнителя, входящего в состав стержневой смеси, существенно влияют на эксплуатационные свойства литейных стержней. В этой связи выбор огнеупорного наполнителя должен учитывать не только его теплотехнические характеристики, но и такие факторы, как форма зерен песка, характер их распределения по дисперсности и наличие примесей, которые могут существенно влиять на процессы структурообразования в литейных стержнях [1].

Соответственно, для оценки влияния представленных характеристик огнеупорного наполнителя на свойства литейных стержней, изготовленных по технологическому процессу «Novake», проведены исследования со следующими марками формовочных песков  $1K_2O_3O_3$ ,  $1K_2O_2O_25$ ,  $1K_1O_2O_2$ ,  $3K_4O_3O_3$  по типовой рецептуре Furan-смесей.

Принято считать, что форма зерен песка постоянна по фракционному составу в рамках определенной марки и влияет на количество контактов в стержневой смеси, расход связующего материала. В этой связи для качественной оценки формовочных песков было произведено микроскопическое изучение их зерен в зависимости от среднего размера, в результате чего была установлена зависимость степени округлости зерна огнеупорного наполнителя от его величины (табл. 1).

Таблица 1

Форма зерен песков различных месторождений

Средний размер зерен песка, мм	Форма зерна песка, %											
	$1K_2O_3O_3$			$1K_2O_2O_25$			$1K_1O_2O_2$			$3K_4O_3O_3$		
	Округлая	Полукруглая	Угловатая	Округлая	Полукруглая	Угловатая	Округлая	Полукруглая	Угловатая	Округлая	Полукруглая	Угловатая
1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	24	44	32
0,63	18	53	29	20	44	36	–	–	–	24	42	34
0,4	16	51	33	20	43	37	23	42	35	23	39	38
0,315	13	46	41	18	41	41	20	41	39	20	38	42
0,2	12	43	45	15	40	45	18	39	43	18	36	46
0,16	10	40	50	8	33	59	14	36	50	14	33	53
0,1	7	34	59	4	25	71	10	30	60	10	27	63
0,063	2	26	72	2	20	78	5	25	70	5	22	73
0,05	0	16	84	0	11	90	2	19	79	2	16	82
Тазик	0	10	90	0	5	96	0	10	90	0	7	93

Качественный анализ частиц выделенного среднего размера позволил заключить, что для зерен песков фракций 1, 063, 04, 0315, 02 наиболее характерна полукруглая окатанная форма, а для зерен более мелких фракций преимущественно угловатая. Такая закономерность характерна для всех исследуемых марок формо-

вочных песков и данный факт необходимо учитывать при прогнозировании условий формирования прочности литейных стержней.

Испытания прочности на разрыв проводились согласно ГОСТ 23409.7–78. Регистрация результатов исследования проводилась в условиях полной полимеризации связующего (через 24 ч после изготовления) для различных марок песков (рис. 1).

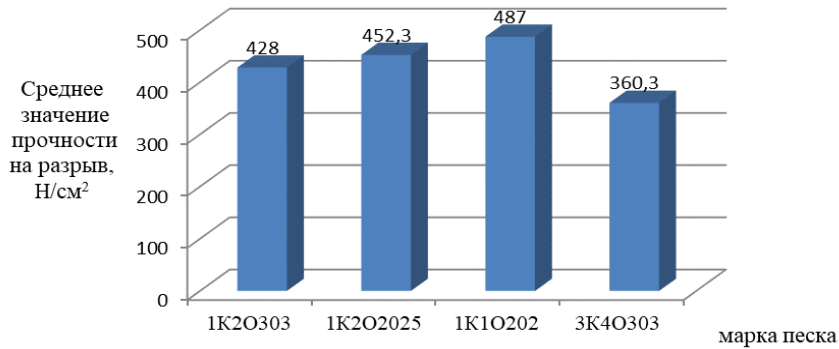


Рис. 1. Прочность на разрыв для различных марок песков

В результате проведенного исследования установлено, что наименьшее значение прочности имеют образцы, изготовленные с применением формовочного песка 3K<sub>4</sub>O<sub>3</sub>O<sub>3</sub>, имеющего наиболее высокое содержание посторонних примесей. Наибольшая прочность отмечена у образцов, изготовленных с применением формовочного песка 1K<sub>1</sub>O<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

В проведенном исследовании использовались пески с преимущественно угловатой формой зерен песка. Для проверочной оценки влияния формы зерна огнеупорного наполнителя на прочность стержневой смеси было проведено исследование, включающее применение навесок из искусственно созданных монофракционных песков, состоящих из частиц только округлой и только угловатой формы. Зерновой состав огнеупорного наполнителя подбирался в соответствии с маркой 1K<sub>1</sub>O<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. В результате проведенного исследования было установлено, что прочность образцов с округлой формой зерен заметно уступает прочности образцов с угловатой формой (табл. 2).

Таблица 2

Прочность образцов в зависимости от формы зерен песка

Форма зерна песка, из которых изготовлен образец	Прочность на разрыв через 1 ч, кПа					Среднее значение	Прочность на разрыв через 24 ч, кПа					Среднее значение
	277	278	281	274	276		489	485	483	487	482	
Угловатая	277	278	281	274	276	277	489	485	483	487	482	485
Округлая	254	248	245	247	250	249	385	387	385	392	390	388

Микроскопический анализ показал, что зерна песка угловатой формы в сравнении с округлыми характеризуются более плотным прилеганием друг другу при уплотнении, ввиду этого увеличивается площадь контакта манжеты связующего с зернами песка, что приводит к более высокой прочности стержневой смеси.

Важно отметить, что угловатая форма зерна песка характеризуется большей удельной поверхностью их контактов друг с другом, однако характеризуется низкой пористостью и газопроницаемостью смеси, изготовленной с применением данного песка.

Кроме этого следует учитывать, что среди зерен угловатой формы часто встречается шершавая поверхность, покрытая оболочкой другого вещества (глинистая составляющая и низкоогнеупорные примеси), что оказывает существенное влияние на формирование прочности сцепления связующего вещества между зернами огнеупорного наполнителя.

При изучении формы зерен песка было произведено исследование чистоты поверхности песчинок. Известно, что поверхность зерен песка может быть гладкой, шероховатой, чистой или покрытой оболочкой легкоплавких примесей и глины.

Оценку влияния содержания примесей в зерновой основе песка на эксплуатационные характеристики литейных стержней производили для типовой рецептуры смеси по «Nobake» процессу, содержащей 100 % кварцевого песка, 1,2 % связующего вещества и 0,8 % отвердителя. Для каждой исследуемой марки огнеупорного наполнителя было изготовлено три образца из исходного и три образца из дополнительно очищенного песка. Формовочный песок очищали прокаливанием и отмучиванием по стандартной методике.

В результате проведенного исследования было выявлено, что наибольшие показатели прочности на разрыв отмечены у песков  $1K_2O_3O_3$ ,  $1K_2O_2O_25$ ,  $1K_1O_2O_2$  (рис. 2, а). В случае применения исходного песка марки  $3K_4O_3O_3$  в составе стержневой смеси средний показатель прочности составил  $360,3 \text{ Н/см}^2$ , а после прокаливания и отмучивания наполнителя данный показатель увеличился до  $471,3 \text{ Н/см}^2$ , что составляет 30 % от исходного значения. Следует отметить, что данная марка песка имеет наибольшее содержание глинистой составляющей и наличие примесей в исследуемой группе.

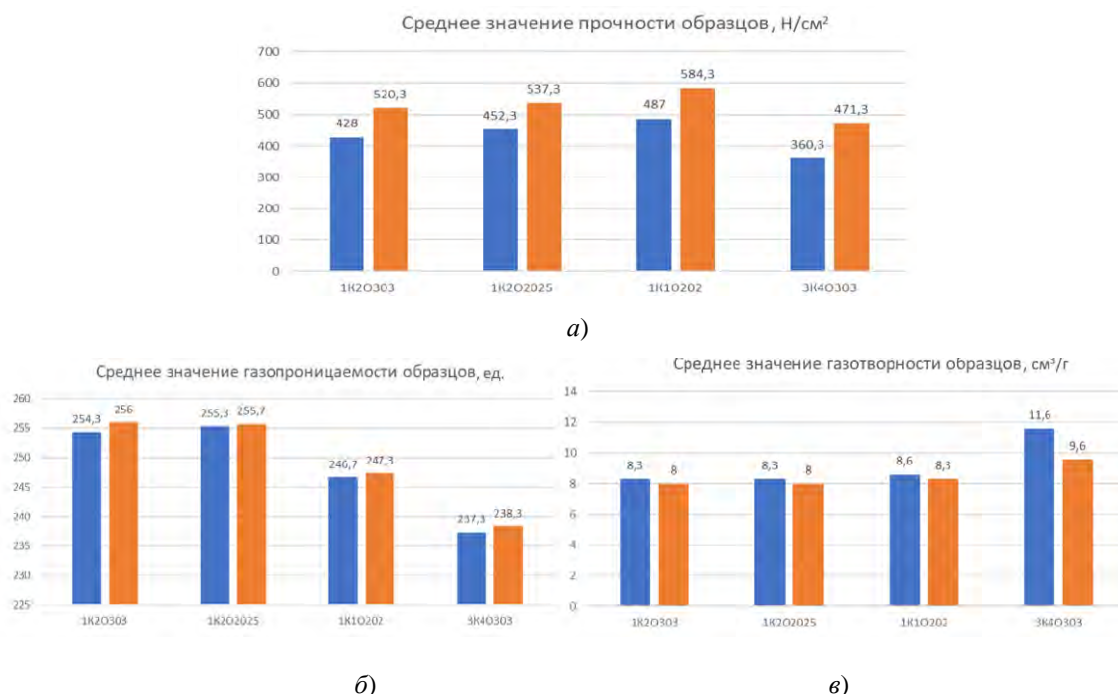


Рис. 2. Результаты исследования прочности, газотворности, газопроницаемости образцов:

- – образцы с использованием исходного огнеупорного наполнителя;
- – образцы с использованием предварительно очищенного огнеупорного наполнителя

Значение газопроницаемости при очистке огнеупорного наполнителя увеличилось незначительно (рис. 2, б), что говорит о том, что в данных песках низкая доля пылевидных фракций низкоогнеупорных примесей (водные алюмосиликаты железа и магния), а основная часть адгезированна преимущественно на поверхности зерен.

Установлено, что уменьшение количества примесей способствует снижению газотворности стержней из ХТС, выполненных с использованием всех исследуемых марок песков. Использование очищенного от легкоплавких соединений песка позволило снизить газовыделения при термической деструкции примесей на 4–18 % (рис. 2, в), в зависимости от степени загрязненности.

Проведенный анализ позволяет установить существенную зависимость прочности, газопроницаемости, газотворности литейного стержня от исходных формовочных материалов. Для стабилизированного протекания процессов механического взаимодействия расплава и литейного стержня прочность, характерная виду связующего компонента, должна соответствовать сложности и размерам внутренних полостей отливки, а гранулометрический состав огнеупорного наполнителя должен подбираться с учетом величины, характера распределения зерен песка, формы и характера поверхности частиц, наличия примесных минералов. Данный подход необходим для формирования структуры стержневой смеси, обеспечивающей стойкость к деформациям и возникновению механических напряжений при контакте с расплавом.

#### Л и т е р а т у р а

1. Одарченко И. Б. Роль огнеупорного наполнителя в процессах структурообразования стержневых смесей / И. Б. Одарченко, И. Н. Прусенко // *Литье и металлургия*. – 2-17. – № 4 (89). – С. 89–93.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПОСОБОВ ПРЕФОРМАЦИИ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Д. В. Деревянко

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

Научные руководители: Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов

*Технологические свойства проволоки важны, так как позволяют увеличивать производительность волочения на промышленных предприятиях. Контроль и управление технологическими свойствами является актуальной задачей. По результатам исследований определены основные причины, влияющие на технологические свойства проволоки.*

**Ключевые слова:** проволока, остаточные напряжения, рихтовальное устройство, преформация.

Контроль технологических свойств проволоки очень важен в современном металлургическом производстве, так как позволяет избежать брака или минимизировать его. Высокий процент брака удорожает продукцию и делает ее менее конкурентноспособной. Основным способом контроля и прогноза технологических свойств проволоки является преформация проволоки.

Под преформацией металла понимают предварительную деформацию металла перед упаковкой. Предварительная деформация предназначена либо для снижения остаточных напряжений в металле, либо для искусственного создания неравномерности деформации в металле. Под преформацией проволоки понимается предварительная деформация проволоки непосредственно перед входом в рихтовальное

устройство или в рихтовальный узел. При производстве проволоки на этапе тонкого волочения для уменьшения величины остаточных напряжений для предварительной деформации используют роликовые устройства, называемые рихтовальными. Рихтовка проволоки – это операция, выполняемая с целью повышения прямолинейности. К тонкой проволоке диаметром от 0,5 мм до нескольких миллиметров, а также к проволоке средних диаметров, от нескольких миллиметров до 10 мм, часто применяют роликовую рихтовку [1]. Роликовое рихтовальное устройство представляет собой блок роликов, через которые пропускается тонкая проволока. Применительно к тонкому волочению проволоки роликовое рихтовальное устройство может состоять из нескольких секций: секция предварительной деформации, секция знакопеременного изгиба, секция дополнительной неравномерной деформации. Роликовое рихтовальное устройство представлено на рис. 1.



Рис. 1. Роликовое рихтовальное устройство

Основное назначение преформации состоит в создании неравновесного напряженного состояния проволоки для компенсации эффекта Баушингера и компенсации влияния последующих роликов волочильного стана или канатной машины [2].

Эффект Баушингера является следствием работы роликового рихтовального устройства, работающего по принципу знакопеременного изгиба. Знакопеременный изгиб необходим для уменьшения величины остаточных напряжений 1 и 2 рода [3].

Внутреннее проявление остаточных напряжений связано с изменением межатомных расстояний, которое может быть обнаружено рентгеновскими методами.

Общим свойством остаточных напряжений является то, что они всегда бывают чисто упругими, даже если возникают в результате пластической деформации. Эти напряжения могут быть сняты или ослаблены способами, которые приводят к уменьшению упругих деформаций, соответствующих остаточным напряжениям, с последующим рассеиванием упругой потенциальной энергии, накопленной в материале. Но это может сопровождаться пластической деформацией и новыми остаточными напряжениями [3]. Остаточные напряжения первого рода возникают под влиянием неравномерного охлаждения или нагрева, упрочнения или фазовых и структурных превращений. Эти напряжения оказывают существенное влияние на свойства металла под воздействием внешних нагрузок.

При некоторых условиях деформации распределяются в объеме металла весьма неравномерно. В поверхностных слоях металла при наличии значительного градиента напряжения часто можно наблюдать, что при одном и том же значении деформации

ции в некоторых областях имеет место развившаяся пластическая деформация, тогда как в смежных областях материал еще находится в состоянии упругой деформации. Разница в локальных значениях относительного удлинения или относительного сдвига может достигать значения одного порядка и больше.

Макродеформация рассматриваемой зоны металла имеет зависимость:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{пл} i \delta + \varepsilon_{упр} (1 - i \delta),$$

где  $\varepsilon_c$  – макродеформация рассматриваемой зоны металла;  $\varepsilon_{пл}$  – пластическая деформация рассматриваемой зоны металла;  $\varepsilon_{упр}$  – упругая деформация рассматриваемой зоны металла;  $i$  – число зон пластичности на 1 см длины поверхности;  $\delta$  – размер этих зон в направлении действующего напряжения.

Таким образом, возможно рассчитать макродеформации локализованной зоны исследуемого образца и аналитически проанализировать возможную величину остаточных напряжений. При необходимости проанализировать распределение остаточных напряжений возможно использовать метод микроиндентирования.

По результатам исследований определены причины необходимости контроля остаточных напряжений в проволоке, а также описаны способы возможного анализа величины остаточных напряжений.

#### Литература

1. Tensile straightening and roller straightening of fine drawn wire / Kazunari Yoshida, Hiroyuki Sato, Tsuyoshi Sugiyama // Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 2009. – № 11. – С. 788–793.
2. Проявление эффекта Баушингера при знакопеременной деформации / Р. Р. Адигамов [и др.] // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2022. – Vol. 65, N 7. – P. 455–466.
3. Буркин, С. П. Остаточные напряжения в металлопродукции : учеб. пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрюкова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 248 с.

## ПРОЦЕССЫ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ МАТЕРИАЛОВ К ПЛАВКЕ В ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

А. А. Иващук

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

*Представлены результаты исследований и разработки энергосберегающих технологий для электроплавильных печей. Перспективы повышения эффективности управления процессом подогрева шихты могут быть реализованы за счет экспресс-методов волновой диагностики слоя шихты. Нейросетевое моделирование с построением регрессионных моделей процессов подогрева шихты позволяет создать экономичные модели управления теплофизикой подготовки материалов для электроплавки.*

**Ключевые слова:** металлический лом, сталеплавильные процессы, предварительный подогрев, управление, моделирование, оптимизация.

Лом в качестве шихтовых материалов используется в сталеплавильных процессах в различном соотношении с чугуном, а в дуговых сталеплавильных агрегатах он является основным сырьем. К загружаемым в печь материалам предъявляются следующие требования: определенность химического состава, насыпная плотность и габаритные

размеры кусков скрапа. С точки зрения химического состава желательно, чтобы в ломе было минимальное количество вредных примесей серы и фосфора и чтобы имеющиеся примеси легирующих элементов использовались с наибольшей пользой. При выплавке качественных сталей действуют жесткие требования по ограничению примесей цветных металлов.

Сбор и переработка вторичного лома носит государственный характер. Лом является возобновляемым сырьевым материалом и его необходимо использовать как можно в большем количестве, поскольку это позволяет получить экономию энергии на производство сырьевых ресурсов.

При замене природного сырья в производстве металлов необходимо учитывать не только экологически вредные выбросы в собственно металлургическом производстве, но и экологический ущерб, наносимый окружающей среде самими процессами добычи сырья, подготовки его к металлургическому переделу, а также затраты на создание и функционирование очистных сооружений. При использовании лома в качестве сырья для выплавки стали требуются минимальные затраты на экологические мероприятия.

В связи с развитием электрометаллургии стала более актуальной тема разработки энергосберегающих технологий для электроплавильных печей. Несмотря на высокую производительность и определенные достоинства таких печей, они используют весьма дорогой энергоноситель – электричество. Так как в процессе работы печи образуется пыль, вредные вещества, высокотемпературные газы, необходимо осуществлять природоохранные мероприятия, что означает затрату еще большего количества электроэнергии.

Наиболее эффективным способом сокращения затрат электроэнергии является предварительный подогрев шихты. Он обеспечивает экономию в  $\sim 200$  кВт · ч на 1 т. Данный способ позволяет также ускорить процесс плавки.

Подогрев шихты осуществляется несколькими способами:

- нагрев газовыми или газокислородными горелками в рабочем пространстве печи;
- в камерных, шахтных или проходных газовых печах;
- в стационарных или вращающихся электрических печах;
- нагрев в специальных установках, конструктивно совмещенных с плавильной печью, за счет тепла отходящих газов;
- в загрузочных корзинах на автономных установках.

Наиболее надежным и наименее дорогостоящим способом предварительного нагрева шихты при электроплавке является подогрев вне печи в загрузочных бадьях на автономной установке, отапливаемой природным газом. Экономический эффект при этом обуславливается двумя факторами. Стоимость единицы тепловой энергии (1 кДж), полученной от сжигания природного газа, в семь раз меньше, чем от преобразования электроэнергии. Второе – КПД нагрева шихты за счет продувки составляет 65–70 %, что примерно втрое превышает эффективность нагрева шихты в электропечах и, следовательно, суммарные затраты тепла существенно ниже.

Большое значение для эффективного хода процесса нагрева шихты в автономных установках с использованием стандартных загрузочных корзин имеют показатели движения газового потока сквозь слои шихтовых материалов. Процессы тепловой обработки дисперсных материалов отличаются от аналогичных процессов сплошных сред тем, что слой, состоящий из отдельных частиц, имеет ячеистую нестабильную структуру различной плотности. При температурах выше 800–900 °С мелкий лом интенсивно окисляется из-за очень большой площади поверхности. Это снижает эффективность плавки и может создать опасные ситуации при загрузке



лома в печь. Специфика стального лома, используемого в ЭДП, создает определенные трудности при его предварительном нагреве, особенно экстремально высокотемпературном.

Актуально использование новых подходов к определению режимных параметров процессов подогрева шихты.

В настоящее время хорошо зарекомендовал себя математический аппарат, основанный на теории нейронных сетей, который не требует практически никаких ограничений на схематизацию процесса. Данный подход эффективно используется для управления сложными нелинейными объектами, аппроксимации функций при решении многочисленных инженерных и научных задач моделирования, при решении оптимизационных задач и др.

На практике используемое программное обеспечение для расчета параметров процесса нагрева шихты требует ввода значительного количества исходных данных о материале, теплоносителе и условиях осуществления процесса. При использовании нейронных сетей можно ограничиться только наиболее важными параметрами, которые могут быть получены в лабораторных условиях предприятия и даже при этом можно получить качественно обученную нейронную сеть, позволяющую определять рациональные режимные параметры. В этом и есть основная особенность нейронных сетей, а именно обучаться и выявлять скрытые закономерности между потоками входных и выходных данных.

На кафедре «Металлургия и технологии обработки материалов» ГГТУ им. П. О. Сухого разработана экспериментальная установка (рис. 1) для исследования качества и процессов предварительного подогрева шихтовых материалов, адаптированная к применению в небольших литейных цехах. Она позволяет совместить исследование волновой проницаемости шихты с использованием подогретой шихты для плавки в индукционных и дуговых электропечах малой емкости (от 500 кг до 3 т).

В результате решения задачи построения регрессионной модели расчета продолжительности нагрева с целью достижения заданной средней температуры была получена трехслойная модель, позволяющая с высокой точностью (погрешность по тестовым наборам данных не более 10%) оценивать технологические аспекты предварительной термообработки материала перед плавкой в электрических печах. При поисковой оптимизации после анализа более 200 архитектур нейронных сетей была получена регрессионная модель. Использование аппарата теории нейронных сетей на практике в промышленных теплообменных аппаратах видится перспективным, поскольку он может быть использован для поиска оптимальных режимов нагрева, при которых нейросеть способна рассчитать такое управляющее воздействие на различных участках промышленного аппарата, при котором кинетика нагрева материала будет осуществляться по желаемой траектории. Наряду с поиском оптимальной траектории термообработки материала использование нейросетей позволяет повысить универсальность используемого математического и программного обеспечения для расчета режимных параметров процесса.

Перспективы повышения эффективности управления процессом подогрева шихты могут быть реализованы за счет экспресс-методов волновой диагностики слоя шихты, из потока, поступающих на подогрев шихтовых материалов. Для этого составлена программа испытаний, включающая в себя:

- 1) акустические исследования слоя шихтовых материалов перед подогревом;
- 2) исследования оптической проницаемости и светопоглощения слоя шихты;
- 3) выявление изменения электромагнитной проницаемости шихты.

Полученные результаты могут быть использованы для управления процессом предварительного нагрева шихты с целью обеспечения максимальной эффективности процесса.

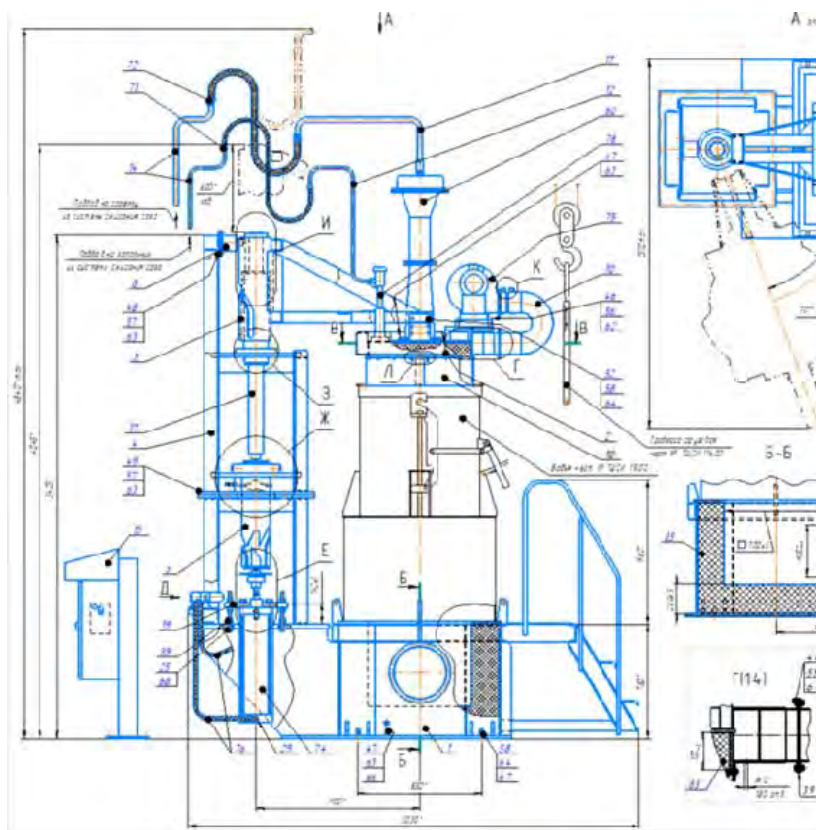


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования качества и процессов предварительного подогрева шихтовых материалов

В итоге можно отметить, что применение предварительного подогрева шихты позволяет увеличить производительность печей на 25–35 % и сократить время расплавления металлозавалки в 2–2,5 раза, а также обеспечить их окупаемость в течение 6–9 месяцев, что говорит о рациональности использования этой технологии.

## НАПРЯЖЕНИЕ ВОЛОЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ВОЛОКИ

Д. А. Лысенко

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

При проектировании и совершенствовании процессов волочения металлической проволоки и прутков необходимо иметь возможность аналитического расчета значения усилия волочения. Традиционно при расчете величины усилия волочения основное внимание уделяется определению усилия волочения через основную деформирующую зону волокна. Однако

величина практического усилия волочения также зависит и от сопротивления протяжки металла через цилиндрическую калибрующую зону волоки. В работе представлена зависимость для аналитического расчета напряжения волочения через цилиндрическую калибрующую зону волоки.

**Ключевые слова:** волочение, волока, цилиндрическая зона волоки, формула для напряжения волочения

Аналитическое определение значения усилия волочения используется для оперативной оценки энергосиловых параметров волочения проволоки и прутков [1–3]. Усилие волочения зависит от сопротивления протяжки металла через деформирующую, чаще коническую зону волоки и через цилиндрическую калибрующую зону волоки. Основная доля величины усилия волочения приходится на деформирующую зону волоки. Но и доля усилия волочения, зависящая от сопротивления протяжки металла через цилиндрическую коническую зону волоки, также имеет влияние на общую силу волочения. И аналитическая оценка значения этой величины актуальна.

Для определения усилия волочения на выходе из волоки рассмотрим схему напряженного состояния в калибрующей зоне волоки (рис. 1).

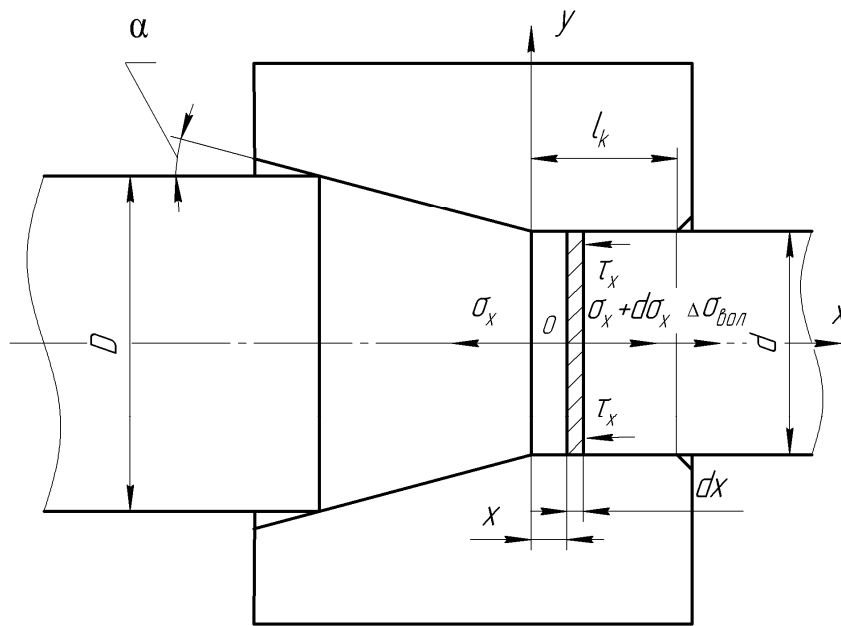


Рис. 1. Схема напряженного состояния в калибрующей зоне волоки

В калибрующей зоне очага деформации на расстоянии  $X$  вдоль оси заготовки проведем плоскость, перпендикулярную оси  $X$ . На расстоянии  $dx$  от этой плоскости проведем параллельную плоскость. В результате между проведенными плоскостями образуется элементарный объем очага деформации толщиной  $dx$ . На выделенный объем действуют осевые напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_x + d\sigma_x$ , касательные напряжения  $\tau_x$ . Тогда уравнение равновесия сил, действующих на элементарный объем в калибрующей зоне, примет вид:

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi d^2}{4} - \sigma_x \frac{\pi d^2}{4} - \tau_x (\pi d dx) = 0. \tag{1}$$

Преобразуя выражение (1), получим:

$$d\sigma_x \frac{\pi d^2}{4} - \tau_x (\pi d dx) = 0. \quad (2)$$

Для решения уравнения (2) необходимо исключить неизвестную переменную величину  $\tau_x$ . Для этого предположим, что в зоне контакта действует закон трения Зибеля:

$$\tau_x = f\sigma_T.$$

Тогда уравнения (2) принимает вид:

$$d\sigma_x \frac{\pi d^2}{4} - f\sigma_T (\pi d dx) = 0;$$

$$d\sigma_x \frac{\pi d^2}{4} = f\sigma_T (\pi d dx). \quad (3)$$

Интегрируя равенство (3), получим:

$$\sigma_x \frac{d}{4} = f\sigma_T x. \quad (4)$$

При  $x = l_k$  и  $\sigma_x = \sigma_{\text{вол}}$  получим:

$$\Delta\sigma_{\text{вол}} = \sigma_T \frac{4fl_k}{d}. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет вычислить  $\Delta\sigma_{\text{вол}}$  с большой погрешностью. Эта погрешность обусловлена принятым законом трения, который характерен для более интенсивного контактного трения. Поэтому в формулу вводят дополнительный коэффициент  $K$ , зависящий от условий деформации. По своей сути, это эмпирический коэффициент, изменяемый в пределах 0,1–1. Для волочения круглых профилей со смазкой можно принимать  $K = 0,125–0,15$ . Окончательно формула примет вид:

$$\Delta\sigma_{\text{вол}} = k\sigma_T \frac{4fl_k}{d}. \quad (6)$$

Получена зависимость для аналитического расчета напряжения волочения через цилиндрическую калибрующую зону волокна.

#### Литература

1. Перлин, И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, И. З. Ерманок. – М. : Металлургия, 1971. – 448 с.
2. Теория и технология волочения : учеб. пособие / Б. Н. Марьин [и др.]. – 2-е изд., доп. – Комсомольск-на-Амуре : КНАГТУ, 2006. – 85 с.
3. Коковихин, Ю. И. Технология сталепроволочного производства : учеб. для вузов / Ю. И. Коковихин. – Киев, 1995. – 608 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАЗМЕРА ЗЕРНА  
МИКРОСТРУКТУРЫ ПРОКАТА ОТ СТЕПЕНИ НАКОПЛЕННОЙ  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ СТАНА 370/150**

**С. А. Савченко**

*Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» –  
управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания»,  
г. Жлобин*

**Д. С. Чубарев**

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Представлены результаты исследования влияния накопленной пластической деформации на микроструктуру бунтового проката из подшипниковой стали. Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм с отбором проб после каждой группы клетей и готового проката. Выполнен анализ размеров зерен и динамики их изменения. Определена математическая зависимость изменения максимальных и минимальных размеров зерен в зависимости от накопленной пластической деформации по дистанции линии катанки стана 370/150.*

**Ключевые слова:** подшипниковая сталь, исходная структура, пластинчатый перлит, накопленная пластическая деформация, перлитная колония.

**Цель работы** – провести анализ изменения микроструктуры раската из непрерывнолитой заготовки шарикоподшипниковой стали ШХ-15 для определения влияния степени обжатия на структурные изменения.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- изучение и анализ микроструктуры непрерывнолитых заготовок;
- изучение и анализ микроструктуры раскатов и готового проката по дистанции прокатки;
- анализ результатов и формулирование выводов.

**Методика исследования:**

1) отбор проб и анализ их микроструктуры: непрерывнолитых заготовок прямоугольного сечения 250 × 300 мм; раската после 1-й промежуточной группы клетей (клеть № 13) Ø 63 мм; раската после 2-й промежуточной группы клетей (клеть № 19) Ø 33 мм; раската после предчистовых клетей (№ 25, 26) Ø 20 мм; готового профиля Ø 6,5 мм и анализ его микроструктуры;

2) сравнительный анализ микроструктуры и определение зависимости ее изменения от степени обжатия.

Объектом исследования в работе является технологический процесс прокатки шарикоподшипниковой (ШХ) стали Ø 6,5 мм в условиях линии катанки мелкосортно-проволочного стана 370/150.

Катанка диаметром 6,5 мм прокатывается в линии катанки из непрерывнолитой заготовки 250 × 300 или 140 × 140 мм согласно универсальной схеме калибровки [1], применяемой для прокатки сортовых и арматурных профилей. С загрузочных решеток НЛЗ нагреваются в методической печи до температуры 1100 °С и прокатываются во всех группах клетей. В конце линии осуществляется двухстадийное охлаждение, позволяющее получить требуемую микроструктуру [2].



Согласно калибровке, для указанного профиля были определены деформационные показатели по контрольным точкам с отбором проб обрезки на ножницах, установленных после указанных выше клетей.

На первом этапе был выполнен анализ микроструктуры образцов непрерывнолитой заготовки  $250 \times 300$  из каждого из четырех ручьев машины непрерывной разливки. Методика и результаты исследования подробно описаны в работах.

Микроструктура образцов блюмов представляет собой крупнозернистую перлитную смесь с выделением цементита II и характерна для литого изделия из заэвтектоидных сталей с содержанием углерода около 1 %. После закалки микрошлифов избыточные карбиды четко выражены на фоне мартенситной матрицы. В разных зонах НЛЗ концентрация избыточных карбидов различна — максимальное количество карбидов сконцентрировано в осевой зоне заготовки в виде как отдельных глобулей, так и грубой сетки по границам зерна литой заготовки [3, 4].

Далее был выполнен анализ микроструктуры раскатов и готового профиля (рис. 1, 2). Определение размера перлитной колонии для бунтового проката диаметром 5,5 мм – 10,5–18,5 мм проводили методом подсчета пересечения границ [5].

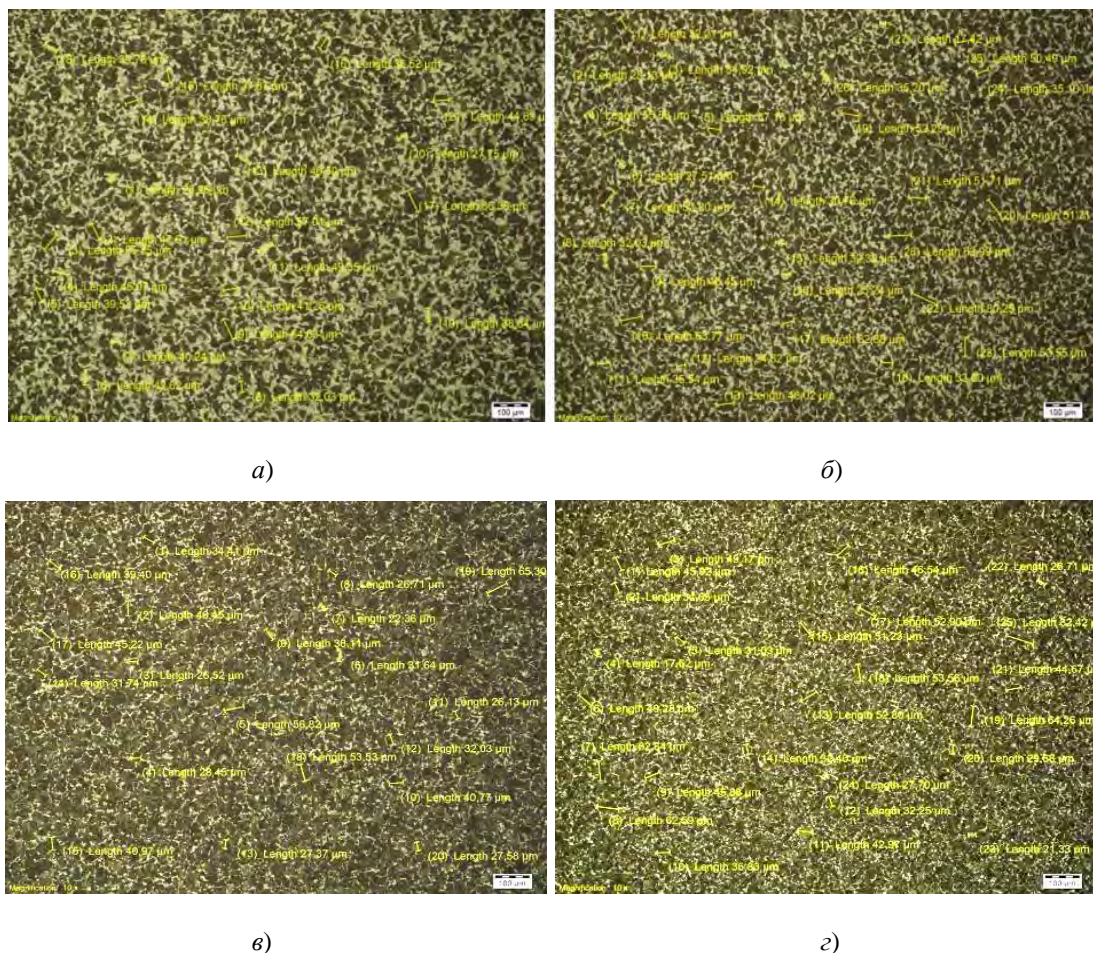


Рис. 1. Микроструктура образцов:  
а –  $\varnothing 123$ ; б –  $\varnothing 62$ ; в –  $\varnothing 33$ ; з –  $\varnothing 20$

Метод состоит в подсчете зерен, пересеченных отрезком прямой, и определении среднего условного диаметра – в случае равноосных зерен или количества зерен в  $1 \text{ мм}^2$  – в случае неравноосных зерен. Подсчет количества пересечений равноосных зерен проводят на двух взаимно перпендикулярных отрезках прямых, проведенных в каждом из пяти мест шлифа (приложение 4 ГОСТ 5639).

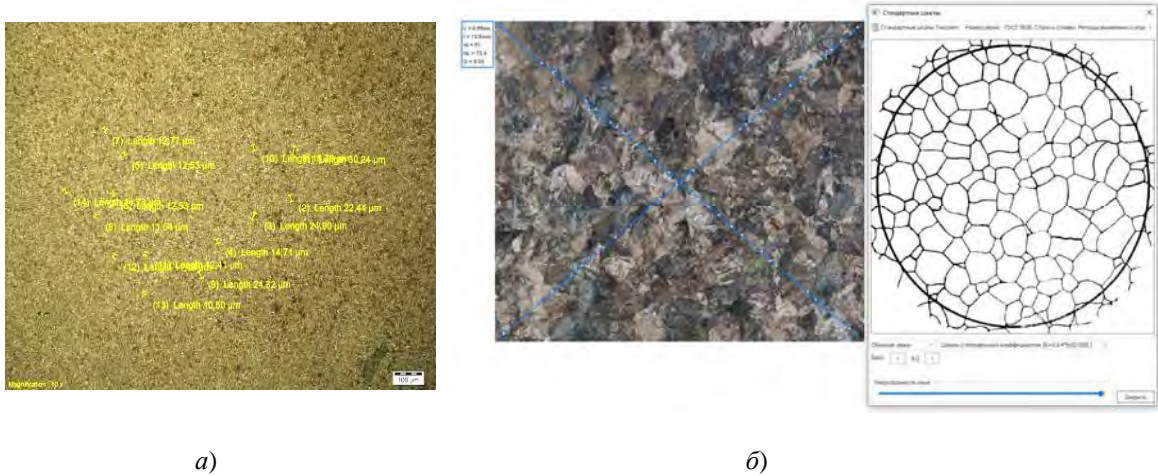


Рис. 2. Анализ микроструктуры:  
 а – готового профиля Ø 6,5 мм; б – перлитных колоний

Результаты анализа микроструктуры раскатов и расчетных параметров представлены в таблице.

**Характеристики раскатов по контрольным точкам**

Сечение заготовки, раскатов и проката, мм	Площадь сечения, $\text{мм}^2$	Вытяжка между контрольными точками $\lambda$	Балл/размер зерна, мкм
250 × 300	75000	0	0
Ø 123	11882	6,3	6/(29–65)
Ø 62	2828	4,2	6–7/(25–55)
Ø 33	831	3,4	7/(19–48)
Ø 20	360	2,3	7/(17–41)
Ø 6,5	34,2	10,5	8–9/(8–22)

По полученным результатам был построен график изменения размеров зерен и обработан инструментами математической статистики в программном пакете Excel (рис. 3).



Рис. 3. График влияния накопленной степени деформации на размер зерна проката:  
 — макс; — мин

Таким образом, установлен фактор и определена степень его влияния на изменение размеров зерен микроструктуры катанки из подшипниковой стали ШХ-15 – суммарная вытяжка при прокатке. С увеличением суммарной вытяжки наблюдается снижение размеров максимальных и минимальных размеров зерен и разницы значений между ними.

#### Результаты исследования:

1) получены новые данные о характере и особенностях влияния на изменение микроструктуру проката обжатий при пластической горячей деформации непрерывнолитых заготовок из ШХ-сталей;

2) определена математическая зависимость изменения размеров зерен в зависимости от степени накопленной пластической деформации.

#### Литература

1. Разработка технологии и освоение производства арматуры № 6 класса прочности А500С формы 2ф в бухтах по требованиям ГОСТ 34028–2016 / С. А. Савченко, С. М. Волосович, А. А. Кучков [и др.] // Литье и металлургия. – 2024. – № 1. – С. 39–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-39-46>
2. Разработка технологии и освоение производства арматуры № 7 класса прочности А400С формы 4ф в бухтах по требованиям ГОСТ 34028–2016 / А. А. Кучков [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2023. – № 4 (95). – С. 70–80.
3. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. инф. – 2021. – № 77 (7). – С. 804–810. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-7-804-810>
4. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / В. С. Путеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 65–73. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-65-73>
5. Особенности формирования мелкодисперсной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С. А. Савченко [и др.] // Черные металлы. – 2024. – № 4. – С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/chm.2024.04.05>



## ОПТИМИЗАЦИЯ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА БУНТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ ШХ15

С. А. Савченко

*Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» –  
управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания»,  
г. Жлобин*

Г. А. Слепнев

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Представлены результаты исследований по усовершенствованию циклического (маятникового) сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15. Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм, прокатанной по усовершенствованному режиму, позволяющему получить исходную мелкодисперсную перлитную структуру с межпластинчатым расстоянием 0,126–0,235 мкм и размером пластин цементита не более 0,8 мкм.*

**Ключевые слова:** подшипниковая сталь, сфероидизирующий отжиг, исходная структура, пластинчатый перлит, маятниковый (циклический) отжиг, время циклических изотермических выдержек, обезуглероженный слой, цементитные пластины и глобули.

Цель работы – усовершенствование режима сфероидизирующего отжига в лабораторной печи и его апробация в поточном производстве в промышленной печи.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- теоретическое обоснование целесообразности работы;
- разработка экспериментальных режимов сфероидизирующего отжига в лабораторной печи Maetherm A-125-1300;
- исследование и анализ микроструктуры, полученных механических свойств.
- апробация результатов исследований в промышленной печи KL-11;
- формулирование выводов и рекомендаций производству.

Поскольку процесс сфероидизирующего отжига является значительно более длительным и энергозатратным в сравнении с другими технологическими этапами производства подшипниковых сталей, возможность сокращения времени такого отжига является актуальным. При заданном размере глобулей карбида железа требует время выдержек, которое напрямую зависит от исходных размеров пластин цементита и межпластинчатого расстояния в перлите бунтового проката до сфероидизации.

В работе представлены результаты исследования влияния длительности временных выдержек при циклическом (маятниковом) сфероидизирующем отжиге бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15 на степень полноты трансформации пластинчатого перлита в зернистый. Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм, прокатанной по усовершенствованному режиму после гомогенизирующего отжига непрерывнолитых заготовок [1, 2], позволяющему получить исходную мелкодисперсную перлитную структуру с межпластинчатым расстоянием 0,126–0,235 мкм и размером пластин цементита не более 0,8 мкм [3, 4].

Для проведения сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковых сталей применяется универсальный режим циклического отжига маятникового типа с двумя циклами нагрев/охлаждение (рис. 1) [5].

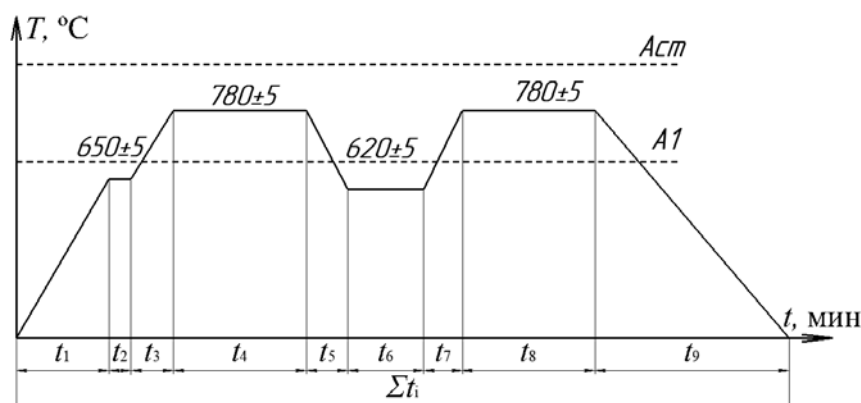


Рис. 1. Схема действующего, утвержденного режима сфероидизирующего отжига маятникового типа для бунтового проката из стали ШХ-15

Эффективные температуры нагрева для отжига – 780–810 °С и охлаждение в области подкритических температур 620–650 °С утвержденного режима представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Параметры стадий нагрев/охлаждение сфероидизирующего отжига по штатному режиму**

Параметры	Интервалы времени $t_i$ (см. рис. 1)								
	$t_1$		$t_3$	$t_5$	$t_7$	$t_9$			
Температура нагрева/охлаждения, °С	20–350	350–450	450–650	650–780	780–620	620–780	780–600	600–450	450–350
Скорость нагрева/охлаждения, °С/час	100	70	60	45	40	50	40	40	Охлаждение с печью

Таблица 2

**Температура стадий выдержки сфероидизирующего отжига по базовому режиму**

Параметры	Интервалы времени $t_i$ (см. рис. 1)			
	$t_2$	$t_4$	$t_6$	$t_8$
Температура выдержки, °С	650	780	620	780

**Методика исследования.** Металлографическое исследование образцов проводилось на катанке диаметром 6,5 мм из стали ШХ15 с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA GMS с энергодисперсионным микроанализатором AztecLive Automated Ultim Max 65. Прокатка и ТО проводились по усовершенствованному режиму в проволочной линии и линии Стелмор мелкосортно-проволочного стана (МСПС) 370/150.

Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм из стали ШХ15 после сфероидизирующего отжига по четырем экспериментальным режимам, к которой предъявлялись следующие требования согласно ГОСТ 801:

– уровень обезуглероженного слоя (далее ОБС) не более 0,25 мм для стали диаметром от 4 до 15 мм;

- микроструктура горячекатаной отожженной стали – не более 4 баллов;
- твердость горячекатаной отожженной стали 179–207 НВ.

Сфероидизирующий отжиг проводился в лабораторной печи Maetherm A-125-1300.

Проведение исследовательской работы было разделено на четыре экспериментальных режима с вариацией длительности интервалов выдержек, представленных в табл. 3. При этом температуры выдержек остались неизменными по отношению к базовому варианту (табл. 3).

Таблица 3

**Параметры стадий выдержки сфероидизирующего отжига по экспериментальным режимам**

Номер экспериментального режима	Параметр	Интервалы времени $t_i$ (см. рис. 1)			
		$t_2$	$t_4$	$t_6$	$t_8$
1	Время интервала, процент от базового	90			
2		75			
3		50			
4		25			

**Результаты исследования и их обсуждение.** Микроструктура после отжига имела зону частично обезуглероженного слоя ОБС (далее – ОБС) с характерными участками: зоной феррито-перлитной структуры, зоной пластинчатого перлита при основной структуре зернистого перлита или зоной зернистого перлита, обедненной карбидами в подповерхностной зоне, что является несоответствием по ОБС (не более 1 % от диаметра). Результаты исследования качественных показателей бунтового проката по ГОСТ 801 представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Качественные показатели бунтового проката по ГОСТ 801 после прокатки по усовершенствованному режиму охлаждения и проведения штатного сфероидизирующего отжига**

Параметры	Номер экспериментального режима			
	1	2	3	4
Уровень обезуглероженного слоя	0,1–0,10	0,1–0,14	0,1–0,10	0,39–0,45
Микроструктура горячекатаной отожженной стали, балл зернистого перлита (ЗП)	2	2	2–3	7–8
Твердость, НВ	183–191	181–190	185–198	202–215

Анализ влияния усовершенствованного режима отжига (формирование сфероидизированного перлита) на микроструктуру проката показал, что режимы № 1–3 обеспечивают полную трансформацию пластин карбида железа в глобули.

После отжига по режиму № 4 эффект формирования структуры зернистого перлита не достигнут.

Результаты исследования:

При апробации результатов исследований проведен сфероидизирующий отжиг бунтов катанки д.6,5 в штатной проходной печи KL-11 по режиму № 2. После отжига получены следующие результаты:

- размер зерен не превысил 2 баллов по всем образцам;
- толщина обезуглероженного слоя – 0,24 мм;
- твердость составила 184–190, что с запасом удовлетворяет требованиям ГОСТ 801.

Внедрение режима сфероидизирующего отжига № 2 позволит снизить затраты при проведении сфероидизирующего отжига на 101 руб./т.

#### Л и т е р а т у р а

1. Астапенко, И. В. Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката / И. В. Астапенко, С. А. Савченко // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 100–102.
2. Савченко, С. А. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / С. А. Савченко, В. И. Возная, И. В. Астапенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – С. 52–61.
3. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2021. – № 77 (7). – С. 804–810. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-7-804-810>
4. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / В. С. Путеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 65–73. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-65-73>
5. Особенности формирования мелкодисперсной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С. А. Савченко [и др.] // Черные металлы. – 2024. – № 4. – С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/chm.2024.04.05>

## РЕЦИКЛИНГ ШЛАКОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н. В. Синенький

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

*Представлены результаты исследований возможностей рециклинга металлосодержащей части шлаков сталеплавильных печей. Установлено, что наиболее перспективной технологией, позволяющей обеспечить комплексную переработку и рециклинг с максимальной эффективностью в условиях нашей страны, является строительство специализированных участков переработки и рециклинга с применением в качестве базового агрегата ротационных печей.*

**Ключевые слова:** шлаки, рециклинг, экология, утилизация, металлосодержащие, моделирование, анализ.

В условиях все возрастающего мирового дефицита на металлические шихтовые материалы и постоянного увеличения их стоимости работы, связанные с утилизацией и рециклингом отходов, имеют не только национальную, но и общемировую актуальность.

В тех странах, где имеется полнопрофильное металлургическое производство, часть железосодержащих отходов перерабатывается в доменных печах и на горно-обогатительных фабриках. У нас в стране нет таких производств. Поэтому данная проблема актуальна для условий Республики Беларусь, металлургическое и литейное производство которой практически полностью зависит от импортируемых материалов. Переработка отходов в местах их образования позволила бы организовать замкнутые безотходные экологичные и рентабельные циклы производства металлоизделий. Однако рост объемов накопления продолжается, создавая не только экономические, но и экологические проблемы.

Цель работы – на основе анализа существующих способов переработки шлаков сталеплавильного производства, включая десульфурацию и дефосфорацию шлаков, оценить свойства и состав шлаков сталеплавильного производства. Для изучения химического состава исследуемых образцов шлака применялись методы атомно-абсорбционного и оптико-эмиссионного анализов, для исследования микроструктуры – металлографический анализ. Изучены основные направления использования составляющей шлаков, содержащей в составе компоненты черных металлов. К полезным действиям шлаков можно отнести их рафинирующее действие для очистки стали от фосфора и серы, которые оказывают негативное воздействие на качество конечной продукции. Шлаки способны защитить металл от окисления газами. Исходя из этого, к шлакам предъявляется ряд требований: шлаки должны обладать высокой рафинирующей способностью и низкой вязкостью, а также практически не оказывать влияния на материалы футеровки печи с точки зрения их совместного химического взаимодействия.

В целом по стране проблема утилизации шлаков решена не полностью: многие конструктивные разработки находятся в стадии решения. Разрабатываются технологии получения из шлаков абразивных материалов; отрабатываются методы сухой и мокрой грануляции жидких сталеплавильных шлаков. Особенно перспективна организация сухой грануляции, при которой одновременно можно решить две задачи: усиливая охрану водного бассейна, получать нагретый воздух.

Основными путями утилизации шлаков сталеплавильного производства являются:

- извлечение металла;
- получение железобитума для вагранок и аглодоменного производства;
- получение щебня для дорожного и промышленного строительства;
- использование основных шлаков в качестве известковых удобрений (шлаковой муки) для сельского хозяйства;
- использование фосфорсодержащих шлаков для получения удобрений для сельского хозяйства;
- вторичное использование конечных сталеплавильных шлаков.

При выплавке стали часть железа теряется со сталеплавильным шлаком, в котором содержание железа (как, например, в электросталеплавильных шлаках) достигает 35 % и более. Чтобы не терять это железо, необходимо извлекать его из текущих шлаков и перерабатывать шлаковые отвалы, тем самым пополняя ресурсы вторичных металлов и одновременно улучшая экологическую обстановку. Возврат в производство металлосоодержащих отходов позволит частично сократить затраты на приобретение шихтовых материалов, а также решить ряд экологических проблем, связанных с сокращением образования и переработкой уже накопленных отходов.

Трудности в переработке металлоотходов, в том числе окисленных и загрязненных, заключаются прежде всего в непригодности существующих традиционных плавильных агрегатов к переплавке таких материалов. Все известные в черной металлургии способы получения железа, которые могут быть использованы для рециклинга дисперсных отходов, предполагают обязательную подготовку сырья (в большинстве случаев его окускование) и восстановителей и рассчитаны на крупнотоннажное производство с объемом переработки не менее 500 тыс. т в год, при этом стоимость подготовки сырья составляет от 40 до 80 % стоимости готового продукта.

Универсальным решением проблемы рециклинга дисперсных металлоотходов, получаемых в процессах переработки шлаков, может служить технология плавки в ротационных наклоняющихся печах (РНП) (рис. 1), которые предназначены только для работы на дисперсной шихте. Исследования показали, что этот тип печей, сравнительно недавно появившийся в литейной практике и, как правило, используемый для плавки цветных сплавов, может быть успешно адаптирован к переработке железосодержащих отходов и плавке чугуна и стали.

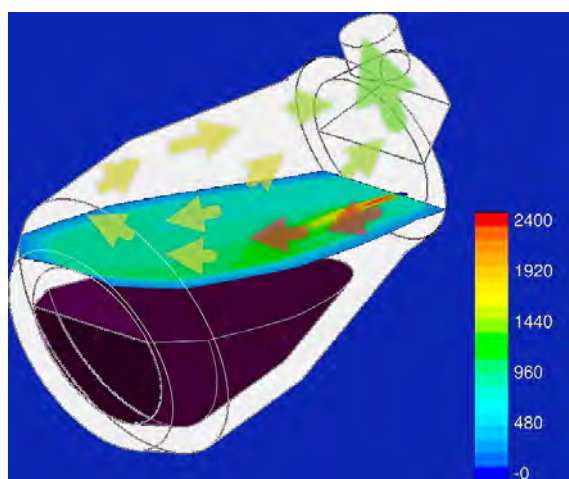


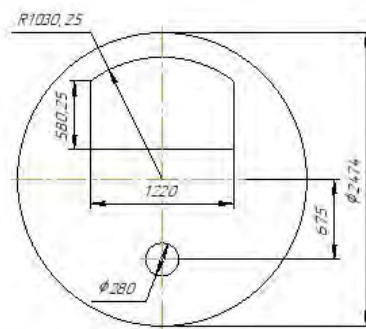
Рис. 1. Траектории движения газовых потоков в объеме рабочего пространства РНП с цветовым кодированием температурных потоков в сечении

Металлоотходы процессов рециклинга шлаков представляют собой весьма разнородные материалы как по составу, так и по уровню загрязненности. Наибольшие трудности при переработке представляют оксидные железосодержащие отходы типа ржавчины, окалины и т. п. На базе РНП, как показали результаты исследований, может быть реализован малотоннажный, эффективный, не требующий значительных инвестиций, рециклинг дисперсных железосодержащих отходов без их предварительной обработки и подготовки, отличающийся высокой интенсивностью, гибкостью, высокой удельной производительностью, обеспечивающий в одном агрегате плаку, полное восстановление и доводку расплавов с получением высококачественных шихтовых материалов и даже марочных литейных сплавов.

В качестве восстановителей в этом процессе могут также использоваться отходы углеродосодержащих материалов и недорогое местное сырье (торф, лигнин). В качестве топлива – природный газ, жидкое топливо. В качестве присадок – отходы цветных металлов (например, алюминия), в качестве флюсов – известняк и доломит, а также сортированные шлаковые отходы (основные шлаки) металлургии.

Моделирование можно разбить на два этапа: на первом этапе определялось расположение гоелки, для этих целей использовался ППП SolidWorks FlowSimulation.

На втором этапе моделировался процесс горения и движения газового потока в ротационной печи. Наиболее рациональным при заданном направлении вращения печи является расположение газо-воздушной горелки внизу слева, т. е. со стороны, где слой материала минимален. При этом пламя практически не испытывает никакого сопротивления со стороны материала, обеспечивается максимальная настильность пламени, поток по дуге омывает всю поверхность материала, максимально передавая тепло и проникая глубоко в слой между его частицами.



Параметры моделирования

$$F_{\text{сеч.гор}} = 0,06 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{сеч.дымосос}} = 0,87 \text{ м}^2$$

$$\text{Расход топлива} - 750 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$T_{\text{вх}} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$$

*Траектории движения и скорости потоков*

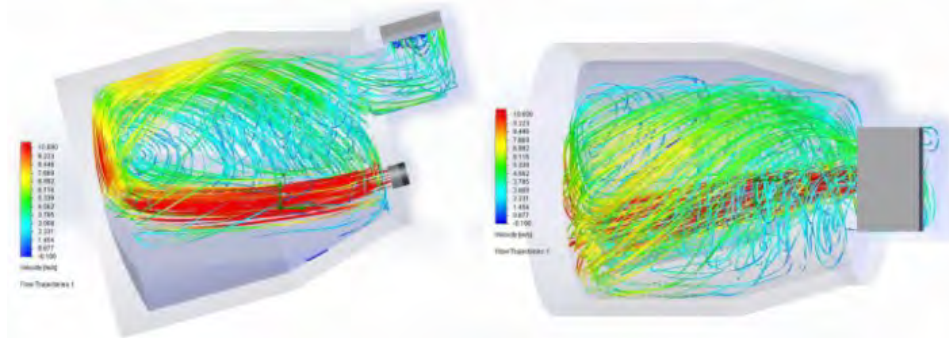


Рис. 2. Усовершенствованная параметрическая модель для газодинамического анализа и результаты моделирования в виде траекторий движения частиц газового потока

В масштабах Беларуси переработка только вновь образующихся железосодержащих отходов позволит ежегодно возвращать в производство до 150–200 тыс. т чугуна и стали.

#### Литература

1. Worldsteel Association Steel Statistical Yearbook 2011. – Brussels : Worldsteel Committee on Economic Studies, 2011. – 120 p.
2. Алямовский, А. А. A60 SOLIDWORKS Simulation и FloEFD. Практика, методология, идеология / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2020. – 658 с.
3. Шмитц, К. Роторно-поворотная барабанная печь: современная технология в производстве вторичного алюминия / К. Шмитц. – Нидерцир, 2009. – 12 с.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ОВАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В ГЛАДКИХ БОЧКАХ

В. В. Кухаренко

*Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» –  
управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания»,  
г. Жлобин*

А. Ю. Вальковский

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Представлены результаты исследования пластической деформации овальной полосы из рессорной стали при прокатке в гладких бочках моделированием по методу конечных элементов. Определена зависимость уширения овальной полосы при прокатке в валках с гладкой бочкой.*

**Ключевые слова:** рессорная сталь, калибровка, моделирование, метод конечных элементов, уширение, пластическая деформация.

Цель работы – разработать калибровку валков для прокатки полосы  $90 \times 24$  из рессорной стали 50ХГФАв линии сорта стана 370/150 (рис. 1).

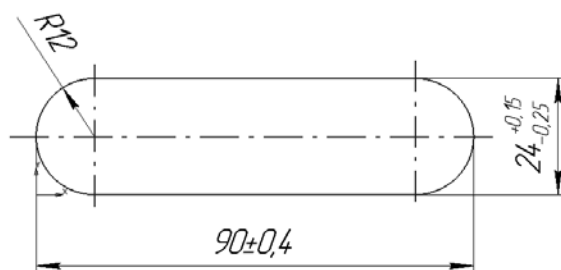


Рис. 1. Форма и геометрия полосовой рессорной стали в соответствии с ГОСТ 7419

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- определение и анализ деформационно-кинематических и энергосиловых параметров прокатки овальной полосы из клетки № 14 в гладких бочках клетки № 16;
- моделирование по МКЭ прокатки овальной полосы в гладких бочках клетки № 16 линии сорта стана 370/150;
- анализ результатов и формулирование выводов.

Объектом исследования в работе является технологический процесс прокатки полосовой рессорной стали.

В настоящее время осуществляется разработка технологии и освоение производства рессорной полосовой стали в соответствии с ГОСТ 14959 и ГОСТ 7419. В сортаменте прокатного производства полосовой прокат не производится. Поэтому при разработке технологии необходимо было решать задачи, характерные для прокатки плоских полос.

Характерными проблемами гладкой прокатки овальной полосы являются:

- определение уширения полосы при прокатке в гладких бочках;



- определение скоростного режима;
- определение энергосиловых параметров.

В условиях ОАО «Белорусский металлургический завод» прокатка на гладких бочках осуществляется на стане 320 при производстве арматурных профилей по «слиттинг-процессу» [1]. Учитывая этот опыт, была разработана калибровка для линии сорта с универсальными калибрами до овала клетки № 14 [2] и дальнейшей прокаткой на гладких бочках в клетях № 16, 18, 20. В чистовом блоке HRSM (клетки № 22–24) прокатка осуществлялась по схеме «плоская бочка – контрольный калибр – плоская бочка». Построение контрольного калибра клетки № 23 для контроля ширины выполняли по опыту «слиттинг-процесса» с учетом боковых радиусов [3].

Поскольку пластическая деформация происходит по схеме «прокатка высокой полосы», аналитический расчет уширения по известным формулам дает высокую погрешность [4]. Для определения уширения в клетке № 16 при прокатке «плоская полоса в гладких бочках» была построена модель и выполнены численные эксперименты по методу конечных элементов.

Исходные данные параметров для моделирования технологического процесса представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные данные численного эксперимента  
процесса прокатки в клетях № 16**

Технологические параметры	Клеть № 14	Клеть № 16
Диаметр валков $D_v$ , мм	450	450
Ширина полосы в калибре $B$ , мм	80,3	86,3
Относительное обжатие полосы $\varepsilon_n$ , %	21,3	3,7
Скорость прокатки $v$ , м/с	1,99	2,06
Частота вращения валков $n$ , об/мин	87,4	87,4

Проектная геометрия раската в клетях № 14 и 16 представлена на рис. 2.

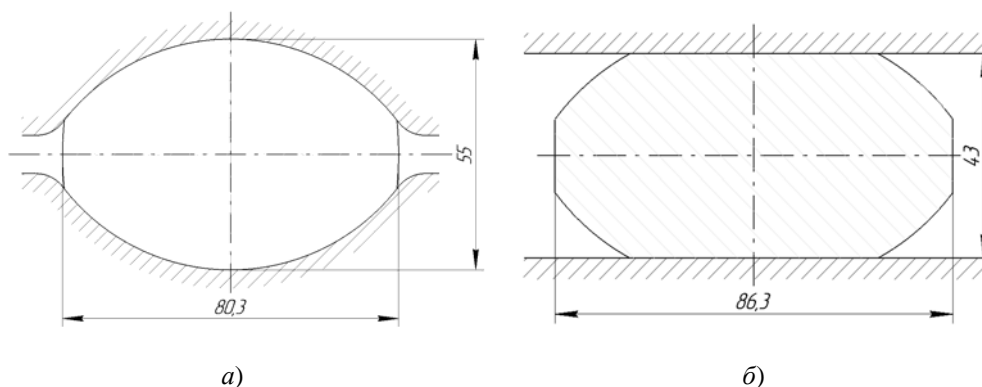


Рис. 2. Проектная геометрия раската:  
а – клеть № 14; б – клеть № 16

По результатам численного эксперимента были получены данные по уширению плоской полосы в клетке № 16 в зависимости от величины обжатия (табл. 2).

## Энергосиловые и скоростные параметры процесса прокатки в клетях № 16

Обжатие $\Delta h$ , мм	4,0	8,0	12,0	14,0	18,0
Уширение $\Delta b$ , мм	1,2	2,75	6,0	10,2	16,2

После проведения числительных экспериментов была выполнена обработка их результатов инструментами математической статистики в программном пакете EXEL. Определена математическая зависимость уширения овальной полосы  $80,3 \times 55$  при прокатке в гладких бочках с диапазоном обжатий  $\Delta h = 4\text{--}18$  мм (рис. 3).

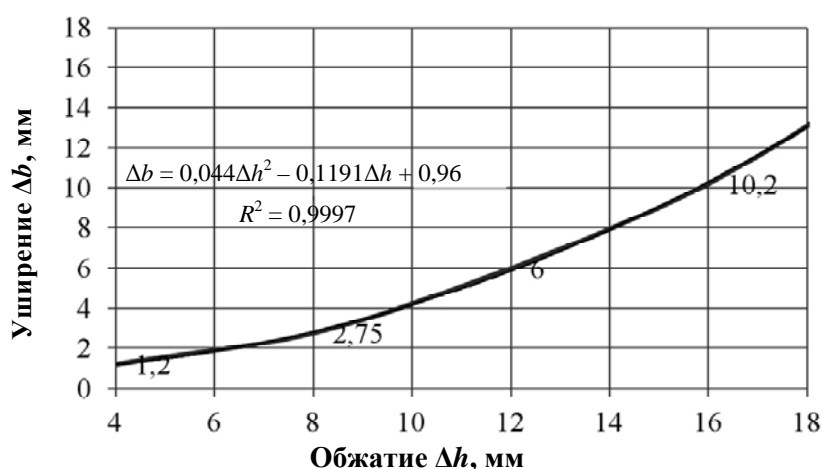


Рис. 3. Зависимость уширения полосы в клети № 16 от степени обжатия

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) изучен и выполнен анализ особенностей уширения овальной полосы в гладких бочках путем численного моделирования по методу конечных элементов;
- 2) определена математическая зависимость изменения ширины полосы в клети № 16 в зависимости от степени обжатия.

## Литература

1. Барановский, Д. С. Конструктивные решения контроля ширины полосы для горячей прокатки по «слиттинг-процессу» / Д. С. Барановский // Беларусь в современном мире : материалы XIV Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 13–14 мая 2021 г. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 250–253.
2. Разработка технологии и освоение производства арматуры № 6 класса прочности А500С формы 2ф в бухтах по требованиям ГОСТ 34028–2016 / С. А. Савченко [и др.] // Литье и металлургия. – 2024. – № 1. – С. 39–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-39-46>
3. Барановский, Д. С. Совершенствование прокатки по «слиттинг-процессу» в контрольном калибре стана 320 ОАО «БМЗ» / Д. С. Барановский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 2 ч. Ч. 1, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 93–97.
4. Астапенко, И. В. Особенности горячей прокатки высоких полос в ящичном калибре / И. В. Астапенко, Д. М. Васильков // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 114–117.

## СЕКЦИЯ III ЭНЕРГЕТИКА

---

### ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПРИ АНАЛИЗЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, СВЯЗАННОГО С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В. В. Шунулина, Д. Н. Козлова, Т. В. Аветисян

*Колледж Воронежского института высоких технологий, Россия*

*Воронежский институт высоких технологий, Россия*

Научный руководитель А. П. Преображенский

*Рассмотрена задача, связанная с оценкой экологических рисков при использовании источников энергии. При формировании методического подхода была рассмотрена: матрица уязвимостей региона, матрица источников энергии, представляющих опасности, матрица управления. На основе каждой из матриц была дана оценка соответствующего риска.*

**Ключевые слова:** источник энергии, матричный подход, риск, экология, оценка ущерба.

В настоящее время можно наблюдать активное использование природной среды людьми. Ее рассматривают как богатейший источник различных ресурсов. Но при этом можно наблюдать и обратные, негативные процессы, которые обусловлены воздействием людей на окружающую среду. В ходе своего применения ресурсы могут быть подвержены видоизменениям – они возвращаются назад в окружающую среду. В ряде случаев после переработки они могут становиться весьма опасными и вредными. Тогда в первую очередь необходимо стремиться к совершенствованию условий жизни людей [1]. Но при этом необходимо обеспечивать условия для того, чтобы было обеспечено безопасное существование.

Для своей жизнедеятельности люди используют разные энергетические источники [2, 3]. С одной стороны, они участвуют в перераспределении и переработке ресурсов, а с другой – оказывают воздействие на окружающую среду.

В данной работе рассматривается подход, который может быть использован различными организациями при оценке состояния окружающей среды при наличии энергетических источников.

В основе рассматриваемой методологии лежит матричный подход. В нем необходимо применять несколько матриц: матрицу уязвимостей, матрицу опасностей энергетических источников и матрицу управлений. Тогда можно осуществлять объединение всех анализируемых данных, чтобы были оценены риски. В матрице уязвимостей связи соединяют компоненты живой среды и уязвимости. Матрица опасностей энергетических источников (табл. 1) показывает связи, сопоставляющие уязвимости и опасности энергетических источников. И, наконец, матрица управлений (табл. 2) показывает связи между опасностями энергетических источников и управлениями. Для каждой ячейки в таблице можно сопоставить численное значение, которое демонстрирует, насколько сильно связаны элементы строк и столбцов (например, опасностями энергетических источников и уязвимостью). Могут быть назначены три уровня связи: низкий, средний и высокий. Сначала генерируются списки опасностей энергетических источников, уязвимых компонентов и управлений.

Потом они добавляются в оценочную таблицу. После этого может быть сделана оценка риска. Будем исходить из того, что есть  $n$  составляющих, при этом для относительной стоимости вклада составляющей  $a_j$  имеем  $C_j (j = 1, \dots, n)$ . Помимо этого, полагаем, что  $c_{ij}$  является вкладом уязвимости  $v_i$  в составляющую  $a_j$ . В итоге, для общего вклада уязвимости  $v_i$  по соответствующим составляющим имеем следующее:

$$V_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} * C_j. \quad (1)$$

Полагаем, что существует  $p$  опасностей, которые имеют связи с  $n$  уязвимостями. При этом  $d_{ki}$  рассматривается в виде потенциального вреда от опасности  $t_k$  в уязвимость  $v_i$ . Затем определяется общий вклад опасности для энергетических источников  $T_k$ . Это проводится таким образом:

$$T_k = \sum_{i=1}^m d_{ki} \cdot V_i. \quad (2)$$

Будем исходить из того, что существует  $q$  управлений, которые связаны с  $p$  – опасностями для энергетических источников, причем  $e_{lk}$  определяет влияние управления  $z_o$  на опасность  $t_k$ . В итоге для общего суммарного эффекта управления  $z_o$  получаем:

$$z_o = \sum_{l=1}^p e_{ol} \cdot T_l. \quad (3)$$

Когда изучаются риски важно иметь в виду, что внутри окружающей среды могут протекать различные разнородные процессы, и их может быть довольно много. Проводилась агрегация данных в первой матрице и они были отсортированы, таким образом, чтобы была определена относительная важность уязвимостей. Например, в водных ресурсах может идти накопление большого множества вредных факторов. Вода требуется при поддержке жизнедеятельности организмов. Поэтому значение степени значимости по данному ресурсу уязвимости будет максимальным. Агрегированная матрица уязвимостей добавляется в матрицу источников энергии, представляющих опасности. Эта матрица опасностей энергетических источников основывается на матрице уязвимостей. В табл. 2 отмечено то, каким образом задается матрица управления. По ней агрегируются данные опасностей энергетических источников, и идет добавление соответствующих управлений. При оценке значимости мы использовали шкалу: 0 – вклад не наблюдается, 1 – вклад является слабым, 3 – вклад является средним, 9 – вклад является сильным. Ранжирование по приоритетам проводилось так: 1 и 2 – малозначимые; 3 – важный, но не определяющий, 4 – является определяющим.

Таблица 1

## Иллюстрация матрицы опасностей энергетических источников

Показатели	Уязвимые компоненты в регионе приоритет	Водные ресурсы	Воздушная среда	Почвенные ресурсы	Лесные ресурсы	Степень значимости	Риск
Источники энергии, представляющие опасности	приоритет	4	3	2	1		
Ветряные источники	6	1	9	1	3	36	0,114
Гидроисточники	5	9	3	9	1	64	0,208
Солнечные источники	4	3	9	1	1	42	0,133
Газовые источники	3	3	9	3	3	48	0,152
Источники на угле	2	3	9	9	3	60	0,189
Атомные источники	1	9	3	9	3	66	0,209

Определение относительного вклада для различных управлений относительно опасностей энергетических источников может быть сделано при помощи соответствующей оценки. Можно провести агрегацию данных, чтобы был определен список приоритетных управлений. Такую информацию, а также проранжированные управления можно рассматривать, когда планируются действия, связанные с улучшением экологической обстановки внутри определенных регионов при размещении различных источников энергии.

Таблица 2

## Иллюстрация матрицы уязвимостей по определенному региону

Показатели	Источники энергии, представляющие опасности приоритет	Ветряные источники	Гидроисточники	Солнечные источники	Газовые источники	Источники на угле	Атомные источники	Степень значимости	Риск
Управления		6	5	4	3	2	1		
Осуществление специальных мероприятий связанных с очисткой окружающей среды	4	3	3	3	9	9	9	99	0,243
Проведение подготовки специалистов	3	9	9	9	9	9	9	89	0,463

Окончание табл. 2

	Источники энергии, представляющие опасности приоритет	Ветряные источники	Гидроисточники	Солнечные источники	Газовые источники	Источники на угле	Атомные источники	Степень значимости	Риск
Ведение политики мониторинга	2	3	3	3	9	3	9	87	0,213
Возможности осуществления вторичных переработок ресурсов	1	1	1	3	3	3	3	33	0,081

В данной работе был разработан методический подход, в рамках которого могут быть оценены риски использования различных источников энергии в регионах. Исходя из того, что опасности энергетических источников, уязвимые компоненты и другие параметры подвержены изменениям в зависимости от регионов, представленный подход можно уточнить.

#### Литература

1. Бережная, Е. В. Оценка риска для здоровья населения г. Воронежа при воздействии химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух / Е. В. Бережная // Моделирование, оптимизация и информ. технологии. – 2013. – № 1 (1). – С. 2.
2. Клименко, Ю. А. О системном анализе энергетического предприятия // Вестн. Воронеж. ин-та высоких технологий. – 2022. – № 1 (40). – С. 122–124.
3. Клименко, Ю. А., Преображенский А. П. Анализ некоторых методов управления энергетическими системами / Ю. А. Клименко, А. П. Преображенский // Вестн. Воронеж. ин-та высоких технологий. – 2021. – № 1 (36). – С. 100–102.

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСОБРАЗНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА «ЗЕЛЕНОГО» ВОДОРОДА

А. С. Какабаев

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Научный руководитель А. Я. Джумаев

*Представлен разработанный типовой проект солнечно-водородной системы энергоснабжения для использования в изолированных районах, в частности для населенных пунктов в регионах Туркменистана, а также приведена оценка экономической целесообразности производства «зеленого» водорода.*

**Ключевые слова:** солнечно-водородная система, система энергоснабжения, фотоэлектрическая солнечная станция, удельная выработка фотоэлектрической солнечной станции, электролизер.

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для производства водорода является глобальной тенденцией развития мировой энергетики. Развитие

водородной энергетики становится неотъемлемой частью общего развития топливно-энергетического комплекса каждой экономически и промышленно развитой страны. Возможности и экономическая целесообразность применения тех или иных видов ВИЭ в конкретной стране, регионе, местности определяются их природными (климатическими, географическими, геологическими) и социально-экономическими факторами. Туркменистан, используя свои богатые солнечные ресурсы и запасы природного газа, полон решимости сыграть важную роль в формировании устойчивого и экологически чистого энергетического будущего [1].

Для строительства фотоэлектрической солнечной станции (ФСС) мощностью 1500 кВт в селе Бори Гокдепинского этрапа Ахалского веляята (количество домов 238) были выбраны следующие компоненты системы для базового блока: фотоэлектрические солнечные модули типа SPR-415-WHT-D от производителя Sunpower (выбраны из базы данных PVsyst), центральным трехфазный инвертор Bosch BPT-C300 из производства Bosch Power Tec (выбран из базы данных PVsyst). Результаты расчетов параметров основного базового блока ФСС мощностью 300 кВт показали, что он обладает характеристиками, которые представлены в табл. 1. Основные технические параметры ФСС мощностью 1500 кВт приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Основные характеристики основного базового блока фотоэлектрической солнечной станции**

Мощность ФСС	300 кВт
Мощность фотоэлектрического модуля	415 Вт
Количество фотоэлектрических модулей	720
Количество фотоэлектрических модулей соединенных последовательно в ряду	10
Количество рядов	72
Площадь фотоэлектрических модулей	1557 м <sup>2</sup>
Количество инверторов	1

Таблица 2

**Основные характеристики фотоэлектрической солнечной станции**

1	Мощность ФСС (фотоэлектрической солнечной станции)	1500 кВт
2	Количество основных базовых блоков	5
3	Мощность основного базового блока ФСС	300 кВт
4	Мощность фотоэлектрического модуля	415 Вт
5	Количество фотоэлектрических модулей	3600
6	Количество фотоэлектрических модулей соединенных последовательно в ряду	10
7	Количество рядов	360
8	Площадь фотоэлектрических модулей	7785 м <sup>2</sup>
9	Количество инверторов	5

Более точно оценить капитальные вложения в солнечно-водородную электростанцию в селе Бори можно только при наличии более детальной информации, такой как стоимость оборудования, заявленная поставщиком, и строительные материалы, стоимость проектирования объекта и строительно-монтажных работ, земельные расходы, расходы на налоги и разрешительные документы и др. Однако можно предоставить общий план расходов, куда входит стоимость солнечных панелей; инверторов; оборудования для электролиза и хранения водорода; оборудования для производства вторичной электроэнергии; инженерных систем (линии электропередачи, внутренние кабельные сети, водородопроводы, теплотрасса, водоснабжение, канализация, ливневая система); Земельные и строительные расходы включают в себя расходы на приобретение земли, строительство и монтаж пилотного проекта, капитальные вложения в инфраструктуру и т. д. Капитальные вложения в инженерные сети могут сильно различаться в зависимости от местоположения объекта.

Это необходимые вложения для разработки и подготовки всего проекта (разработка обоснования инвестирования, разработка проектно-сметной документации). Различные сборы и налоги могут быть обязательными для таких проектов. Важно иметь резервный фонд на случай неожиданных расходов и задержек в проекте. Операционные расходы включают оплату персонала, обслуживание оборудования, обновление и ремонт. Необходимо также учесть, что цены на солнечные панели и оборудование для водородной электролиза меняются со временем. Для точной оценки капитальных вложений следует обратиться Поставщикам оборудования и материалов, к специалистам в сфере солнечной энергетики и водородных технологий, а также учесть местные условия и требования.

Важно отметить, что для солнечных условий села Бори число часов использования установленной мощности будет значительно выше, и это повлияет на показатель объема производства (выработки) электроэнергии. В соответствии с методическими положениями по проведению обоснования эффективности реализации инвестиционных проектов основным критерием для принятия решения о финансировании проекта является сокращение затрат или увеличение выручки, что приводит к увеличению прибыли инвестора. Ниже приведем расчет капитальных затрат на реализацию проекта солнечно-водородной станции для села Бори с фотоэлектрической станцией мощностью 1,5 МВт (табл. 3). Поскольку инвестиции представляют долгосрочное вложение экономических ресурсов с целью создания и получения чистых выгод в будущем, для оценки инвестиций необходимо все требуемые вложения и отдачу по проектам оценить с учетом временной ценности денег, т. е. с учетом того обстоятельства, что сумма денег, находящаяся в распоряжении в настоящее время, обладает большей ценностью, чем такая же сумма в будущем. Поэтому при оценке эффективности вариантов целесообразно использовать концепцию дисконтирования потока реальных денег. Срок окупаемости служит для определения степени рисков реализации проекта и ликвидности инвестиций. Все названные расчеты рекомендуется провести на стадии разработки предварительного технико-экономического обоснования и уточнить на стадии разработки обоснования инвестиций.



Таблица 3

**Капитальные затраты на реализацию проекта солнечно-водородной станции для села Бори**

Наименование комплекса работ, услуг, оборудования		Затраты, евро
1	ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ	97500
2	ОСНОВНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, в том числе:	1696700
	солнечные панели (3600 шт.)	738000
	инвертор (5 шт.)	77700
	стол с креплением (288 шт.)	216000
	оборудование АСУ ТП, связи и сигнализации	92500
	электролизер (мощность 1 МВт)	400000
	микро турбины (2G генераторы, 115 кВт)	172500
3	СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫЕ РАБОТЫ, в том числе	524700
	Подготовка территории строительства	10700
	Фундаменты	56000
	Сети электроснабжения	84000
	Монтаж оборудования	374000
4	ПУСКО-НАЛАДОЧНЫЕ РАБОТЫ	42000
5	ВРЕМЕННЫЕ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	18000
7	СТРАХОВАНИЕ	15000
8	НЕПРЕДВИДЕННЫЕ ЗАТРАТЫ	45000
	<i>Итого</i>	2438900
	Установленная мощность, кВт	1500
	Удельные капиталовложения, евро/кВт	1626

## Л и т е р а т у р а

1. “Türkmenistanyň wodorod energiýasy babatda halkara hyzmatdaşlygy ösdürmek boýunça 2022-2023-nji ýyllar üçin ÝOL KARTASY”. Türkmenistanyň Prezidentiniň 2022-nji ýulyň 28-nji ýanwarynda çykaran 2581-nji Karary bilen tassyklanyldy.
2. PVsyst Contextual Help (Built in Software). – Режим доступа: URL:<https://files.pvsyst.com/help/>.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КООРДИНАТНОГО ДВИЖЕНИЯ  
МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**М. Б. Агаджанова**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Научный руководитель О. Н. Абдыкадырова

*Рассмотрено снижение динамической нагрузки и реализация согласованной работы движения опоры механизма с движением козлового крана с помощью специально разработанной системы управления взаимосвязанного электропривода.*

**Ключевые слова:** синхронные двигатели, мостовой кран, электропривод.

Для широкого использования электромобильности в промышленности условия работы различных типов рабочих механизмов, нескольких групп их классификации и режимы их работы зависят от определенных величин. В работе механизмов существуют особые группы, которые часто появляются при больших динамических нагрузках. Такие группы появляются в первых высокоподъемных транспортных механизмах на оборудованных промышленных предприятиях: мостовых кранах, перегружателях, конвейерах, и т. д. В этих механизмах краны мостового типа работают в более тяжелых условиях и интенсивных режимах работы. Основным недостатком динамических погрузочных оборудований в условиях этих механизмов, в интенсивном повторяюще-краткосрочном режиме работы, а также в сложных условиях производственных работ механическая неустойчивая (колеблющаяся) система рукава и наличие механического соединения рукава; со временем работой, приводит к тому, что данная система управления не идеальна.

Результаты многих исследований доказали, что частота механической вибрации катушки, возникающая при высоких нагрузках, обуславливает отрицательную характеристику в работе электродвижущей силы. В результате появляется большой динамический эффект, влияющий на точность работы механизма, возникновения механической вибрации и опасного резонанса. Поэтому возникновение более высокого уровня динамической нагрузки, особенно при трогании с места, реверсе и торможении, приводит к преждевременной поломке элементов механизма крана и конструкций над краном.

Козловой кран и мостовой кран однотипны, в этом случае мост опирается на подкрановый путь посредством двух стоек. Тип крана представляет собой привод, электрооборудование и кабину управления. Мостовой кран широко используется для технического обслуживания и эксплуатации. Но при этом необходимо учитывать общность реализации нескольких конструкций, уникальность крана и его стоимость.

Работа механизмов осуществляется козловым краном с несколькими электродвигателями. Их количество в ЭДС обеспечивает горизонтальное (горизонтальное) перемещение самого крана, приводятся в движение. Горизонтальное перемещение механизмов осуществляется мостовым краном только отдельными конвейерами. Основным требованием к механизму является наличие связанной скользящей опоры крана козлового, равной скорости вращения ЭДС.

В статье поставлена цель снизить динамическую нагрузку с помощью специально разработанной системы управления двухмоторной электродвигательной установкой и реализовать согласованную работу движения опоры механизма с движением крана Козлового.

На рис. 1 представлена разработанная в программе Matlab модель асинхронного электродвигателя с синхронно вращающимися двумя двигателями.

На этом рисунке установлена обработанная модель двух параллельно работающих асинхронных двигателей (M1, M2) с укороченным ротором мощностью 7,5 кВт. Двигатели M1 и M2, питаемые от одного источника напряжения ( $U = 400$  В,  $f = 50$  Г), приводятся в действие двумя отдельными преобразователями частоты.

Выходные данные модели приведены на рис. 2. Здесь показаны переходные процессы электромагнитного момента и осциллограммы частот вращения в двухдвигательном асинхронном электроприводе.

Нагрузочный момент на валу привода варьируется ( $M_{c1} = 38,16$  Нм,  $M_{c2} = 57,24 \cdot$  Нм). В течение 1,25 с момент скорости, ускоряющий движение, нарушает это условие. После начала установившегося режима скорости  $W_1$  и  $W_2$  равны.

Затем при  $t = 2,5$  с происходит внезапное изменение нагрузки, то есть крутящий момент на первом двигателе  $M_1$  внезапно увеличивается ( $M_{c2} = 57,24 \cdot \text{Нм}$ ), а на втором двигателе  $M_2$  внезапно уменьшается ( $M_{c1} = 38,16 \text{ Нм}$ ).

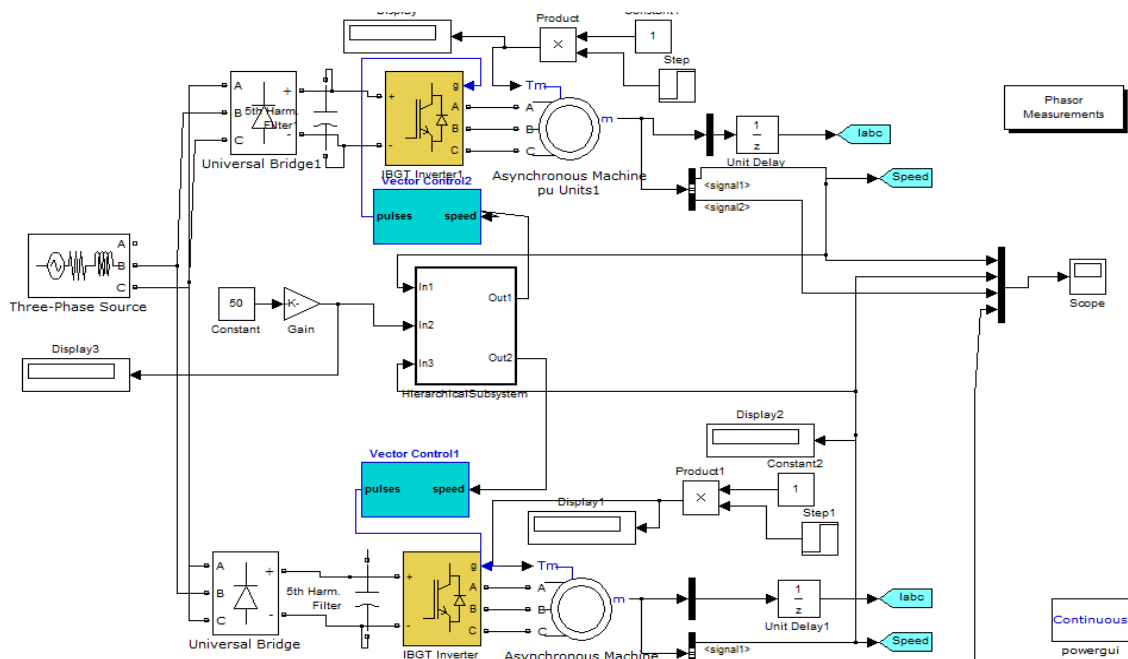


Рис. 1. Модель асинхронного электродвигателя с двумя двигателям в программе MatLab

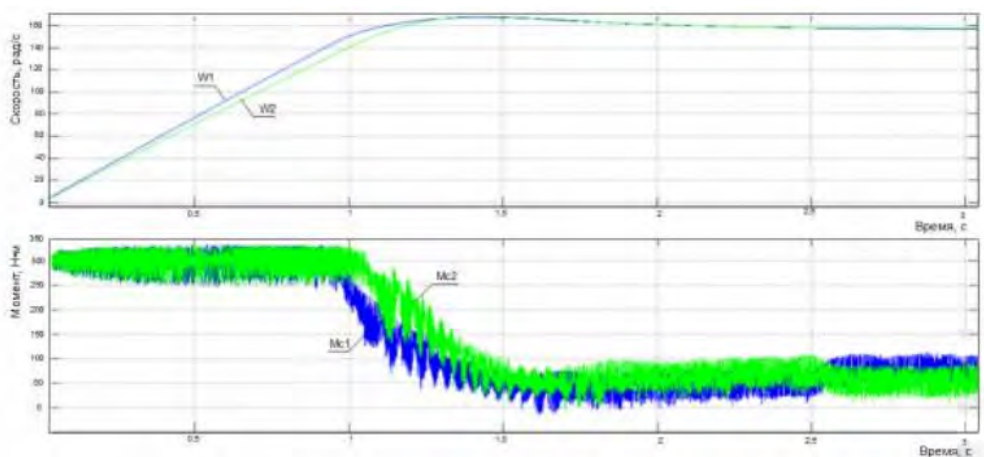


Рис. 2. Электромагнитный момент в двухфазном электродвигателе (осциллограммы переходных процессов и скорости нарастания)

Как видно из графика полученного переходного процесса, при разных значениях нагрузки вал двигателя  $M_1$ ,  $M_2$  производит когерентный цикл в двухдвигательной асинхронной системе. Это осуществляется с помощью преобразователя частоты.

При этом переменные значения амплитуд обеспечивают полное управление асинхронным двигателем за счет регулировки угла между их векторами. Как в статике, так и в динамике, переход повышает качество процесса.

#### Литература

1. Герасимьяк, Р. П. Электроприводы крановых механизмов / Р. П. Герасимьяк, В. А. Параил – М. : Энергия, 1970. – 136 с.
2. Герман–Галкин, С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман–Галкин. – СПб. : Корона Век, 2008. – 368 с.
3. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода : учеб. пособие / Н. Ф. Ильинский – М. : МЭИ, 2003. – 224 с.

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ОБЪЕДИНЕНИЯ МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫХ И МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Б. Байрамов

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Научный руководитель Б. М. Бабаев

*Исследованы мероприятия, направленные на повышение надежности электро-энергетических систем на современном этапе. Рассмотрены возможности интеграции межгосударственной и межрегиональной электроэнергетики. Проанализированы технические разработки в области компенсации реактивной энергии.*

**Ключевые слова:** надежность; межрегиональные, межгосударственные энергообъединения, межгосударственные электрические связи, мощность, компенсация реактивной мощности.

Постоянное развитие структуры и условий функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) требует существенного трансформирования схем и режимов их работ. Эти трансформации обусловлены рядом объективных факторов, которые определяют облик ЭЭС будущего. Находящееся в данный момент в работе электрооборудование энергосистемы и приемников электрической энергии, объединенное общим режимом и рассматриваемое как единое целое в отношении протекающих в нем физических процессов, называется электроэнергетической системой. До 90-х гг. прошлого века ЭЭС стран Средней Азии и Казахстана с помощью межгосударственных линий были объединены в общую систему. Но с развалом СССР страны начали строить раздельную электроэнергетическую политику.

В Туркменистане до развала союза электрическая энергия вырабатывалась в тепловых электростанциях суммарной мощностью 2160 МВт. Электроэнергетика – одна из динамично развивающихся, экспортно ориентированных отраслей экономики Туркменистана. За годы независимости в стране было построено 10 газотурбинных электростанций, самая мощная в регионе – комбинированная электростанция мощностью 1574 МВт. На данный момент установленная мощность электрических станций – 6943.2 МВт, а потребление – 4363 МВт. Строится еще одна комбинированная электростанция мощностью 1574 МВт и планируется перевод газотурбинных электростанций в комбинированный режим. По данным Всемирного банка, доступ населения Туркменистана к электричеству составляет 100 %. Помимо надежного и бесперебойного обеспечения внутренних потребителей по стабильно невысоким ценам, генерируемая в Туркменистане электроэнергия экспортируется в соседние по регио-

ну страны – Исламскую Республику Иран Афганистан, Узбекистан, а также в Кыргызскую Республику. В обзоре энергетического сектора Узбекистана отмечается, что импорт электроэнергии из Туркменистана на 64 % компенсировал нехватку электроэнергии в этой стране в 2021 г. «Программой Президента Туркменистана по социально – экономическому развитию страны на 2022–2028 гг.» к 2028 г. планируется довести общий объем производства электроэнергии до 37,5 млрд кВт/ч и увеличить его объем на 22,5 % по сравнению с 2023 г. В конечном счете, все это приведет к увеличению экспортных возможностей страны.

**Сотрудничество электроэнергетических систем.** Продолжаются увеличение масштабов ЭЭС, расширение обслуживаемых ими территорий, объединение для совместной работы различных ЭЭС с формированием межгосударственных и межрегиональных энергообъединений.

В свое время энергосистемы республик Центральной Азии были спроектированы с учетом необходимости использования преимуществ имеющихся топливно-энергетических ресурсов и сезонных взаимобменом электроэнергии между странами. В региональной системе, построенной с использованием электрических сетей 220–500 кВ, тепловые электростанции Казахстана, Узбекистана и Туркменистана были объединены с гидроэлектростанциями Таджикистана и Кыргызстана.

В годы независимости ЭЭС Туркменистана с помощью двух межгосударственных электрических связей напряжением 220 кВ объединили с ЭЭС Исламской Республики Ирана и четырьмя линиями 110 кВ Исламской Республики Афганистана.

Электрические режимы энергосистем Центральной Азии строились, исходя из необходимости обеспечения взаимосвязи энергетики и ирригации. Объемы торговли электроэнергией определялись на основе технических перетоков между энергосистемами. С 2017 г. рост объемов энерготорговли за счет импорта в зимнее время из Туркменистана в Узбекистан и летнее время в Иран.

Электроэнергетическая система Туркменистана участвуя в электроэнергетических интеграционных проектах с соседними странами может стать связующим звеном между национальными и региональными ЭЭС на значительной части Азии. Для этого заканчивается строительство кольцевой энергосистемы Туркменистана высоковольтными линиями напряжением 220–500 кВ. Ведутся переговоры к строительству сверхвысоковольтных воздушных линий в Исламскую Республику Иран, Казахстан и по подводному кабелю через Каспийское море в Азербайджан, дальше в Турцию. В завершающей стадии проектные работы межрегиональной электрической линии 500 кВ Туркменистан–Афганистан–Пакистан.

Туркменистан обладает достаточно большим потенциалом для обеспечения поставок электроэнергии в страны третьего мира через Узбекистан и Иран. Выступая на внеочередной онлайн-встрече министров иностранных дел Организации тюркских государств в январе 2024 г., министр иностранных дел Туркменистана Рашид Мередов заявил, что Туркменистан готов начать экспортные поставки природного газа и электроэнергии в Республику Казахстан.

С учетом темпов экономического развития потребности стран региона в электроэнергии к 2035 г. возрастут в среднем в два раза по сравнению с текущим годом. Это обстоятельство накладывает требования на дальнейшее укрепление взаимосвязей региональных энергосистем для обмена мощностями и осуществления межгосударственных транзитов электроэнергии. Объединение электроэнергетических систем стран в конечном итоге даст возможность эффективного использования резервов мощностей, уменьшить вредные выбросы в атмосферу.

Анализ энергосистем стран Центральной Азии показывает значительное усиление сети и генерирующих мощностей. Вместе с тем ряд сечений основной транзитной сети региона ограничен в пропускной способности сети и возможностями автоматики, что является проблемой для качества энергоснабжения и надежности функционирования объединения, может создать предпосылки серьезным нарушениям режимов. Одной из причин нарушений является понижение или повышение уровня напряжения линии.

Работа транзитной сети близкой или превышающей к пропускной способности по мощности линий является основной причиной понижения уровня напряжения.

Основные причины повышения уровней напряжения:

- разгрузка транзитной сети в часы минимальных нагрузок;
- недостаточная компенсация реактивных мощностей транзитной сети;
- исчерпание технической возможности по разгрузке генераторов.

Отмеченные проблемы могут быть эффективно решены совершенствованием методов и средств управления потоками мощности в высоковольтных сетях с помощью систем распределенной генерации и на основе применения управляемых средств компенсаций реактивной мощности (УСКРМ).

В высоковольтных линиях 500 кВ Центральной Азии для компенсации зарядной мощности в основном использованы нерегулируемые шунтирующие реакторы (НШР). В часто изменяющихся перетоках мощности НШР неэффективны для решения выше перечисленных проблем. Для решения этих проблем нужна замена НШР на новые УСКРМ или модернизация НШР с возможностью автоматического управления. Эти устройства увеличат пропускную способность линий электропередач и повысят надежность режимов работ.

Принимая во внимание режимные проблемы в электроэнергетических системах, целесообразно внедрение в них технологии УСКРМ, открывающей новые возможности для поддержания напряжений в нормативных пределах управления потоками мощности в линиях с обеспечением пропускной способности линий вплоть до предела термической стойкости проводов.

#### Литература

1. Бабаев, Б. М. Компенсация реактивной мощности в линиях электропередачи высокого напряжения / Б. М. Бабаев // Наука и технологии в Туркменистане. – № 5. – 2011. – С. 20–29.
2. Костин, В. Н. Передача и распределение электроэнергии. Учебное пособие / В. Н. Костин, У. А. Родчен. – СПб. : СЗТУ, 2003–147 с.
3. Латыпов, Д. Д. Исследование режимов и устойчивости электроэнергетической системы, содержащей управляемую электропередачу : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Д. Д. Латыпов. – М., 2009.

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В ТУРКМЕНИСТАНЕ**

**З. М. Чарыева**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г Мары*

Научный руководитель Э. Я.Тораева

*Представлены результаты анализа применения водо-водяных тепловых насосов в условиях Туркменистана в виде таблиц и графиков. Доказано несколько преимуществ системы теплового насоса – энергоэффективность и экологичность.*

**Ключевые слова:** тепловой насос, грунтовая вода, тепло почвы, экологичность.

В настоящее время особое внимание уделяется вопросам энергосбережения в Туркменистане. Эффективное использование энергии и снижение материальных затрат в производстве – одна из важных задач современности. Президент Туркменистана постоянно подчеркивает важность дальнейшей модернизации энергетической отрасли и инновационного производства. Учитывая эти задачи, в нашей стране принята «Государственная программа энергосбережения на 2018–2024 годы».

Защита окружающей среды и сокращение использования ископаемых природных ресурсов для получения энергии – одна из главных проблем современности. Это связано с тем, что ископаемое топливо оказывает негативное влияние окружающую среду, а его стоимость увеличивается с каждым годом.

Тепловые насосы, использующие нетрадиционные источники энергии, перспективны для отопления и охлаждения жилых зданий в условиях Туркменистана. Поскольку в нашей стране в течение года много солнечных дней, энергия Солнца накапливается в окружающей среде (почве, водоемах, подземных водах и воздухе) в неограниченном количестве. Использование тепловых насосов экологически чистым способом будет способствовать снижению затрат на отопление и защите окружающей среды. Тепловой насос предоставляет технические возможности для эффективного использования возобновляемой энергии в виде окружающего тепла в системах отопления и охлаждения, а также для производства горячей воды.

Природные источники тепла, используемые в тепловых насосах:

- температура наружного воздуха (при положительных температурах);
- температура воды естественных и искусственных водоемов (рек, озер, морей);
- тепло из геотермальных источников;
- тепло почвы, полученное с помощью специальных трубчатых теплообменников;
- тепло грунтовых вод.

В зависимости от типа источника тепла и способа подключения нагреваемой среды, тепловые насосы делятся на следующие типы:

- Воздух-воздух (тепло забирается из наружного воздуха, а воздух используется в качестве теплоносителя в системе теплоснабжения);
- «земля–вода»;
- «вода–воздух»;
- «вода–вода».

Тепловые насосы «вода–вода» используют тепло, накопленное в грунтовых или охлаждающих водах, и достигают высоких показателей эффективности. С целью изучения возможности использования данного типа насоса для условий Туркменистана в течение года проводился мониторинг температуры грунтовых вод на глубине 9 м и поверхности почвы. Наблюдаемые температуры приведены в таблице.

**Температуры грунтовых вод**

Дата	28.02.	14.03.	28.03.	11.04.	25.04.	09.05.	23.05.	06.06.	20.06.
Температура грунтовых вод, °С	+4	+1	+6	+13	+22	+18	+45	+23	+22
Температура поверхности почвы, °С	–8	–3	+12	+18	+40	+32	+19	+48	+47
Дата	04.07	18.07	01.08	15.08	29.08	12.09	19.09	03.10	17.10
Температура грунтовых вод, °С	+23	+26	+26	+24	+21	+15	+20	+7	+6

Окончание

Дата	28.02.	14.03.	28.03.	11.04.	25.04.	09.05.	23.05.	06.06.	20.06.
Температура поверхности почвы, °С	+48	+49	+49	+48	+43	+44	+38	+35	+22

Графики температуры грунтовых вод и поверхности почвы в течение года представлены на рис. 1.



Рис. 1. Графики изменения температуры грунтовых вод и поверхности почвы в течение года

Грунтовые воды имеют постоянную температуру около 7–17 °С в течение всего года. Поэтому для отопления требуется небольшое повышение температуры по сравнению с другими источниками тепла. При использовании грунтовых вод в тепловых насосах необходимы две скважины для забора воды из земли и обратного процесса: Расстояние между колодцами для всасывания и поглотителем не должно быть менее 5 метров. При установке поглощающего колодца его следует выбирать так, чтобы выход воды находился ниже уровня грунтовых вод.

В качестве заключения можно привести следующие результаты и выводы:

– Экономия. Тепловой насос более эффективно использует подаваемую энергию и имеет более высокий КПД. Тепловые насосы сравниваются между собой по коэффициенту преобразования тепла. Он показывает соотношение затрат тепла и энергии. Например, если  $K = 3,5$ , это означает, что на вход теплового насоса отдается 1 кВт мощности, а на выходе получается 3,5 кВт, то есть природа дает без возврата 2,5 кВт мощности;

– Воздействия на экологию. Тепловой насос не сжигает топливо, а значит, не создает вредных соединений, таких как  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $PbO_2$ , поэтому в почве вокруг дома не остается следов соединений серы, азота, фосфорных кислот и бензола. Фреоны, используемые в тепловых насосах, не содержат озон разрушающие углеводороды;

4. Универсальность. Еще одним преимуществом тепловых насосов является возможность переключения с зимнего отопления на летнее охлаждение. Для этого вместо радиаторов к внешнему коллектору подключают систему «фанкойл», или «холодный потолок»;



5. Работает без отказов. Данная конструкция взрыво- и пожаробезопасная. В установке не используется топливо, открытое пламя, опасные газы и смеси. Ни одна деталь не нагревается до температуры воспламенения горючих материалов. Хранение устройства не приводит к его разрушению или замерзанию жидкостей.

#### Литература

1. Государственная программа по энергосбережению на 2018–2024 годы. – Ашхабад, 2018.
2. Инструкция по проектированию. – Режим доступа: [https://www.studmed.ru/instrukciya-po-proektirovaniyu-i-tehtransport-na-teplove-nasosy-viessmann\\_5b3b6642d16](https://www.studmed.ru/instrukciya-po-proektirovaniyu-i-tehtransport-na-teplove-nasosy-viessmann_5b3b6642d16). – Дата доступа: 02.03.2024.
3. Половинкина, Е. О. Использование тепловых насосов в системах теплоснабжения зданий и сооружений / Е. О. Половинкина // VI Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум». – 2014. – Режим доступа: <http://www.rae.ru/snt>.

## ПРОБЛЕМАТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЗУТА В ЭНЕРГЕТИКЕ

А. С. Падрез

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель Ю. В. Кляусова

*Рассмотрена проблематика использования мазута в энергетике и его влияние на окружающую среду и человека. Мазут, как топливо, обладает рядом негативных характеристик, таких как высокая вязкость, плотность и содержание вредных примесей. Эти физико-химические свойства могут оказывать влияние на процессы сжигания, а также на атмосферу и здоровье людей. Проанализированы методы снижения негативного воздействия мазута на окружающую среду, включая использование современных технологий очистки и сжигания.*

**Ключевые слова:** мазут, транспортировка, хранение, вред для окружающей среды и человека, борьба с загрязнением от мазута.

На энергетической станции для растопки котлов используется мазут в качестве вспомогательного топлива. Для обеспечения приемки, хранения, подготовки и подачи мазута в котельное сооружение создается специальное мазутное хозяйство.

Процесс работы мазутного хозяйства состоит из нескольких этапов.

Прием и хранение мазута:

– мазут доставляется на тепловую электростанцию железнодорожным транспортом;

– сливается в приемный резервуар, перед которым установлен фильтр-сетка;

– ускорения слива из цистерн мазут разогревается паром через верхнюю горловину;

– три подземных железобетонных резервуара вмещают десятисуточный запас мазута, который хранится при температуре 70–80 °С;

– мазут в резервуарах разогревается циркуляционным способом с помощью резервных насосов и подогревателей, фильтры грубой и тонкой очистки обеспечивают качество мазута.

2. Транспортировка мазута:

– мазут поступает в котельное отделение по двум мазутопроводам;

– в магистральных мазутопроводах и отводах к каждому котлу обеспечивается циркуляция мазута;

– трубопровод рециркуляции мазута связывает котельную и мазутное хозяйство;

– запорная арматура с дистанционными электрическими и механическими приводами устанавливается на вводах магистральных мазутопроводов и отводах к каждому котлу.

Такая система обеспечивает надежное и эффективное использование мазута в энергетических процессах.

Воздействие на окружающую среду:

– атмосфера: энергетика влияет на атмосферу через потребление кислорода, выбросы газов, влаги и твердых частиц. Тепловые электростанции, сжигающие органические виды топлива, включая мазут, неблагоприятно влияют практически на все сферы окружающей среды;

– гидросфера: энергетика влияет на гидросферу через потребление воды, создание искусственных водохранилищ, сбросы загрязненных и нагретых вод, жидких отходов.

– литосфера: энергетика влияет на литосферу через потребление ископаемых топлив, изменение ландшафта, выбросы токсичных веществ.

Воздействие на человека: при взаимодействии канцерогенных углеводородов и оксидов азота синтезируются соединения, действующие на генный фонд человека.

В результате отрицательного воздействия всевозрастающего энергопотребления во многих районах мира уже сегодня создалась очень опасная экологическая обстановка. В нашей стране мазутные хозяйства используются как вспомогательные источники энергии и на каждой станции установлены такие хозяйства. Поскольку мазут имеет свой срок хранения и его ежегодно закупают для поддержания работоспособности энергетике, приходится сжигать данный вид топлива несмотря на стабильную работу энергосистемы и во время сжигания и залива мазута в специальные баки население (так же, как и сотрудники станций), может почувствовать весьма неприятный запах от данного вида топлива. Данная проблема, как и другие экологические, весьма актуальна в современном мире и энергетика приходится придумывать решение вопроса связанных с мазутом.

В современном мире для борьбы с загрязнениями от мазутных хозяйств в энергетике применяются различные подходы и технологии:

Энергосберегающие мероприятия: разработан алгоритм для оценки эффективности использования энергосберегающих мероприятий для мазутных хозяйств. Это включает в себя оптимизацию процессов подогрева и сжигания мазута, что может привести к снижению выбросов.

Модернизация технологических схем: проводятся исследования по модернизации теплотехнологических схем мазутных хозяйств, что может привести к более эффективному использованию энергии и снижению загрязнения.

Строгие экологические стандарты и регулирование: правительства и международные организации устанавливают строгие стандарты и регулирование для снижения загрязнения от мазутных хозяйств.

Технологии очистки отходов: применяются различные технологии для очистки отходов от сжигания мазута, включая фильтры и системы очистки дыма.

Важно отметить, что эффективность этих подходов может варьироваться в зависимости от конкретной ситуации и требует комплексного подхода для достижения наилучших результатов.

В заключении можно сказать, что использование мазута в энергетике является сложной проблемой, которая оказывает значительное влияние на окружающую среду и человека. Выбросы, связанные с сжиганием мазута, вредят атмосфере, гидросфере и литосфере, а также могут негативно влиять на здоровье человека. Однако,

несмотря на все эти вызовы, энергетика является важнейшей отраслью хозяйства, без которой невозможна деятельность человека. Поэтому важно продолжать исследования и разработки в области энергосберегающих технологий, модернизации технологических схем и использования альтернативных источников энергии. В современном мире все больше внимания уделяется борьбе с загрязнением от мазутных хозяйств в энергетике. Это включает в себя строгие экологические стандарты и регулирование, а также применение технологий очистки отходов. Однако, эффективность этих подходов может варьироваться в зависимости от конкретной ситуации и требует комплексного подхода для достижения наилучших результатов. В целом, проблематика использования мазута в энергетике требует дальнейших исследований и инноваций, чтобы обеспечить устойчивое и безопасное энергетическое будущее.

#### Литература

1. Зеверева, Э. Р. Энергосберегающие технологии и аппараты ТЭС при работе на мазутах / Э. Р. Зеверева, Т. М. Фарахов. – М. : Теплотехник, 2012. – 181 с.
2. Назмеев, Ю. Г. Мазутные хозяйства ТЭС / Ю. Г. Назмеев. – М. : МЭИ, 2002. – 612 с.

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ. СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

А. Д. Касач, И. А. Кричко, А. В. Разумейчик

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель Ю. В. Кляусова

*Рассмотрена электротехническая сталь как материал, который широко применяется в электрооборудовании, а также способы изготовления и улучшения данного процесса.*

**Ключевые слова:** электротехническая сталь, легирование, горячекатаные, холоднокатаные, сплав.

Электротехническая сталь (ЭТС) – это разновидность черного металла с улучшенными электромагнитными свойствами.

Улучшения электромагнитных свойств добиваются за счет внедрения кремния. Таким образом, электротехническая сталь представляет сплав железа и кремния (кремний содержанием 0,8–4,8 %).

Данный сплав применяется в конструкции электрических машин и приборов. С помощью электрического оборудования вырабатывают или преобразуют электрическую энергию.

Легирование – добавление в состав примесей для улучшения физических или химических свойств данного материала – производится не искомым элементом кремнием, а ферросилицием. Данный процесс позволяет вывести из металла кислород, который оказывает наибольшее негативное влияние на магнитные свойства материала, и цементит, который заменяется на графит. Наличие данных соединений приводит к увеличению потерь на гистерезис и вихревые токи.

По способу изготовления ЭТС делятся на горячекатаные и холоднокатаные.

Горячекатаная ЭТС производится с применением горячей прокатки (содержание кремния при данном способе не превышает 4,8 %).

Технология горячей прокатки подразумевает прокатку слитков до 1 т на полосы, которые разрезаются на плоские заготовки (сутунки) толщиной 5–10 мм и массой до 30 кг. Температура прокатки сутунки – 1200–1300 °С. В дальнейшем заготов-

ки прокатывают на листы разной толщины при температуре до 1260 °С. Температура прокатки зависит от содержания ферросилиция. В настоящее время данный способ не используется, только лишь небольшое количество ЭТС в виде листа толщиной более 2 мм и прутка круглого сечения.

Существуют два способа производства холоднокатаных листов: полистный и рулонный.

Особенность полистной прокатки – производство стали в рулонах, которые после холодной прокатки разрезаются на листы и последующую обработку ведут полистно.

На современных заводах принят рулонный способ производства. Все операции над сталью производятся в рулонах. Уже позже, перед сортировкой, они разрезаются на листы.

Данный способ обеспечивает увеличение выпуска продукции, дает возможность механизировать и автоматизировать технологические операции.

Часто холоднокатаную сталь поставляют в рулонах для уменьшения отходов после производства.

Процесс получения холоднокатаных полос и листов из углеродистых и легированных сталей начинается с горячекатаного металла в рулонах, полученного на непрерывных или полунепрерывных станах. Для некоторых низколегированных сталей первым шагом является смягчающий отжиг подката, в то время как для углеродистых сталей такой отжиг обычно не проводится. Затем следует операция очистки поверхности подката от окалины с использованием травления, дробеструйной обработки или их комбинации. В линии травления также проводится стыковая сварка горячекатаных рулонов, обрезка кромок и промасливание.

Холодная прокатка горячекатаных полос осуществляется на непрерывных или реверсивных станах. При производстве листов в рулонах последующие операции включают отжиг, «дрессировку», резку на листы с одновременной правкой и промасливанием, сортировку, упаковку и отгрузку.

Общая цель производства холоднокатаной стали заключается в получении тончайшей полосы на непрерывных станах холодной прокатки.

Применение ЭТС:

– трансформаторы: электротехническая сталь используется для изготовления сердечников трансформаторов. Благодаря своим магнитным свойствам, эта сталь позволяет снизить потери энергии и повысить эффективность работы трансформаторов;

– электродвигатели: в электродвигателях также используется электротехническая сталь для изготовления статоров и роторов. Это помогает уменьшить потери энергии и повысить КПД двигателей;

– генераторы: в генераторах электротехническая сталь применяется для создания обмоток статора и ротора, что позволяет обеспечить высокую эффективность генераторов;

– индуктивности и дроссели: электротехническая сталь используется для изготовления индуктивностей и дросселей в электрических цепях, так как она обладает высокой магнитной проницаемостью;

– трансформаторные ядра: электротехническая сталь применяется для изготовления трансформаторных ядер, которые используются в различных устройствах для изменения напряжения и тока.

Электротехническая сталь имеет различные марки и характеристики, которые подбираются в зависимости от конкретного применения.

Процесс изготовления ЭТС постоянно улучшается. Для увеличения количества и улучшения качества необходимо следовать некоторым перспективам:

- расширение диапазона температур: развитие специальных видов электротехнической стали, способных работать при экстремальных температурах, позволит использовать этот материал в более широком спектре условий эксплуатации;
- уменьшение воздействия на окружающую среду: исследования направлены на создание более экологически чистых процессов производства электротехнической стали и использование более устойчивых к окружающей среде материалов;
- интеграция с новыми технологиями: с развитием электроники и электрических технологий, электротехническая сталь будет интегрироваться в новые устройства и системы, такие как электромобили, солнечные батареи, ветрогенераторы и другие.

#### Литература

1. Материаловедение : учебник / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под. общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 5-е изд. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СИЛОВЫХ УЗЛОВ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

А. П. Буйвид, М. А. Мойсееня, А. А. Радкевич

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель С. А. Павлюковец

*Проанализированы конструкции вентильных синхронных электродвигателей с печатным статором. Рассмотрены две структуры компоновки синхронных двигателей с аксиальным магнитным потоком с воздушным сердечником и их влияние на динамические показатели электродвигателя.*

**Ключевые слова:** вентильный электродвигатель, синхронный электродвигатель, печатный статор, аксиальный магнитный поток, воздушный сердечник.

Одной из разновидностей синхронных электродвигателей являются двигатели с использованием фазного ротора или ротора с постоянными магнитами [1]. При этом синхронным двигателям с постоянными магнитами на роторе (СДПМ), как правило, отдается предпочтение по сравнению с синхронными двигателями с фазным ротором (СДФР), особенно для условий, требующих невысокой скорости. Синхронные двигатели с постоянными магнитами на роторе более эффективны, чем другие двигатели, поскольку магнитное поле ротора создается постоянными магнитами, установленными на его поверхности, а не при помощи щеточного или бесщеточного возбуждения поля. Это повышает их надежность и снижает затраты на их обслуживание [2].

Синхронные двигатели с постоянными магнитами обычно подразделяются на три категории в зависимости от направления магнитного потока: радиальные, аксиальные (осевые) и поперечные. Помимо общих преимуществ, связанных с применением ротора с постоянными магнитами, СДПМ с постоянным осевым магнитным потоком (AFPM) имеют достоинства по сравнению со своими аналогами, включая высокое соотношение крутящего момента к массе, более высокую удельную мощность, более высокий КПД и более компактную структуру. Исходя из этого, двигате-

ли типа AFPM нашли применение в современных электроприводах колесных, робототехнических и гибридных механизмов [3].

Синхронные двигатели с печатным статором с осевым магнитным потоком имеют различные конструктивные вариации обмоток статора, включающие в себя многожильный провод, литцевый провод, а также топологии печатных плат, содержащие спиральные, шестигранные и волновые катушки с определенным диапазоном мощности от 0,3 до 2,3 кВт/кг [3].

Среди указанных вариантов структура синхронных двигателей с осевым потоком без сердечника более привлекательна благодаря своей модульной конструкции и целостности. Вентильные двигатели без сердечника и без пазов с печатным статором могут быть спроектированы таким образом, чтобы иметь широкий диапазон номинальной мощности варьирующийся в несколько МВт. Однако, двигатели без сердечника обычно имеют значительно меньшую индуктивность, чем двигатели с сердечником, что приводит к более низким максимальным скоростям, которые могут быть достигнуты при помощи обычных методов [2], [3].

В то же время двигатели с меньшей индуктивностью требуют более низких напряжений на клеммах для работы с заданной угловой скоростью. При этом с целью обеспечения постоянной мощности для требуемого дополнительного диапазона скоростей возможна реализация таких методов, как относительное вращение диска статора в качестве средства уменьшения потокосцепления или использование управляемого каскада повышения постоянного тока на входе электропривода и использование метода ослабления тока. Непосредственное влияние воздушного зазора в двигателях с аксиальным магнитным потоком без сердечника подвергает обмотки статора значительным потерям переменного тока в проводниках, особенно при работе на высоких скоростях. Использование печатных плат в качестве статора позволяет легко вносить изменения в конструкцию обмоток, а также открывает доступ к модульной конструкции, в которой последовательная (рис. 1, а) или параллельная (рис. 1, б) компоновка из нескольких печатных плат может служить для увеличения крутящего момента или скорости электродвигателя.

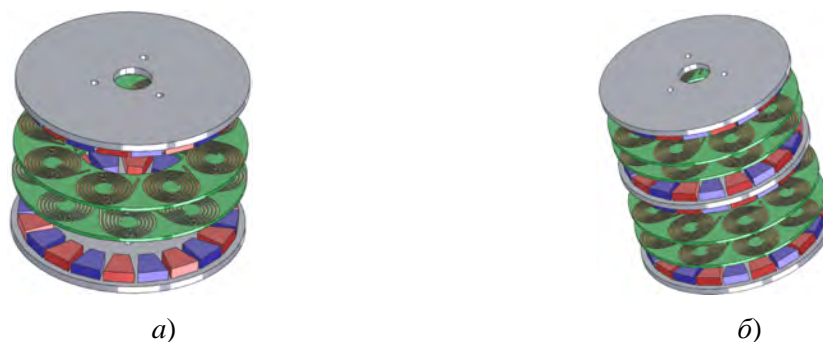


Рис. 1. Модульная конструкция:

а – последовательная компоновка вентильного двигателя с печатным статором с осевым магнитным потоком; б – параллельная компоновка вентильного двигателя с печатным статором с осевым магнитным потоком

Главный компромисс заключается в соотношении плотности тока, активной массы и энергоэффективности [4]. Конструкции AFPM с минимальной активной массой, как правило, имеют более высокие плотности тока, в то время как структуры двигателей с печатным статором с высокой энергоэффективностью, как правило, имеют более низкие плотности тока. Хотя большее число пар полюсов увеличивает

частоту вращения электропривода, это может снизить активную массу и потери в меди двигателя. Помимо этого, увеличение числа пар полюсов увеличивает сложность конструкции двигателя и системы охлаждения и влечет потери в сердечнике; таким образом, конструкции с большим количеством полюсов достигли эффективности, сравнимой с конструкциями с меньшим количеством полюсов. Однако, для таких электроустановок, как электроприводы винтов летательных аппаратов, в условиях полета конструкции с большим числом полюсов имели более низкую эффективность, поскольку потери в сердечнике составляли больший процент электромагнитных потерь, чем при взлете.

Магниты ротора располагают в виде матрицы Хальбаха для обеспечения более синусоидального распределения потока, что может снизить потери в сердечнике и крутящий момент при зацеплении [1]. Кроме того, матрица Хальбаха обеспечивает обратное распространение магнитного потока [4], позволяя заменить сердечник ротора на легкий полимер, армированный углеродным волокном.

Основываясь на моделировании, для плотности тока, создаваемой печатной платой, подходящей для высокопроизводительного охлаждения, мощность, типичная для силовых двигателей многовинтовых малых самолетов, т.е. 10 кВт при 2600 об/мин, может быть достигнута с использованием нескольких печатных плат с параллельными слоями или аксиально-модульной альтернативной компоновки с 3 роторами и 2 статорами [5].

#### Литература

1. Gieras J. F. Axial flux permanent magnet brushless machines / J. F. Gieras, R. J. Wang, M. J. Kamper. – Springer Science & Business Media, 2008.
2. Tiegna H. Over view of analytical models of permanent magnet electrical machines for analysis and design purposes / H. Tiegna, Y. Amara, G. Barakat // Mathematics and Computers in Simulation. – 2013. – Т. 90. – С. 162–177.
3. On the design of coreless permanent magnet machines for electric air craft propulsion / D. Lawhorn [et al.] // 2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). – IEEE, 2021. – С. 278–283.
4. Zhu, Z. Q., Howe D. Halbach permanent magnet machines and applications: IZ.Q 2hu // IEE Proceedings-Electric Power Applications. – 2001. – Vol. N 4. – С. 299–308.
5. Johnson M. Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays / M. Johnson, M. C. Gardner, H. A. Toliyat // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – IEEE, 2015. – С. 108–114.

## **АБСОРБЦИОННЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС С ГАЗОВЫМ ПРИВОДОМ В СИСТЕМЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

**В. В. Янчук**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель В. Н. Романюк

*Приведены основные результаты расчета изменения эффективности работы электрической станции на базе паротурбинной установки ПТ-60. При модернизации системы регенеративного подогрева питательной воды за счет включения в схему абсорбционного теплового насоса (АБТН) с приводом на дымовых газах, отбираемых из тракта парового котла. Данное решение позволяет вытеснить часть пара из отборов турбины, следовательно, увеличить выработку электроэнергии. Предложенная модернизация актуальна для станций, где имеется значительный невозврат конденсата, так как температура нагреваемого потока на выходе из АБТН ограничивается 85°C. В результате*

*получено, что при полном невозврате конденсата промышленного отбора в цикл, рост электрического КПД после модернизации составил 2,7 %, рост энергетического КПД – 1,1 %.*

**Ключевые слова:** турбоустановка ПТ-60, абсорбционный тепловой насос, система регенеративного подогрева питательной воды, низкотемпературные тепловые потоки.

Повышение эффективности использования первичных источников энергии – одно из приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг. Мероприятия, способствующие повышению энергетической эффективности процесса, также позволяют снизить себестоимость выпускаемой продукции, соответственно, повысить ее конкурентоспособность, и снизить нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения выбросов.

В более ранних исследованиях [показано, что регенеративное использование низкопотенциальных сбросных тепловых потоков на паротурбинной тепловой электростанции позволяет повысить показатели эффективности ее работы. В статье [2] рассмотрен вариант включения абсорбционного теплового насоса (АБТН) в систему регенеративного подогрева питательной воды. Используя пар из отбора турбины для привода АБТН, а в качестве низкопотенциального утилизируемого потока циркуляционную воду, возможно в пределе получить повышение электрического КПД на 0,9 % и энергетического КПД на 0,55 %.

В качестве привода АБТН возможно также использование потока дымовых газов с температурой порядка 330 °С, с их охлаждением до 140 °С. Паровая турбина ПТ-60 работает совместно с котлом БКЗ-420, в соответствии с компоновкой поверхностей нагрева которого, отбор газов соответствующей температуры необходимо осуществлять по ходу дымовых газов перед водяным экономайзером первой ступени. Отбор части дымовых газов повлечет за собой изменение температуры дымовых газов по всему тракту котла, изменение температуры нагреваемых сред – перераспределение температуры в пароводяном тракте и снижение температуры подогретого воздуха. При расчете коэффициента теплопередачи для каждой поверхности нагрева принят постоянным при изменении расхода дымовых газов.

По результатам расчета получено, что температура дымовых газов перед дымовой трубой снизилась на 24 °С. В классической схеме составляла 133 °С, после отбора части газов – 109 °С. Данные температуры исключают конденсацию водяных паров из дымовых газов, что позволяет не проводить дополнительные мероприятия. Наблюдается также недогрев воздуха в воздухоподогревателях на 10 °С, по сравнению с классическим вариантом, что также незначительно снижает температуру горения [3].

В качестве низкопотенциального источника тепловой энергии для АБТН в данном варианте используется также циркуляционная вода конденсатора турбины. Нагрев подпиточной воды осуществляется до 85 °С, что позволяет вытеснить часть пара, расходуемого на ее подогрев, тем самым увеличить выработку электроэнергии.

В результате численного анализа получено, что увеличение электрического КПД за счет предложенной модернизации составил 2,7 %, увеличение энергетического КПД – 1,1 %. Полученные расчетные данные доказывают эффективность предложенных решений.



## Литература

1. Янчук, В. В. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 6. – С. 511–523.
2. Янчук, В. В. Модернизация системы регенеративного подогрева питательной воды в цикле турбоустановки ПТ-60 / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 6. – С. 509–523.
3. Хрусталева, Б. М. Расширение энергосберегающей базы в условиях централизованного теплоснабжения и доминирования энергоёмких технологий / Б. М. Хрусталева, В. Н. Романюк // Энергоэффективность. – 2017. – № 12. – С. 20–27.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОЩАДИ  
ВЫХОДНОГО ОТВЕРСТИЯ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЫ  
ТЕПЛООБМЕННИКА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
НА ТЕПЛООТДАЧУ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ  
С УЧЕТОМ ИХ ВНЕШНЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

**Д. В. Островская**

*Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск*

Научный руководитель Г. С. Маршалова

*Проведены экспериментальные исследования влияния площади выходного отверстия вытяжной шахты теплообменника воздушного охлаждения на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка оребренных труб с внешним однородным кольцевым загрязнением. При проведении экспериментальных исследований над пучком была установлена вытяжная шахта высотой  $H = 1,04$  м с регулируемым проходным сечением. В результате получены графические зависимости в виде чисел подобия  $Nu = f(Ra)$ . Установлено, что с увеличением площади выходного отверстия шахты интенсивность теплоотдачи однорядного пучка увеличивается, достигая максимума при  $f_{opt} = 0,086$  м<sup>2</sup>, после чего она снижается из-за наличия обратных потоков холодного воздуха в шахту.*

**Ключевые слова:** теплообменник воздушного охлаждения, однорядный пучок, внешнее загрязнение, оребренная труба, теплоотдача.

Теплообменники воздушного охлаждения (ТВО) широко распространены в таких отраслях промышленности, как химическая, нефтехимическая, газовая, целлюлозно-бумажная, в тепло- и электроэнергетике, в холодильной технике, на атомных станциях. Данные аппараты используются для охлаждения технологических продуктов, охлаждения и конденсации парогазовых смесей, для нагрева воздуха, а также утилизации тепла отходящих продуктов сгорания природного газа или других газобразных сред.

Обширной областью применения ТВО является необходимость охлаждения, транспортируемого на большие расстояния газа. Для преодоления сопротивления движению газа на газопроводе через определенные промежутки (110–130 км) строят компрессорные станции, предназначенные для повышения давления газа до требуемых значений. Однако в процессе сжатия также увеличивается и температура газа, которую для увеличения пропускной способности трубопровода и повышения его надежности необходимо снижать в ТВО.

Теплообменники воздушного охлаждения в основном, функционируют в режиме вынужденной конвекции, вследствие чего для их работы расходуется значительное количество электроэнергии. В связи с этим можно сказать, что эффективность их

эксплуатации напрямую зависит от количества потребляемой электрической энергии на привод вентиляторов.

Достичь экономии топливно-энергетических ресурсов возможно переходом при определенных условиях окружающей среды в режимы свободной и смешанной конвекции. Так, в работе [1] разработан способ, который позволит снизить потребление электроэнергии при эксплуатации ТВО. Для этого над теплообменным пучком ТВО устанавливается вытяжная шахта, что способствует интенсификации свободно-конвективного теплообмена за счет увеличения силы естественной тяги воздуха.

Стоит отметить, что теплообменники с воздушным охлаждением состоят из пучков биметаллических оребренных труб различных компоновок. Оребрение позволяет увеличить площадь теплопередающей поверхности, что способствует повышению энергетической эффективности. При этом также существенное влияние на тепловую мощность теплообменника оказывает коэффициент теплопередачи, который с течением времени эксплуатации меняет свое значение. Данные теплообменники обычно располагаются на открытом воздухе, что приводит к их внешнему загрязнению. Структура загрязнителей на поверхности оребрения полидисперсна и зависит от географической местности эксплуатации ТВО. Возможны загрязнения в виде заноса сухой землей, песком, гравием, смеси сухих листьев и травы, иголками сосновых и хвойных деревьев, цветочной пылью [2, 3]. Но в большинстве случаев загрязнение представляет различное сочетание отдельных чистых компонентов.

Целью данной работы является исследование влияния площади выходного отверстия вытяжной шахты теплообменника воздушного охлаждения на теплоотдачу однорядного пучка оребренных труб с учетом их внешнего загрязнения.

Схема экспериментальной установки для исследования теплообмена однорядного пучка оребренных труб в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты представлена в работе [1].

Для интенсификации свободно-конвективного теплообмена воздуха над однорядным пучком труб устанавливалась вытяжная шахта с регулируемым проходным сечением высотой  $H = 1,04$  м.

Для исследования влияния площади выходного отверстия на интенсивность теплоотдачи на выходе из вытяжной шахты устанавливались крышки: (с круглыми отверстиями с площадью выходного отверстия  $f_{\text{отв}} = 0,0086; 0,0201$  и  $0,0330$  м<sup>2</sup>; с прямоугольными отверстиями  $f_{\text{отв}} = 0,050; 0,069$  м<sup>2</sup>); без крышки  $f_{\text{отв}} = 0,1185$  м<sup>2</sup>.

При проведении экспериментов использовались биметаллические оребренные трубы следующих геометрических параметров: наружный диаметр  $d = 56,8$  мм; диаметр трубы по основанию  $d_0 = 26,4$  мм; высота ребра  $h = 15,2$  мм; шаг ребра  $s = 2,43$  мм; средняя толщина ребра  $\Delta = 0,55$  мм; длина трубы  $l_{\text{п}} = 330$  мм (теплоотдающая длина  $l = 300$  мм), коэффициент оребрения трубы  $\varphi = 21,0$ . Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь. Внешнее загрязнение межреберного пространства биметаллических ребристых труб создавалось путем равномерного кольцевого наматывания льняного шнура на поверхность труб. В результате был образован слой загрязнения толщиной  $\delta_3 = 2,9$  мм.

Экспериментальное исследование проводилось методом полного теплового моделирования. Подвод теплового потока к оребренным поверхностям обеспечивался за счет установки внутри оребренных труб трубчатых электронагревателей. В ходе опытов электрическая мощность, подводимая к оребренным трубам, изменялась в пределах  $W = 10\text{--}260$  Вт, средняя температура стенки у основания ребер составляла  $t_{\text{ст}} = 25\text{--}120$  °С, а температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 19\text{--}23$  °С.

Экспериментальные данные обрабатывались и представлялись в виде чисел Нуссельта и Рейля:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad (1)$$

$$\text{Ra} = \text{Gr Pr} = \frac{g \beta d_0^3 (t_{\text{ст}} - t_0)}{\nu a}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · °С); Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta = 1 / (273 + t_0)$  – коэффициент температурного расширения, К<sup>-1</sup>;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Экспериментальные данные теплоотдачи однорядного пучка оребренных труб с учетом их внешнего загрязнения в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты с различной площадью выходного отверстия, представлены на рис. 1 в виде зависимости  $\text{Nu} = f(\text{Ra})$ .

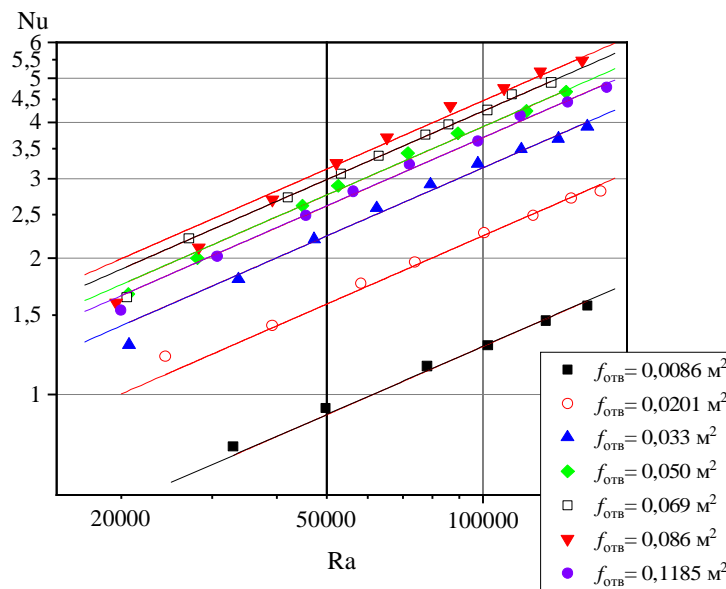


Рис. 1. Теплоотдача однорядного пучка оребренных труб с учетом их внешнего загрязнения в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты с различной площадью выходного отверстия

Согласно рис. 2 с увеличением площади выходного отверстия вытяжной шахты интенсивность теплоотдачи однорядного пучка возрастает, что обусловлено снижением аэродинамического сопротивления шахты и ростом расхода потока воздуха через пучок. Однако после достижения максимальной теплоотдачи пучка при установке крышки с  $f_{\text{отв}} = 0,086 \text{ м}^2$  интенсивность теплоотдачи снижается из-за обратных потоков холодного воздуха в шахту (гейзерных течений) [4].

## Литература

1. Маршалова, Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Г. С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 с.
2. Камалетдинов, И. М. Энергосбережение при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / И. М. Камалетдинов. – Уфа, 2002.
3. Беркутов, Р. А. Повышение энергоэффективности систем охлаждения газа на компрессорных станциях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Р. А. Беркутов. – Уфа, 2010.
4. Маршалова, Г. С. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком / Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий // Инженер.-физ. журн. – 2019. – Т. 92, № 3. – С. 619–625.

**ПРИМЕНЕНИЕ ТНУ В СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
НА ПРИМЕРЕ ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА  
«ГОМСЕЛЬМАШ»**

**Н. О. Быковский**

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

Научный руководитель Н. А. Вальченко

*Описаны принцип работы и типы тепловых насосов, а также их применение в системе оборотного водоснабжения предприятия ОАО «Гомсельмаш». Основное внимание уделяется использованию тепловых насосов для утилизации тепла системы оборотного водоснабжения, что позволяет повысить эффективность использования энергии и снизить потери тепла.*

**Ключевые слова:** тепловой насос, вторичное тепло, система оборотного водоснабжения, ОАО «Гомсельмаш», утилизация тепла, энергосберегающие технические решения.

Тепловой насос представляет собой аппарат, способный переносить тепловую энергию от источника с низким термическим потенциалом к потребителю с более высоким термическим потенциалом. Этот процесс основан на термодинамическом принципе: любое тело, температура которого превышает абсолютный нуль, обладает запасом тепловой энергии.

По виду передачи энергии тепловые насосы бывают двух типов:

1) компрессионные – традиционный тип теплового насоса, функционирование которого осуществляется за счет сжатия пара, а работа механизма приводится в действие при помощи электроэнергии;

2) абсорбционные – усовершенствованная модель теплового насоса, в котором рабочим телом выступает смесь рабочей жидкости и абсорбента, что увеличивает его эффективность. Такие установки также способны использовать генерируемое тепло в качестве источника энергии.

По источнику тепла выделяют следующие тепловые насосы:

- геотермальные – тепловая энергия берется из грунта или воды;
- воздушные – тепло извлекается из атмосферы;
- использующие вторичное тепло – в качестве источника тепла используются воздух, вода, канализационные стоки или тепло от оборотной системы водоснабжения.

В данном докладе будет рассмотрен последний вариант, а именно применение тепловых насосных установок (ТНУ) в системе оборотного водоснабжения предприятия ОАО «Гомсельмаш».

Как показывает анализ тепловых вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) промышленных предприятий, оборотная вода является одним из основных источников тепловых ВЭР низкого потенциала.

Рассматриваемое решение заключается в установке ТНУ типа «вода–вода» для утилизации тепла системы оборотного водоснабжения, которое на данный момент удаляется с помощью градирни, с последующим использованием для системы отопления предприятия в зимний период для нагрева воды для горячего водоснабжения (ГВС) круглый год. Установка теплового насоса для покрытия нагрузки ГВС является наиболее целесообразным вариантом утилизации теплоты оборотной воды, так как данный вид нагрузки является круглогодичным, что повышает число часов использования оборудования [1].

На данный момент на предприятии ОАО «Гомсельмаш» система оборотного водоснабжения предназначена для отвода теплоты от технологического оборудования кузнечного цеха. Вода из кузнечного цеха подается на вентиляторную градирню JN-3200 L/M центробежным насосом 300Д90, где происходит процесс охлаждения. Затем, при помощи насоса 350Д90, охлажденная вода возвращается в цех. В зимнем режиме охлаждение теплоносителя происходит в чаше градирни, в летнем через орошение. Температура поступающей воды в градирню – около 28–30 °С, после градирни – около 20–24 градусов. Основной расход оборотной воды 1250 м<sup>3</sup>/ч.

Система оборотного водоснабжения с охлаждением воды в градирнях обладает рядом значительных недостатков:

- тепловая энергия, отводимая от технологического оборудования, полностью теряется, что является неэффективным использованием ресурсов;

- температура охлажденной воды зависит от параметров окружающей среды и в теплые периоды года может значительно превышать температуру, необходимую для оптимальной работы технологических установок. Это приводит к снижению производительности оборудования в теплый период года;

- контакт воды с атмосферой в градирнях приводит к ее загрязнению и интенсивному образованию накипи на теплообменных поверхностях технологического оборудования. Это сопровождается снижением производительности, увеличением энергопотребления на перекачку воды и необходимостью регулярной очистки теплообменных поверхностей;

- значительные потери воды, вызванные ее испарением и механическим уносом, составляют приблизительно 5 % от производительности системы, что также является неэффективным использованием ресурсов.

Утилизация теплоты оборотной воды с помощью тепловых насосов для целей теплоснабжения является одним из эффективных энергосберегающих технических решений. Переход с открытой водяной системы охлаждения технологического оборудования, когда она охлаждается в градирнях, на закрытую, когда вода охлаждается в испарителях теплового насоса, наряду с утилизацией теплоты для полезного ее использования дополнительно позволит улучшить качество технического водоснабжения, снизить температуру охлаждающей воды, сократить расход свежей воды для охлаждения технологического оборудования [2].

В настоящее время обеспечение горячей водой ОАО «Гомсельмаш» осуществляется паросиловым участком, где для этих нужд установлены водогрейные котлы типа ПТВМ-50

Реконструкция системы оборотного водоснабжения с внедрением в нее ТНУ сократит нагрузку на паросиловой участок, так как часть нагрузки на ГВС и отопление возьмет на себя ТНУ. Это даст возможность экономить электроэнергию системой оборотного водоснабжения за счет снижения нагрузки на градирни (приводы насосов и вентиляторов), и также позволит предприятию рационально использовать ВЭР в виде горячей воды системы оборотного водоснабжения.

В ходе технико-экономического анализа была определена требуемая мощность теплового насоса, равная 4,48 МВт, и его энергопотребление – 6597,36 МВт · ч в год. Общий объем капитальных вложений в тепловую установку составил 11037631 бел. рублей. Реконструкция системы оборотного водоснабжения на предприятии ОАО «Гомсельмаш» позволит сэкономить 3247,7 т у. т. в год, что эквивалентно 2078336 бел. рублей в год. Период окупаемости данного проекта составляет 5,3 года. Таким образом, реконструкция системы оборотного водоснабжения с использованием тепловых насосов представляет собой перспективное направление для повышения эффективности и экономии ресурсов на предприятии ОАО «Гомсельмаш».

#### Литература

1. Азизов, Д. Х. Теплонасосная установка для утилизации теплоты оборотной воды / Д. Х. Азизов, Б. И. Салохиддинов // Молодой ученый. – 2017. – № 1 (135). – С. 24–26.
2. Тимофеев, Б. Д. Применение теплового насоса в системе оборотного охлаждения автоклавов для пастеризации консервной продукции / Б. Д. Тимофеев, В. В. Волков // Вестн. Междунар. акад. холода. – 2009. – № 4 (33). – С. 14–19.

### **АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОИСТОЧНИКОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИКИ г. ГОМЕЛЯ И ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Е. А. Шамберова, А. А. Кулеш**

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

*Рассмотрено влияние природных и антропогенных воздействий на состояние поверхностных водоисточников. Проанализированы виды загрязнений, выявлены приоритетные загрязняющие вещества, а также способы очистки сточных вод, сбрасываемых в водные объекты.*

**Ключевые слова:** поверхностные водоисточники, загрязнение, тяжелые металлы, сточные воды.

В современном мире вода – один из основных факторов, определяющих размещение производственных сил, а очень часто и средство производства. Среди областей с максимальными объемами речного стока выделяется Гомельская область, по территории которой протекают крупнейшие реки Беларуси. Водные объекты, располагающиеся на территории Гомеля и Гомельской области, являются основными источниками воды в промышленной деятельности населения.

Цель данной работы заключается в изучении состояния воды поверхностных водоисточников предприятий энергетики Гомеля и Гомельской области, таких как реки Сож, Припять, Днепр и Березина.

Состояние поверхностных вод определяется влиянием природных и антропогенных воздействий. Главными антропогенными факторами изменения природной среды являются развитие производственного сектора страны и изменение в динамике численности населения.

Промышленные секторы (энергетика, производство, сельское хозяйство, транспорт) играют ключевую роль во внесении загрязняющих веществ в окружающую среду, образовании отходов и изменении природных ландшафтов.

Длина реки Сож – 649 км (из них 492 км по Беларуси), площадь водосборного бассейна – 42100 км<sup>2</sup>. Средний расход воды – 208 м<sup>3</sup>/с. Изучена динамика накопления тяжелых металлов в донных отложениях и погруженных водных растениях реки Сож с целью определения влияния населенных пунктов гомельской области на загрязнение реки Сож. Повышение содержания металлов в растениях для некоторых металлов свидетельствует о переходе металлов из донных отложений в водные массы в доступных для растений формах из-за изменившихся физико-химических условий, связанных с резким изменением уровня воды в реке Сож, что представлено на рис. 1.



Рис. 1. Уровень воды в реке Сож

Максимальные содержания меди и никеля в донных отложениях приходились на разные временные отрезки. Кроме этого, основными компонентами, образующимися в результате сжигания органического топлива (углекислого газа и воды), выбросы ТЭЦ-1 содержат пылевые частицы различного состава, оксиды серы, оксиды азота, фтористые соединения, оксиды металлов, газообразные продукты неполного сгорания топлива, которые также загрязняют реку Сож.

Днепр – река длиной 2286 км. Площадь водосборного бассейна – 504 000 км<sup>2</sup>, Средний расход воды – 1672 м<sup>3</sup>/с. Энергетическое предприятие, которое использует энергию реки Днепр в Беларуси, называется ГЭС Днепрская. Изъятие поверхностных вод происходит с применением водозаборных сооружений. Одним из главных факторов, которые влияют на качество воды в Днепре, является химическое загрязнение. Среди самых опасных загрязнителей – тяжелые металлы, радиоактивные вещества, соединения фосфора и азота, хлор-, бром- и фторсодержащие компоненты, различные болезнетворные микроорганизмы. Количество загрязнений представлено на рис. 2.

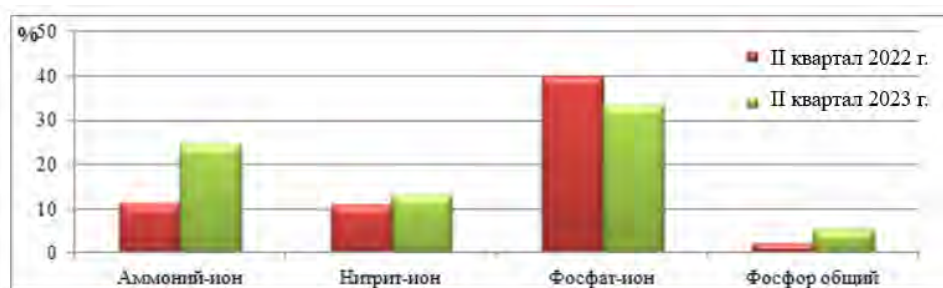


Рис. 2. Количество проб воды, отобранных из поверхностных водных объектов бассейна реки Днепр с повышенным содержанием биогенных веществ (в % от общего количества проб)

Длина реки Припять составляет 774 км. Площадь водосборного бассейна – 114,5 тыс. км<sup>2</sup>. Средний расход воды в устье – 461 м<sup>3</sup>/с. ГЭС Любанская – это гидроэлектростанция, расположенная в Беларуси на реке Припять, недалеко от города Любань. Она использует потоки реки для производства электроэнергии. Приоритетными веществами, загрязняющими воды реки Припять в результате отводимых в них сточных вод, являются сульфаты, органические вещества, нефтепродукты, фенолы и железо. Уровень антропогенной нагрузки на поверхностные водные объекты бассейна реки Припять по фосфат-иону и нитрит-иону представлен на рис. 3.

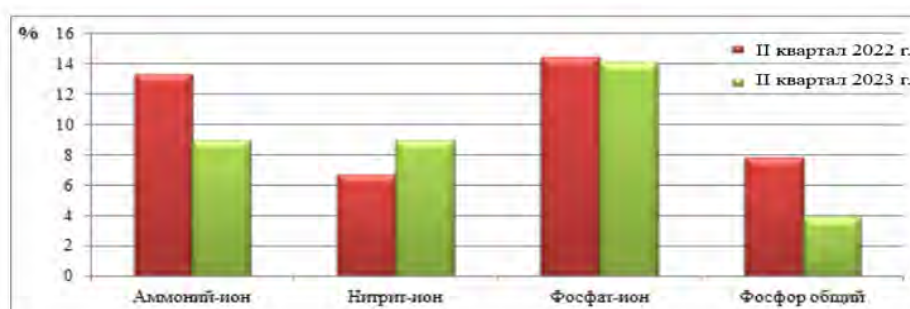


Рис. 3. Количество проб воды с повышенным содержанием биогенных веществ (в % от общего количества проб), отобранных из поверхностных водных объектов бассейна реки Припять

Березина – река длиной 562 км, площадь водосборного бассейна – 24500 км<sup>2</sup>. Средний расход воды – 144 м<sup>3</sup>/с. ГЭС Березинская является крупнейшей гидроэлектростанцией в Беларуси. Она расположена на реке Березина и имеет мощность около 300 МВт. Березина одна из самых загрязненных рек Беларуси, в реке превышено содержание аммоний-ионов, фосфат-ионов и нитратов.

На территории Гомельской области функционируют 325 станций очистки сточных вод, включая 22, основанных на методах биологической очистки. Общее количество выбросов сточных вод в поверхностные водные объекты составляет 123. Для сброса сточных вод в поверхностные водные объекты используется 67 очистных сооружений, в том числе 4 в составе полей фильтрации. Аналитический (лабораторный) контроль сточных вод, сбрасываемых в водные объекты, на очистных сооружениях осуществляется областным комитетом с участием Государственного учреждения «Республиканский центр аналитического контроля в области охраны



окружающей среды». Стоит также отметить, что количество выбросов сточных вод в водные ресурсы сократилось на 6,7 %, включая недостаточно очищенные воды, уменьшились на 12,5 %, тогда как нормативно очищенные снизились на 3,8 %, а воды, не требующие очистки, уменьшились на 15,8 %. Кроме того, расход воды в системах оборотного и повторно-последовательного водоснабжения уменьшился на 23 %.

Таким образом, анализ качества поверхностных водоисточников показывает, что многие реки на которых базируются предприятия, подвержены загрязнению различного типа, в зависимости от деятельности предприятий, его расположения и сезона года. На основании этого проводят комплексные мероприятия по очистке сточных вод для улучшения качества воды и минимизации пагубного влияния производственных отраслей использующих поверхностные водоисточники на окружающую среду. Следующим этапом исследований будет определение качества воды в зависимости от сезона, а также будут сформированы рекомендации по выбору оптимальной водоподготовительной установки.

#### Литература

1. Макаренко, Т. В. Загрязнение воды водоемов Гомеля и прилегающих территорий тяжелыми металлами / Т. В. Макаренко // Изв. Гомел. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2011. – № 4 (57). – С. 147–153.
2. Шкробот, А. А. Сезонные изменения показателей качества поверхностных вод Гомеля / А. А. Шкробот // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXI Междунар. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого. – С. 172–175.
3. Пеньковская, А. М. Оценка влияния водопользования на поверхностные водные объекты Беларуси // Природные ресурсы. – 2018. – № 1. – С. 5–22.
4. Государственное учреждение «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» – Режим доступа: <https://rad.org.by/articles/voda/sostoyanie-poverhnostnyh-vod-v-2-kvartale-2022-g/basseyn-reki-dnprg>. – Дата доступа: 09.03.2024.

## НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗА ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

**В. О. Меньшиков, А. М. Панфилов**

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

Научный руководитель С. Г. Жуковец

*Обоснована актуальность применения нейросетей для оценки состояния оборудования подстанций и прогнозирования аварийных отключений в режиме реального времени на основе данных системы мониторинга.*

**Ключевые слова:** нейросетевые технологии, оборудование, подстанции, надежность, эффективность работы.

На сегодняшний день все большую популярность набирает использование нейросетей в различных областях и сфера энергетике не стала исключением.

Применение нейросетевых технологий позволяет оперативно выявлять потенциальные проблемы на оборудовании подстанций, повышая надежность и эффективность их работы и снижая риски аварийных ситуаций. Наиболее вероятно использование таких технологий (с учетом их развития в настоящий момент на

цифровых подстанциях, поскольку все системы таких подстанций имеют очень высокий уровень автоматизации.

Наиболее вероятным может быть использование нейронных сетей для анализа и интерпретации данных с датчиков, установленных на оборудовании. На основе этих данных нейросеть может выявлять аномалии, предсказывать возможные сбои и помогать в планировании технического обслуживания.

Через несколько лет при нынешних темпах развития нейросетевых технологий возможно внедрение на подстанциях так называемой системы машинного зрения. Она будет анализировать видеоизображения с камер, установленных на высоковольтном оборудовании подстанций. Нейросеть будет обучаться распознавать дефекты и повреждения на оборудовании, а также предсказывать его вероятный срок службы и необходимость предупреждающего технического обслуживания.

Плюсы применения нейросетевых технологий:

- высокая точность диагностики. Нейросетевые алгоритмы могут обрабатывать большое количество данных и выявлять скрытые зависимости, что позволяет повысить точность диагностики состояния оборудования;
- быстрота анализа. Нейросети могут обрабатывать данные в реальном времени и быстро реагировать на любые изменения в работе оборудования;
- снижение риска аварий. Благодаря своей способности к предсказанию нейросети позволяют выявлять потенциальные проблемы до их возникновения, что помогает предотвратить аварийные ситуации;
- мониторинг и предупреждение отказов. Нейросети могут проводить непрерывный мониторинг состояния оборудования и предупреждать о возможных отказах, что помогает предотвратить непредвиденные простои и ремонтные работы;
- снижение затрат на обслуживание. Использование нейросетевых технологий позволяет оптимизировать расходы на обслуживание оборудования за счет предсказуемости его состояния и рационального планирования технического обслуживания;
- повышение эффективности процессов управления и контроля за электрическими подстанциями. Нейросетевые технологии способствуют автоматизации и оптимизации процессов управления и контроля за оборудованием, что ведет к повышению эффективности работы подстанций;
- отсутствие человеческого фактора.

Однако система имеет и отрицательные стороны, к которым можно отнести следующее:

- высокая стоимость. Разработка и внедрение нейросетевых технологий требует значительных финансовых затрат на приобретение специализированного оборудования, обучение персонала и поддержание работы системы;
- сложность поддержания и обслуживания. Нейросетевым моделям необходимо постоянное обновление и поддержание, что может быть сложным и требовать дополнительных ресурсов и специалистов для обслуживания системы;
- зависимость от качества данных. Качество результатов работы нейросетевых моделей напрямую зависит от качества входных данных, это необходимость в обеспечении высокого качества и точности собираемых данных;
- необходимость обучения нейросети. Для создания эффективной модели нейросети требуется проведение обучения на основе имеющихся данных, что может быть сложно и требовать длительного времени.
- нехватка данных. Для обучения нейросетевой модели требуется большое количество данных, что может быть проблематично, если доступ к данным о состоянии оборудования ограничен или недоступен;

Таким образом, использование нейронных сетей для подстанций является перспективным решением, поскольку подстанция обладает множеством данных, изменяющих свое значение в реальном масштабе времени. При этом однако, отсутствует возможность строгого алгоритмического прогнозирования аварий и контроля над компонентами. Именно для таких задач происходит интеграция нейронных сетей.

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНОГО МЕТОДА УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ РАСЧЕТА НИЗКОВОЛЬТНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

М. Г. Гончаров

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

Научный руководитель Д. И. Зализный

*Рассмотрен алгоритм расчета низковольтной трехфазной электрической сети методом узловых потенциалов в матричной форме. Алгоритм реализован в программе Mathcad для простейшей схемы. Решение системы уравнений выполнено методом обратной матрицы. Полученный алгоритм может быть использован для разработки программного обеспечения по расчету несимметричных трехфазных электрических сетей.*

**Ключевые слова:** трехфазный, электрическая сеть, узловой потенциал, проводимость, матрица, узел, нагрузка.

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 т. д. Однако подавляющее большинство этих программ ориентировано на симметричные трехфазные цепи, т. е. 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 – применить матричный метод узловых потенциалов для расчета напряжений потребителей в простейшей трехфазной цепи.

Известно, что ток в любой ветви схемы можно найти по закону Ома для участка цепи, содержащего электродвижущую силу (ЭДС). Для того чтобы можно было применить закон Ома, необходимо знать потенциалы узлов схемы. Метод расчета электрических цепей, в котором за неизвестные принимают потенциалы узлов схемы, называют методом узловых потенциалов (МУП) [1].

Допустим, что в схеме  $n$  узлов. Тогда один из ее узлов (базисный узел) можно мысленно заземлить, т. е. принять его потенциал равным нулю. Число неизвестных в МУП равно числу уравнений, которые необходимо составить для схемы по первому закону Кирхгофа. В том случае, когда число узлов без единицы меньше числа независимых контуров в схеме, данный метод является более экономным, чем метод контурных токов. Необходимо также отметить, что уравнения МУП более читабельны и удобны на этапе программирования.

Исследуемая схема представляет собой некоторую низковольтную трехфазную сеть от шин понижающей трансформаторной подстанции до шин потребителя с несимметричной нагрузкой. На рис. 1 представлена соответствующая схема замещения исследуемой сети.

Рассмотрим порядок формирования уравнений матричного МУП в программе Mathcad.

1. Заносим в программу значения источников ЭДС и активных и реактивных сопротивлений ветвей в комплексной форме:

$$E_a = 230B, E_b = -115 - 199,186iB, E_c = -115 + 119,186iB;$$

$$E_a = 230B, E_b = -115 - 199,186iB, E_c = -115 + 119,186iB;$$

$$Z_{на} = 4,84 + 2,34i \text{ Ом}, Z_{nb} = 6,08 + 2,93i \text{ Ом}, Z_{nc} = 8,06 + 3,9i \text{ Ом}.$$

2. В расчетной схеме задаем направления токов в каждой ветви и создаем матрицу исходных данных  $ID$ , размерностью  $L \times 2$ , где  $L$  – число ветвей схемы. Матрица исходных данных содержит: в первом столбце – номера начальных узлов  $i_s$  и ветвей  $s$ , во втором столбце – номера конечных узлов  $j_s$  ветвей  $s$ , где  $s$  – порядковый номер ветви. Принимаем, что для ветви  $i-j$ , имеющей порядковый номер  $s$  и связывающей узлы  $i$  и  $j$ , положительным считается направление от  $i$  к  $j$ .

3. Создаем матрицу инцидентий  $A$ , устанавливающую взаимосвязь между узлами и ветвями электрической сети. Она имеет размерность  $(N - 1) \times L$ , где  $N$  – число узлов,  $L$  – число ветвей, т. е. не содержит строку, соответствующую базисному узлу (для удобства присваиваем ему нулевой номер), так как эта строка является зависимой и может быть получена как комбинация остальных строк. Если ток некоторой ветви втекает в узел, то ячейке матрицы  $A$  присваиваем значение  $-1$ , если же ток вытекает, то  $+1$ . В остальных случаях ячейки матрицы  $A$  заполняем нулями.

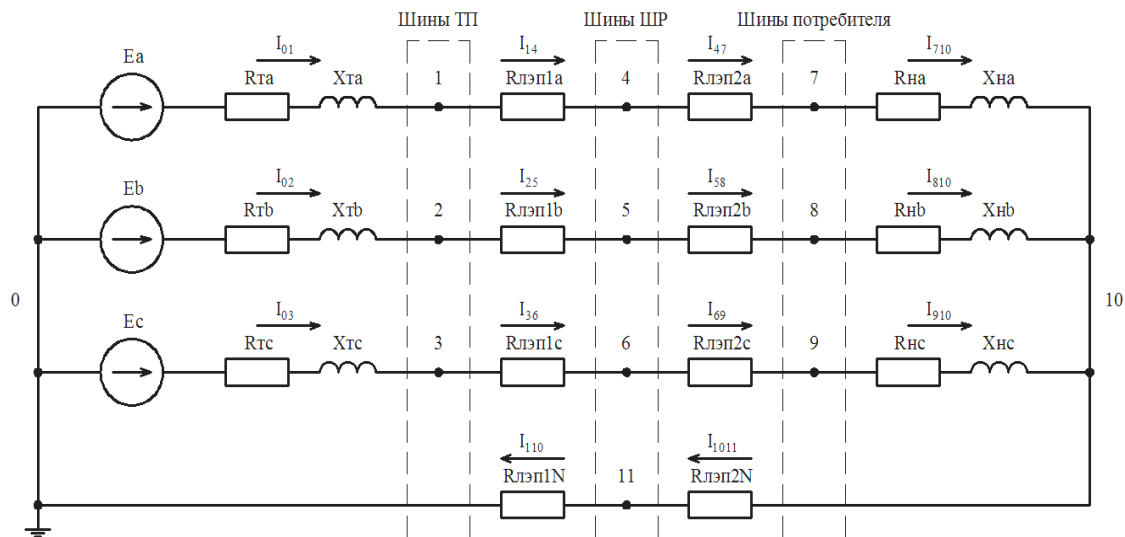


Рис. 1. Схема замещения цепи «Трансформаторная подстанция–потребитель»

Программу составляем следующим образом

1) начальному узлу  $i$  присваиваем значения первого столбца матрицы значений  $ID$ , а конечному узлу  $j$  присваиваются значения второго столбца матрицы  $ID$ .

2) формируем цикл вычислений значений ячеек матрицы инцидентий для заданного диапазона узлов и ветвей;

3) составляем матрицу проводимостей ветвей  $g_b$  как диагональную. При этом сопротивления потребителей  $R_n$  и  $X_n$  определяем по формулам:

$$R_n = \frac{U_{\text{ном}}^2}{P_{\text{ном}}}; X_n = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Q_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение потребителя;  $P_{\text{ном}}$  – номинальная активная мощность потребителя;  $Q_{\text{ном}}$  – номинальная реактивная мощность потребителя;

4) составляем векторную матрицу источников ЭДС ветвей  $E$ .

5) выполняем расчет матрицы суммы проводимостей ветвей  $G$ :

$$G = A \cdot g_b \cdot A^T; \quad (2)$$

6) производим расчет матрицы узловых потенциалов  $\Phi$ :

$$\Phi = G^{-1} \cdot (-A) \cdot g_b \cdot E; \quad (3)$$

7) по разнице узловых потенциалов, находим значение напряжения на потребителе.

$$U_{na} = |\Phi_7 - \Phi_{10}| = 218,861 \text{ В}, U_{nb} = |\Phi_8 - \Phi_{10}| = 221,04 \text{ В}, U_{nc} = |\Phi_7 - \Phi_{10}| = 225,157 \text{ В}.$$

Как видно из полученных значений, на самой загруженной фазе у потребителя самое низкое значение напряжения.

Разработанный в среде Mathcad алгоритм может быть использован в дальнейшем для тестирования программ по расчету несимметричных режимов трехфазных электрических сетей. Алгоритм является универсальным и позволяет выполнять расчеты для схем с большим количеством потребителей.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 638 с.

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

**А. М. Далинчук**

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

Научный руководитель Г. И. Селиверстов

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

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

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 варианта компактной ВЛ 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 различным 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 ( $r_0$ ,  $x_0$  – активное и индуктивное сопротивление;  $b_0$  – емкостная проводимость) принимались на основании данных [1, 3]. Электрические параметры сеточной двухрядной линии приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Удельные параметры сеточной двухрядной линии напряжением 110 кВ

Удельные параметры	Параметры сеточной двухрядной линии для различных сечений проводов				
	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24	АС-185/29	АС-240/32
$r_0$ , Ом/км	0,153	0,125	0,099	0,081	0,06
$x_0$ , Ом/км	0,153	0,153	0,154	0,154	0,155
$b_0 \cdot 10^{-4}$ , См/км	7,64	7,61	7,59	7,56	7,51

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

Результаты расчетов для линий различных конструкций с сечением проводов АС-95/16 приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что активные сопротивления сеточной двухрядной и традиционной двухцепной линий равны между собой, индуктивные сопротивления и зарядные мощности при равной длине линий отличаются существенно.

Таблица 2

#### 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	$Q_c$ , Мвар	$R_{л}$ , Ом	$X_{л}$ , Ом	$B_{л}$ , $10^{-4}$ , см	$Q_c$ , Мвар	$R_{л}$ , Ом	$X_{л}$ , Ом	$B_{л}$ , $10^{-4}$ , см	$Q_c$ , 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

Окончание табл. 2

Конструктивные и электрические параметры линий электропередачи												
L, км	R <sub>л</sub> , Ом	X <sub>л</sub> , Ом	B <sub>л</sub> , 10 <sup>-4</sup> , см	Q <sub>с</sub> , Мвар	R <sub>л</sub> , Ом	X <sub>л</sub> , Ом	B <sub>л</sub> , 10 <sup>-4</sup> , см	Q <sub>с</sub> , Мвар	R <sub>л</sub> , Ом	X <sub>л</sub> , Ом	B <sub>л</sub> , 10 <sup>-4</sup> , см	Q <sub>с</sub> , Мвар
	сеточная двухрядная				традиционная одноцепная				традиционная двухцепная			
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

Установлены, электрические параметры сеточной двухрядной линии: 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.

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 принята предельно передаваемая мощность для различных сечений с коэффициентом мощности, равным 0,93 (табл. 3).

Таблица 3

#### Максимальная передаваемая мощность для различных сечений проводов линий

Сечение провода	Режимные параметры линии электропередачи		
	P, кВт	Q, квар	S, кВА
АС-95/16	60,43	23,89	65
АС-120/19	69,75	27,57	75
АС-150/24	79,05	31,24	85
АС-185/29	93	36,76	100
АС-240/32	111,6	44,11	120

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. 4.

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

Длина линии <i>L</i> , 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

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.

#### Литература

1. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В. Т. Федин [и др.]. – Минск : Навука і тэхніка, 1993. – 224 с.
2. Далинчук, А. М. Оценка возможностей компактных воздушных линий сеточного типа / А. М. Далинчук // 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. 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. – М. : ЭНАС, 2017. – 374 с.



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ  
БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЧАСТНОГО ЖИЛОГО ФОНДА****Д. И. Веремеева, В. В. Павлов***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Д. И. Зализный

*Разработана методика имитационного моделирования суточных графиков электропотребления бытовых потребителей в частных жилых домах на основе логических рассуждений (эвристического анализа) и метода Монте-Карло. Полученные графики могут быть использованы для уточнения соответствующих типовых графиков электропотребления.*

**Ключевые слова:** электропотребление, график нагрузки, электроприемник, бытовой, частный дом

В Республике Беларусь в связи с вводом Белорусской атомной электростанции, поставлена задача увеличения процента использования электроэнергии для нужд потребителей в сельской местности. При этом возникает вопрос о возможности электрической сети обеспечить необходимую пропускную способность для осуществления снабжения потребителей электроэнергией в необходимом количестве и качестве. Для оценки пропускной способности линий электропередачи нужны типовые графики нагрузки потребителей, которые могут быть получены следующими способами:

- с помощью автоматических систем контроля и учета электроэнергии (АС-КУЭ);
- логическими рассуждениями (эвристически) о работе отдельных электроприемников (ЭП).

Целью работы является составление ожидаемых графиков нагрузки потребителей частного жилого фонда с помощью логических рассуждений, для дальнейшей оценки пропускной способности электрической сети.

Ожидаемые графики нагрузки должны представлять собой суточные профили активной мощности с интервалами  $P_i$ , в каждом из которых определены значения математического ожидания  $M(P_i)$  и среднеквадратического отклонения мощности  $\sigma(P_i)$ :

$$P_i = M(P_i) \pm \sigma(P_i). \quad (1)$$

В процессе исследований вначале были выбраны характерные ЭП для последующего формирования ожидаемого графика нагрузки: холодильник, внутреннее освещение, телевизор, утюг и т. д.. Для каждого типа ЭП на основе справочных данных определялся диапазон номинальных мощностей, а в качестве математического ожидания принимались значения номинальной мощности наиболее востребованной у потребителей марки ЭП. Если диапазон отклонения мощностей превышал 1 кВт, то за математическое ожидание считалось равным среднеарифметическому значению диапазона.

Значения  $\sigma(P_i)$  определялись в соответствии с правилом «трех сигм» [2]:

$$\sigma(P_i) = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{3}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{ном}}$  – максимальное отклонение номинальной мощности ЭП рассматриваемого типа от математического ожидания номинальной мощности этого ЭП.

Результаты расчетов для некоторых ЭП приведены в таблице.

#### Ожидаемые мощности бытовых приемников электрической энергии

Наименование ЭП	Диапазон мощностей, кВт	Математическое ожидание, кВт	Отклонение мощности, кВт	СКО, кВт
Телевизор	0,05–0,19	0,12	$\pm 0,07$	0,02
Внутреннее освещение	0,09–0,15	0,12	$\pm 0,03$	0,01
Холодильник	0,1–0,2	0,15	$\pm 0,05$	0,0167
Утюг	2–3	2,5	$\pm 0,5$	0,17

Далее на основании логических рассуждений были сформированы суточные графики потребления каждого ЭП для летнего и зимнего периода, а также для рабочих и выходных дней. Так, например, очевидно, что график нагрузки холодильника будет циклическим. Принято считать, что компрессорная установка в зимнее время включается 4 раза в ч. Тогда длительность одного цикла работы холодильника составит около 5,6 мин, а время его паузы будет около 9,4 мин.

Внутреннее освещение помещений жилого дома, а также телевизор, в рабочие дни, в основном, интенсивно эксплуатируются ранним утром приблизительно с 6:40 до 7:40 и вечером с 18:00 до 22:00.

Циклы включения утюга кратковременные и в рабочие дни его интенсивная эксплуатация будет иметь место утром с 7:00 до 7:15.

На рис. 1 показан пример полученного типового графика электропотребления для внутреннего освещения в зимний период в рабочий день.

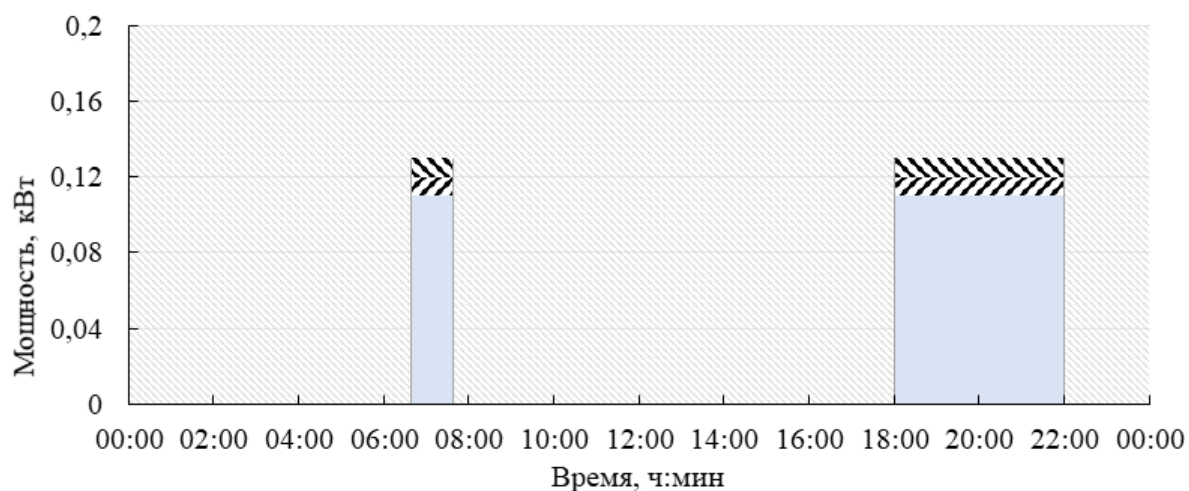


Рис. 1. Теоретически ожидаемый график потребления электроприемника «Освещение»

Для формирования суммарного суточного графика электропотребления был использован известный из математической статистики метод Монте-Карло [2]. При

каждом применении этого метода выполняется так называемый статистический розыгрыш на основе генератора случайных чисел и выражения (1).

Имитационная модель, которая вычисляет результат с учетом выбранных параметров, реализована в программе Excel. Был принят нормальный закон распределения, предполагающий, что вероятность выпадения значений постепенно падает с удалением от среднего [2].

На рис. 2 приведены два варианта статистических розыгрышей ожидаемых суточных графиков нагрузки для зимнего периода в рабочий день.

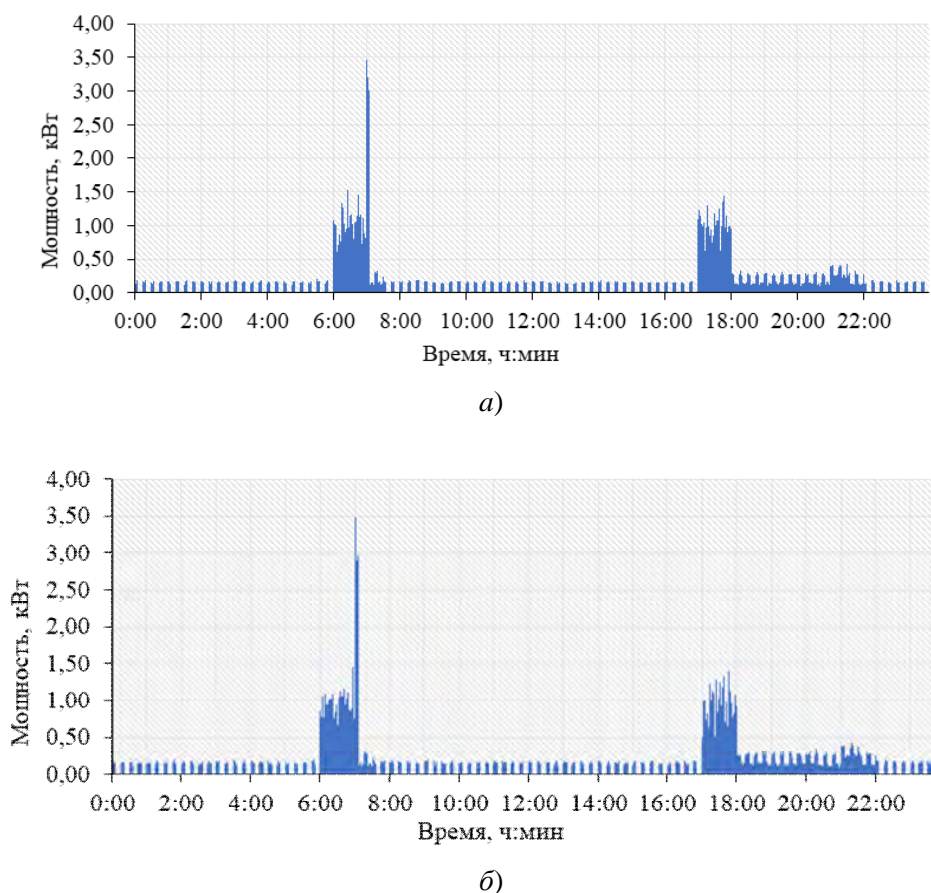


Рис. 2. Статистические розыгрыши суточных графиков электропотребления

Полученные графики носят субъективный характер, но дают достаточно логичные и наглядные примеры значений электропотребления в разные часы суток. На графиках видны пики нагрузки в утренние и вечерние часы. Периодически имеются всплески электропотребления, характерные для таких мощных ЭП, как утюг.

Дальнейшая задача исследований: использовать полученные графики в дополнение к графикам, формируемым на основе данных АСКУЭ, с целью получения максимально адекватных типовых графиков электропотребления бытовых потребителей в частных жилых домах.

#### Л и т е р а т у р а

1. Калинина, В. М. Математическая статистика : учебник / В. М. Калинина, В. Ф. Панкин – М. : Дрофа, 2002. – 336 с.
2. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс. – М. : Статистика, 1976. – 598 с.

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

М. С. Манюкевич

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

Научный руководитель С. Г. Жуковец

*Рассматривается задача передачи и сбора технологических данных в сетях информационно-управляющих систем энергетического назначения. Данная технология позволяет передавать любой вид информации сразу на несколько узлов сети, что в свою очередь обеспечивает безопасность, прозрачность и неизменность данных.*

**Ключевые слова:** цифровой двойник, электрические сети, надежность, безопасность, моделирование, эффективность.

В энергетической отрасли существует ряд проблем, для решения которых можно применить технологию цифровых двойников, позволяющие установить точную связь между физическим и цифровым мирами, решить технические проблемы, с которыми сталкивается развитие энергетики, а также поддерживать точное моделирование и контроль энергетических сетей с разных точек зрения.

### **1. Ключевые технологии цифровых двойников для электрических сетей**

#### **1.1. Облачная платформа для совместной работы цифровых двойников**

Умные электрические сети включают физическое оборудование во многих областях, где сбор данных становится сложным, а объем данных растет в геометрической прогрессии. Обычные платформы обслуживания данных больше не могут отвечать требованиям быстрой и точной обработки данных, и существует острая необходимость в создании облачной платформы для совместной работы цифровых двойников. Путем установления «канала передачи данных», общей библиотек алгоритмов и моделей достигается эффективное совместное разделение труда для задач анализа разных данных из нескольких источников, тем самым закладывая основу для применения цифровых двойников.

#### **· Проектирование «канала передачи данных» электрических сетей.**

Структура проектирования, производственный процесс, параметры производительности, рабочие параметры и т. д. каждого компонента оборудования электрических сетей будут влиять на эксплуатацию сетей. Проектирование «цепочки данных» всего процесса, основанной на сборе, передаче, анализе и выводе данных, требует изучения взаимосвязей между «цепочкой данных» и процессом всего цикла. Взаимосвязь между сущностями и виртуальными объектами и облаке сервисов использует базы данных и интеллектуальные алгоритмы машинного обучения для формирования метода проектирования «цепочки данных» полного цикла.

#### **· Общая библиотека интеллектуальных алгоритмов для облачных и периферийных сервисов.**

Создается точная и динамическая расширяемая библиотека интеллектуальных алгоритмов для облачных и периферийных сервисов, чтобы ускорить распределенные вычисления электрических сетей и добиться эффективного использования вычислительных хранилищ и других компьютерных ресурсов. Она представляет собой общую библиотеку алгоритмов для электрических сетей с разумной системой, полным тестированием и достаточной проверкой, включая библиотеку алгоритма очистки данных, библиотеку алгоритма извлечения признаков снижения производительности и библиотеку алгоритма прогнозирования тенденций состояния. Что

особенно важно, развертывание приложений профессиональных алгоритмов на основе системы совместной работы в периферийном облаке может реализовать проверку экземпляров и итеративный рост алгоритмов.

### **Общая библиотека усовершенствованных моделей оборудования электрических сетей**

Усовершенствованная библиотека моделей оборудования электрических сетей поможет добиться более точной и персонализированной модели. Создав механизм взаимодействия данных на границе облака, чтобы предоставить необходимые данные и интерактивные интерфейсы для модели цифрового двойника для достижения связи данных. Исследуя облачные и периферийные технологии сокращения и объединения многомерных данных, можно проектировать сложные механизмы обработки событий, разрабатывать библиотеки моделей электрических сетей.

### **1.2. Технология эффективного моделирования и гибридного моделирования электрических сетей**

Электрические сети состоят из механических, электрических и информационных систем и требуют всестороннего, комплексного и реалистичного моделирования и симуляции. Путем передачи виртуальной и реальной информации и загрузки ее в модель цифрового двойника создается гибридный метод «управляемый моделью + управляемый данными» для выполнения моделирования с высокой степенью приближения, а также прогнозирования и производительности на уровне компонентов и системы. Электрические сети в сложных условиях работы можно реализовать в виртуальной среде.

Неопределенность и сложность электрических сетей очевидны. Однако в существующем анализе состояния обычно используются заранее установленные упрощенные модели механизмов и вводятся упрощенные ограничения в практических приложениях. В результате модели, отвечающие требованиям к производительности, не могут быть получены в сложных средах. Обычные методы, основанные на данных, не могут описать ограничения объективных физических законов, поэтому ни методы, основанные на моделях, ни методы, основанные на данных, сами по себе не могут удовлетворить требования интеллекта и своевременности электрических сетей. Основанный на гибридной технологии моделирования «управляемой моделью + управляемой данными» с помощью алгоритма балансировки категорий, обучения данных сети политики и сети ценностей, он преодолевает проблему дисбаланса и отсутствия категорий исходных данных. Методы инверсии и идентификации параметров, основанные на экономичном обучении и машинном обучении, преодолевают недостатки модели механизма, которую сложно моделировать и игнорировать некоторые особенности. Интегрированный алгоритм обучения технологии гибридного моделирования используется для повышения обобщающей способности метода оценки рабочего состояния сети.

### **1.3. Механизм защиты информационной безопасности технологии цифровых двойников.**

Электрические сети представляет собой сложную систему с различными подсистемами, соединенными информационной сетью и обладающую высокой степенью сетевой зависимости. От надежности обмена информацией зависит, сможет ли система работать нормально. Проблемы с безопасностью любого устройства могут привести к утечке системных данных. Учитывая риски взлома, с которыми могут сталкиваться цифровые двойники, необходимо изучить технологии обнаружения сетевых атак и защиты для повышения безопасности операций электрических сетей.

**Создание набора характерных атрибутов, связанных с атаками на целостность данных.**

Анализ модели цифрового двойника и физических характеристик связи параметров для электрических сетей, разработка алгоритмов извлечения признаков на основе искусственного интеллекта для сетевых данных, передаваемых интеллектуальными терминалами, содержащих гетерогенную информацию из нескольких источников, а также динамическая оптимизация и выбор наиболее главных функций, связанных с атаками на целостность данных. Оптимальный набор атрибутов объекта, а затем извлечение его глубоких функций модели.

**Создание механизма доступа к оценке рисков безопасности.**

На основе методов искусственного интеллекта, статистики и теории информации создать механизм доступа к оценке рисков безопасности. Провести анализ больших данных по каждой подсистеме, подключенной к электрической сети, и количественно оценить риски информационной безопасности каждой подсистемы. Когда значение риска подсистемы превышает определенный установленный порог, доступ к подсистеме ограничивается для достижения контроля на основе оценки риска безопасности.

Благодаря быстрому развитию и применению цифровых технологий нового поколения, представленных облачными вычислениями, большими данными, искусственным интеллектом и т. д., технология цифровых двойников имеет широкие перспективы развития в отрасли энергетики. С наступлением эпохи 5G и больших данных приложение цифрового двойника электрических сетей обеспечит надежную и гибкую технологическую поддержку для преобразования и модернизации энергетической отрасли.

**ОПТОВОЛОКОННЫЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ В ОПЕРАТИВНЫХ ЦЕПЯХ ПОДСТАНЦИЙ**

**Д. А. Ганущак**

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

Научный руководитель Т. В. Алферова

*Рассмотрены преимущества и перспективы применения оптоволоконных связей как передового средства обмена информацией внутри подстанций.*

**Ключевые слова:** инновационные технологии, цифровая подстанция, оптоволокно, интеллектуальная сеть, безопасность, надежность, связь.

Появление сети Интернет в электроэнергетической отрасли вызвало большой рост трафика данных между подстанциями и диспетчерскими. Параллельно этому явлению актуальной стала проблема ограничения возможности передачи информации из-за физических свойств медного кабеля, так как его сопротивление и шум ограничивали применение каналов связи до относительно коротких линий. Решением этой проблемы стало применение оптоволоконных каналов связи [1].

Волоконно-оптическая связь (ВОЛС) – способ передачи информации, использующий в качестве носителя информационного сигнала электромагнитное излучение оптического (ближнего инфракрасного) диапазона, а в качестве направляющих систем – волоконно-оптические кабели. Благодаря высокой несущей частоте и широким воз-

возможностям мультиплексирования пропускная способность волоконно-оптических линий многократно превышает пропускную способность всех других систем связи и может измеряться терабитами в секунду.

И ядро, и демпфер изготавливаются из кварцевого стекла, при этом показатель преломления ядра несколько выше, чем показатель преломления демпфера, чтобы реализовать явление полного внутреннего отражения. Для этого достаточно разницы в сотые доли – например, ядро может иметь показатель преломления  $n_1 = 1,468$ , а демпфер – значение  $n_2 = 1,453$ . Наглядное изображение преломления света в оптическом волокне показано на рис. 1.

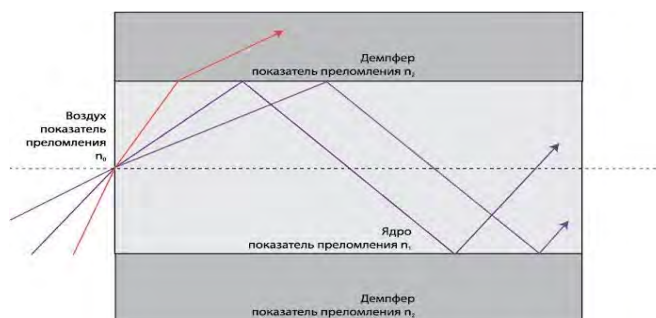


Рис. 1. Преломление света в оптическом волокне

Преимуществами оптоволоконной связи являются:

- значительное сокращение кабельных связей;
- возможность диагностики и выявления места повреждения;
- высокая помехозащищенность и повышенная электромагнитная совместимость вторичного оборудования благодаря переходу на оптические линии связи;
- высокая скорость передачи данных;
- очень низкие потери сигнала (менее 0,5 дБ/км), что позволяет держать соединения на расстоянии нескольких километров без необходимости усиления. Потери в оптоволоконной и коаксиальной кабеле в зависимости от частоты приведены на рис. 2 [2].

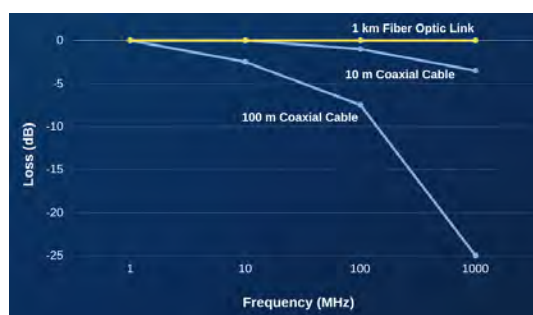


Рис. 2. Потери в оптоволоконной и коаксиальной кабеле в зависимости от частоты

К недостаткам оптоволоконной связи можно отнести ее хрупкость и дороговизну.

Оптоволоконная связь применяется в линиях связи между устройствами и сетевым оборудованием на цифровых подстанциях. Реализуется она непосредственно линиями связи между устройствами и сетевым оборудованием. Линия связи выполнена оптоволоконными кабелями или защищенными патчкордами. Сетевое оборудование представляет собой коммутаторы и преобразователи интерфейсов. Главная



задача этого оборудования – сбор информации от всех устройств цифровой подстанции без задержек и потери пакетов данных. Чаще всего используются стоечные коммутаторы, так как они обладают всеми необходимыми параметрами для обеспечения надежного канала связи. Потоки протоколов GOOSE, MMS и SW проходят без задержек и с наивысшим приоритетом. Пример такого коммутатора приведен на рис. 3.



Рис. 3. Стоечный коммутатор FL SWITCH 4800

Монтаж ВОЛС – это разводка и подключение входящего оптоволоконного кабеля непосредственно в точке назначения: в серверной, дата-центре и т. д. Для этого кабель заводится в оптический кросс и волокна подсоединяются к разъемам. На этом этапе используется такая группа, как оптические компоненты – патч-корды, пигтейлы, адаптеры (розетки) и всякого рода зажимы. Их также объединяют под названием пассивное оптоволоконное оборудование.

Пигтейл – это кусок оптического кабеля, оконцованный коннектором только с одной стороны. Патчкорд имеет коннекторы на обоих концах, типы разъемов при этом могут отличаться (переходной патч-корд) или быть одинаковыми (соединительный). Оптический адаптер – это разъем, в который подключается пигтейл или патч-корд.

Классификация оптических пигтейлов, патч-кордов и адаптеров основана на следующих параметрах: стандарт коннектора (разъема); тип шлифовки; тип волокна (многомодовое или одномодовое); тип коннекторов (одинарный или дуплекс).

SC/UPC-LC/UPC MultiMode Duplex. SC и LC – это типы коннекторов. Так как в данном случае два разных типа разъема, то используется патч-корд – переходник; UPC – тип шлифовки; Multimode – вид волокна – многомодовое волокно, также может быть обозначение аббревиатурой MM. Одномодовое маркируется как SingleMode или SM; Duplex – два разъема в одном корпусе для более плотного расположения. Обратный случай – это Simplex, один коннектор.

На практике в монтаже чаще всего применяется коннекторы FC, LC, SC.

FC – старый, наиболее надежный в эксплуатации вариант. Отличное качество соединения, особенно FC/UPC, FC/APC подпружиненное соединение, за счет чего достигается «вдавливание» и плотный контакт.

SC – более дешевый и удобный, но менее надежный аналог FC. Легко соединяется (защелка), разъемы могут располагаться плотно.

LC – уменьшенный аналог SC. За счет малого размера применяется внутри помещений, там, где требуется высокая плотность расположения разъемов.

При использовании оптоволоконных каналов связи необходимо учитывать следующие критерии и условия применения данной технологии:

1) наличие квалифицированного персонала, способного произвести оценку проекта, принять участие в монтаже, наладке и приемке оборудования в работу.



Значительное упрощение проектирования и монтажа энергетических объектов, комплекс РЗА которых построен с применением оптоволоконных связей контрастирует с усложнением эксплуатации, увеличением интеллектуальной составляющей в работу обслуживающего персонала, расширением диапазона специфических знаний, необходимых для эксплуатации комплекса РЗА.

2) наличие нормативной базы, позволяющей внедрять рассматриваемые технологии.

Применяемые подходы к решению задач, возложенных на комплекс РЗА энергообъекта, не всегда соответствуют действующим технологическим нормам проектирования, правилам устройства электроустановок, действующим техническим нормативным правовым актом ТНПА. В Республике Беларусь внедрен СТП 33240.20.117-18 «Цифровые подстанции. Требования к проектированию», однако, данный нормативный акт требует постоянной усовершенствования с учетом опыта, получаемого при проектировании, монтаже, и эксплуатации реальных энергообъектов;

3) наличие у эксплуатирующей организации современных испытательных и диагностических средств, устройств и приборов для монтажа и ремонта применяемых линий связи.

Таким образом, применение оптоволоконных каналов связи в качестве средства передачи информации на подстанциях является перспективной технологией на ближайшее будущее, и каждый, кто занимается эксплуатацией комплексов РЗА, построенных с применением оптоволокна, должен обладать специфическими знаниями в этой области. При этом оптоволокно более надежно, чем многие другие каналы связи и, следовательно, оно будет востребовано до тех пор, пока не появятся более совершенные виды связи.

#### Л и т е р а т у р а

1. Substation Communications. – Режим доступа: <https://clck.ru/39sS3C>. – Дата доступа: 04.04.2024.
2. RF over Fiber Guides. – Режим доступа: <https://clck.ru/39sS2H>. – Дата доступа: 04.04.2024.

## ПОМЕХОГЕНЕРИРУЮЩЕЕ СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЕГО ВКЛАД В ИСКАЖЕНИЕ КРИВЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

**М. А. Вегера**

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

Научные руководители: Т. В. Алферова, О. Г. Широков

*Рассмотрены проблемы искажения формы напряжения, вызванные гармоническими составляющими тока, потребляемого сварочными аппаратами.*

**Ключевые слова:** сварочные аппараты, качество электроэнергии, помехогенерирующее оборудование.

В современном мире в промышленности широко используются различные электроприемники, например, сварочные аппараты, которые генерируют высшие гармоники в сеть.

В настоящее время сварка плавлением, (электродуговая сварка), является одним из наиболее распространенных технологических процессов сварочного производства. Существует много предприятий, которые применяют установки дуговой и контактной сварки с инверторными и выпрямительными источниками питания.

Нелинейные нагрузки генерируют в электрическую сеть высшие гармоники тока, которые приводят к потерям в сетевых проводах, оборудовании и нагрузках, а также к ухудшению электромагнитной совместимости.

Трансформаторные сварочные источники имеют относительно низкую цену, высокую надежность, простоту конструкции, возможность модернизировать их для повышения технических, эксплуатационных и экономических характеристик. Из недостатков таких источников: низкий КПД, большой вес и габариты, сильная просадка напряжения сети, возможность варить только черные металлы.

Выпрямительные источники питания конструктивно почти такие же, как и трансформаторные но имеют выпрямительный блок, за счет которого получается постоянный ток. Достоинством таких источников является простота в обслуживании, высокая мощность, стабильная дуга, но так же, в свою очередь, имеет такие недостатки как большая масса и габариты, вызывает просадку напряжения сети и потребляет большое количество электроэнергии.

Было проведено исследование гармоник тока и напряжения однофазных сварочных источников питания, питающихся от сети переменного тока частотой 50 Гц:

– однофазного сварочного источника питания с конденсаторным умножителем напряжения ВДУ-201;

– трехфазного сварочного выпрямителя ВДУ-305;

– универсального трехфазного транзисторного инверторного источника питания TransPulsSynergicTPS 5000 фирмы Fronius.

На рис. 1, приведена диаграмма гармонических составляющих тока и напряжения для однофазного сварочного источника питания с конденсаторным умножителем напряжения ВДУ-201.

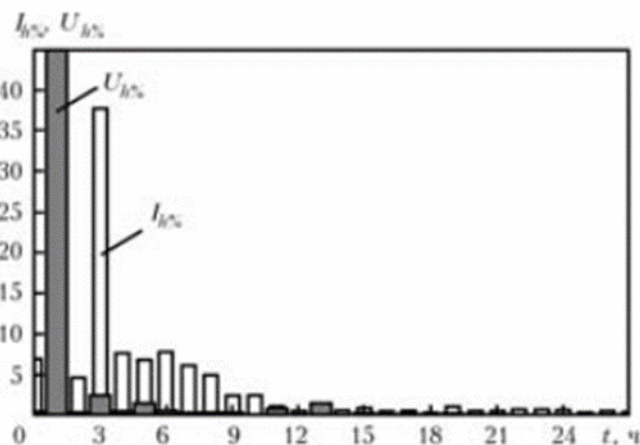


Рис. 1. Гармонический состав тока и напряжения однофазного сварочного источника питания с конденсаторным умножителем напряжения ВДУ-201

Оценка диаграммы показывает, что в питающей сети при работе однофазного сварочного источника питания с конденсаторным умножителем напряжения выражены практически все нечетные гармоники тока, в частности, 3-я гармоника тока, составляющая 75,1 от 1-й гармоники, 5-я – 39,6 %, 7-я – 10,6 %, 9-я – 8,4 %, 11-я – 7,3 %, 13-я – 1,3 %, 15-я – 3 %, 17-я – 2,5 %, 21-я – 2 %, 27-я – 1,2 %.

Нечетные номера гармоник напряжения более 1 % от 1-й гармоники 3-я – 5,3 %, 5-я – 2,3 %, 7-я – 1,5 %. Постоянная составляющая тока и напряжения отсутствует. Четные гармоники тока выражены незначительно. Коэффициенты нелинейных ис-

кажений тока и напряжения источника питания ВДИ-200 составляют  $\text{THD}_I = 87,3 \%$ ,  $\text{THD}_U = 6 \%$ ,  $K = 7,3$ .

На рис. 2, приведена диаграмма гармонических составляющих тока и напряжения для сварочного выпрямителя ВДУ-305

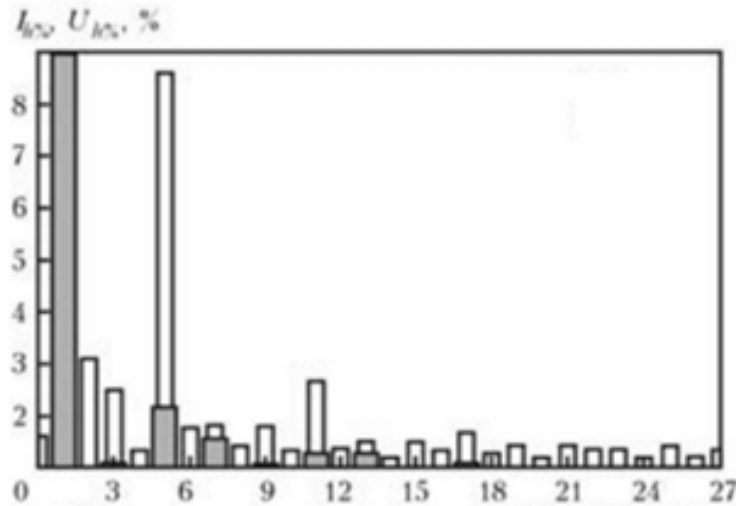


Рис. 2. Гармонический состав тока и напряжения трехфазного сварочного выпрямителя ВДУ-305

Оценка диаграммы показывает, что в питающей сети при работе трехфазного сварочного выпрямителя ВДУ-305 выражены 3-я гармоника тока, составляющая 3 % от 1-й, 5-я – 15,3 %, 7-я и 9-я – 1,5 %, 11-я – 3,5 %, 13-я – 1,1 %, 17-я – 1,4 %, остальные нечетные гармоники тока не превышают 1 %.

На рис. 3 приведена диаграмма гармонических составляющих тока и напряжения для универсального трехфазного транзисторного инверторного источника питания TransPulsSynergicTPS 5000 фирмы Fronius.

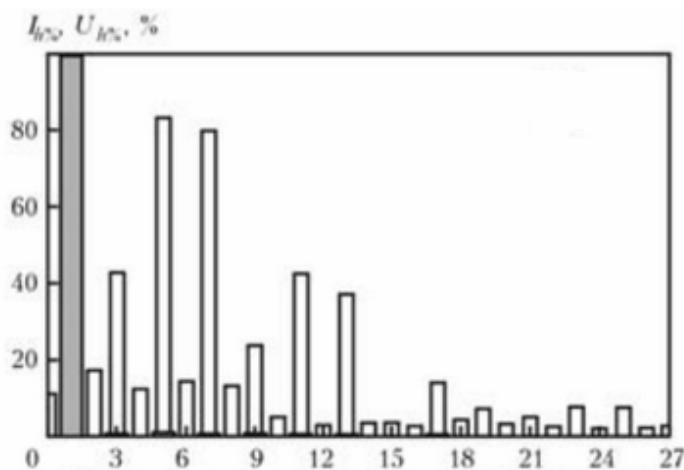


Рис. 3. Гармонический состав тока и напряжения универсального трехфазного транзисторного инверторного источника питания TransPulsSynergicTPS 5000 фирмы Fronius

Оценка диаграммы показывает, что в питающей сети при работе универсально-трехфазного транзисторного инверторного источника питания выражены 3-я гармоника тока, составляющая 24,4 % от 1-й гармоники, 5-я – 6,6 %, 7-я – 8,8 %, 9-я – 2,5 %, 11-я – 2,2 %, 13-я – 1,5 %, 15-я – 2,5 %, 17-я – 1,4 %, 23-я – 1,2 %, остальные нечетные гармоники тока не превышают 1 %.

Таким образом, сварочные аппараты оказывают пагубное влияние на качество электроэнергии из-за высоких пусковых токов и импульсов, которые они генерируют. Это может привести к перегрузкам и перегреву электросетей, а также вызвать скачки напряжения и нестабильность в энергосистеме. Более того, использование сварочных аппаратов без регулярной проверки и обслуживания может привести к повреждениям оборудования и авариям. Поэтому важно соблюдать все меры предосторожности при работе с такими устройствами и обеспечивать правильное обслуживание оборудования для предотвращения возможных проблем с качеством электроэнергии.

#### Литература

1. Оценка потерь электрической энергии, вызванных несинусоидальными режимами, при расчете небалансов системных подстанций 10 кВ / Широков, О. Г. [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – 2015. – Т. 1, № 1 (60). – С. 81–90.
2. Электромагнитная совместимость источников питания сварочной дуги / И. В. Пентегов [и др.] // Электротехника и Электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 34–40.
3. Электрооборудование и электроснабжение электротехнологических установок: / А. Н. Миронова, Ю. М. Миронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ИНФРА-М, 2021. – 470 с.
4. Рымар С. В. Влияние сварочных источников питания на трехфазную электрическую сеть / С. В. Рымар, А. М. Жерносеков, В. Н. Сидорец // Автомат. сварка. – 2011. – № 10. – С. 49–55.

### АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ОТ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ

**М. А. Вегера, К. Е. Коршунов, И. Д. Костюченко**

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

Научный руководитель Ю. А. Рудченко

*Представлены основные документы, регламентирующие заземление конструкций, расположенных вдоль электрических железных дорог в странах Евросоюза и Республики Беларусь. Дано описание основных заземляющих систем, применяемых за рубежом на участках постоянного тока, а также описана конструкция системы заземления с применением дополнительного заземлителя, которая используется на высокоскоростном электрофицированном железнодорожном транспорте, работающий на переменном токе.*

**Ключевые слова:** блуждающие токи, дренаж, электрофицированные железные дороги.

Основной проблемой электрифицированного железнодорожного транспорта является блуждающие токи и влияние их на сооружения находящиеся рядом с железной дорогой. Величина блуждающих токов и степень их влияния на конструкции контактной сети напрямую зависит от способа их заземления.

В Беларуси ведется исследование инновационных заземляющих устройств постоянного и переменного тока. Основной идеей этих заземляющих устройств является применение протяженного заземлителя дренажного типа и отказ от заземления опор на рельсовую сеть.

В настоящее время на территории Беларуси функционируют достаточно много

железных дорог, которые электрифицированы на постоянном токе. Нормативным документом о работе железной дороги в Беларуси являются: закон Республики Беларусь «О железнодорожном транспорте»; РД РБ БЧ 55.012–97 – Инструкция по защите железнодорожных подземных сооружений от коррозии блуждающими токами.

В то же самое время в странах Европейского союза системы электроснабжения постоянного тока используются исключительно для питания метрополитена и пригородных линий, а также считаются устаревшими.

Основным документом, регламентирующим работу железных дорог стран Евросоюза, является директива 2008/57/ЕС о функциональной совместимости железных дорог внутри Евросоюза. На основании этого документа составляются технические требования к эксплуатационной совместимости (в оригинале TSI). Этот документ регламентирует электробезопасность, заземление и обратные контуры. Он состоит из трех частей:

- 1) TSI 50122 - 1 – защитное оборудование от поражения электрическим током.
- 2) TSI 50122 - 2 – оборудование, направленное против влияния блуждающих токов, создаваемых железными дорогами постоянного тока.
- 3) TSI 50122 - 3 – взаимное влияние железных дорог постоянного и переменного тока.

Далее будут рассмотрены основные зарубежные системы заземления, применяемые на электрических железных дорогах. В контексте нашей страны особенно важными являются системы, используемые на железных дорогах постоянного тока. К ним относятся: система «глухого» заземления; изолированная система; система дренажных слоев.

Как уже упоминалось ранее, за границей система электроснабжения постоянного тока используется лишь на метрополитенах и пригородных линиях.

**Система «глухого» заземления.** Схема этой системы представлена на рис. 1. Отрицательный полюс каждой подстанции подключается к отдельной заземляющей сети, обходя все сопротивления в заземляющем контуре. Таким образом, обратный контур, образуемый рельсами, фактически становится параллельным земле, что увеличивает риск коррозии подземных конструкций вблизи путей из-за возможного протекания значительной части обратного тока через землю. Стоит отметить, что данная система считается устаревшей и на современных линиях не применяется.

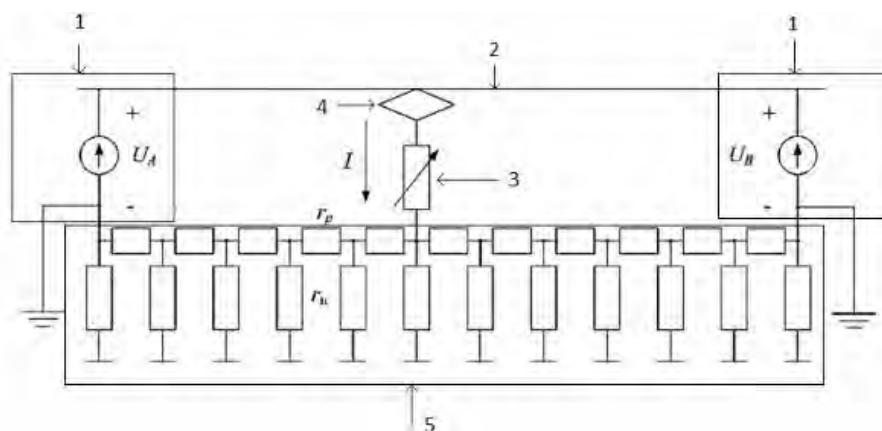


Рис. 1. Схема системы «глухого» заземления:  
1 – питающая подстанция; 2 – контактный рельс; 3 – поезд;  
4 – подвижной контакт; 5 – рельсы

**Изолированная система.** Отличие этой схемы от предыдущей заключается лишь в том, что отрицательный полюс подстанции не имеет отдельного заземления. Этот вариант характеризуется уменьшенным значением величины блуждающих токов, но при этом возникает увеличенный потенциал рельсов относительно земли, что представляет опасность для персонала обслуживания. Такая конфигурация также признается устаревшей.

**Система дренажных слоев.** Соответствующая схема представлена на рис. 2.

Данная система базируется на применении вдоль железнодорожной линии особых дренажных слоев, расположенных под землей вдоль оси пути. Дренажным слоем является обычная заземляющая сетка. Каждый слой дренажа соединяется с соседним. Слои, которые находятся у подстанций, дополнительно подключаются к отрицательному полюсу каждой из подстанций через диодный блок. Отрицательный полюс подстанций также имеет возможность соединения с поверхностью земли через диодный блок. Стоит отметить, что в качестве дренажных слоев можно использовать железобетонные конструкции нижнего строения пути.

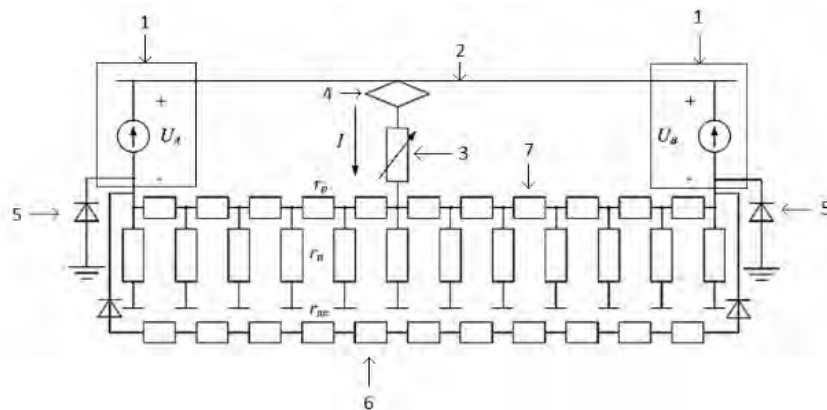


Рис. 2. Схема системы дренажных слоев:

1 – питающая подстанция; 2 – контактный рельс; 3 – поезд;  
4 – подвижный контакт; 5 – диодный блок; 6 – дренажный слой; 7 – рельсы

Учитывая указанные требования европейских стандартов, можно рассмотреть систему, реализованную на высокоскоростной линии SUI - YU в Китае. Система называется IGL (integrated grounding line), и переводится как встроенная заземляющая линия; IGL – голый медный проводник, проложенный вдоль пути параллельно ему. Также он делится на секции и подключается к нейтральным точкам дроссель-трансформаторов. Вдоль железной дороги все заземляемые конструкции соединяются с IGL. Схем системы с применением IGL представлена на рис. 3.

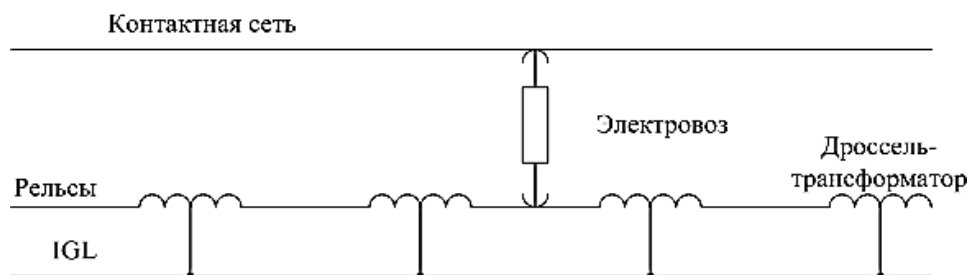


Рис. 3. Схема соединения IGL с рельсовой сетью

Инновационные заземляющие устройства опор контактной сети, которые изучаются в Беларуси, основаны на том же принципе – использовании дополнительных заземляющих проводников. Они отличаются от описанных систем. Самое главное отличие заключается в том, что за рубежом дополнительные провода заземления крепятся к опоре или к поверхности земли, в то время как в инновационных заземляющих устройствах дренирующий протяженный заземлитель располагается под землей, что дополнительно способствует снижению величины блуждающих токов в земле вокруг железной дороги, а также защищает конструкции контактной сети от электрокоррозионных повреждений.

Данная работа представляет собой описание основных систем заземления, которые используются на железных дорогах зарубежных стран. В Евросоюзе приняты основные документы, которые регулируют заземление конструкций, которые расположены вдоль железных дорог. Стоит отметить, что в этих документах указано, что для защиты от косвенного контакта с токоведущими частями, предпочтительным является их соединение с обратным проводом или рельсом. Однако, несмотря на это, на Европейских дорогах применяются системы с использованием дополнительных заземляющих проводов, которые также применяются на Китайских железных дорогах.

#### Литература

1. European standard EN 50122 - 1. Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 1: Protective provisions against electric shock. European standard EN 50122 - 1. January 2011.
2. European standard EN 50122 - 2. Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems. October 2010.
3. European standard EN 50122 - 3. Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 3: Mutual Interaction of a.c. and d.c. traction systems. October 2010.
4. Directive 2008/57/EC of the European parliament and of the council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community.

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА И ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**И. Д. Костюченко**

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

Научные руководители: Т. В. Алферова, О. Г. Широков

*Рассмотрена область применения современных источников света и сравнение их электрических характеристик на примере светильников разных видов.*

**Ключевые слова:** современные источники света, электрические характеристики, область применения.

В настоящее время наиболее распространенными источниками света являются светодиодные. С момента создания область применения светодиодных источников света существенно расширилась, так как сначала они применялись исключительно в электронных устройствах в качестве ламп индикации и оповещения, поскольку тогда еще не был изобретен синий светодиод, а сегодня они применяются повсеместно,

начиная от использования в приборах, в автомобилях и заканчивая освещением квартир, улиц и проспектов.

Преимуществами светодиодных источников света являются: высокая светоотдача, высокая экономичность, длительность работы, устойчивость к воздействию низких температур, отсутствие токсичных составляющих, имеют крайне низкий коэффициент пульсаций [1]. В свою очередь эти источники имеют некоторые недостатки, такие как: относительно высокая цена, низкая предельная температура.

Рассмотрим электрические характеристики светодиодных светильников на примере светильника «Феникс», предназначенного для освещения автомагистралей, дорог, улиц, площадей, мостов, парковых зон и зон отдыха, железнодорожных платформ, внутриквартальных и дворовых территорий, спортивных площадок, автостоянок и паркингов. Обозначение светильника – ДКУ01-96x2-001 У1; световой поток – 24000 лм; мощность – 217 Вт; габаритные размеры – 810 x 2; срок гарантии – 5 лет.

Индукционные источники света основаны на принципе электромагнитной индукции и газовом разряде для генерации видимого света [1]. Отсутствие нитей накаливания и подогреваемых катодов значительно увеличивает срок службы лампы. Индукционная лампа состоит из трех основных частей: газоразрядной трубки, электронного балласта (генератора высокочастотного тока) и магнитного кольца с индукционной катушкой.

Индукционные источники света применяются для наружного и внутреннего освещения, особенно в местах, где требуется хорошее освещение с высокой светоотдачей, длительным сроком службы: улицы, магистрали, тоннели, промышленные и складские помещения, производственные цеха, автостоянки, стадионы. Ввиду присутствия высокочастотных электромагнитных излучений не рекомендуется установка в аэропорты, железнодорожные станции, автозаправочные станции.

Преимущества индукционной лампы: длительный срок службы (благодаря безэлектродному исполнению и качественному электронному балласту срок службы значительно выше, чем у традиционных источников света, и составляет свыше 60 000 часов); превосходная светоотдача (составляет свыше 80 лм/Вт, а существующие технологии позволяют создать лампу со светоотдачей порядка 300–400 лм/Вт); высокий уровень светового потока после длительного использования (после 60000 часов уровень светового потока составляет свыше 80 % от первоначального); мгновенное включение/выключение; высокий индекс цветопередачи ( $R_a > 80$ , что благоприятно сказывается на восприятии оттенков цветов, в отличие от натриевых ламп ( $R_a > 30$ ), которым присущ оранжевый оттенок света и неестественная цветопередача); широкая линейка номинальных напряжений (120/220/277/347В, 12/24DC) и мощностей (12–500 Вт); широкий диапазон цветовых температур (2700К–6500К) от теплого белого до дневного света, мягкий и естественный излучаемый свет; отсутствие мерцаний; низкая температура нагрева лампы (ниже 85 °С); возможность диммирования (изменения интенсивности света) от 30 % до 100 %; высокий коэффициент мощности балласта ( $\lambda > 0,95$ ); низкие гармонические искажения ( $THD < 5$  %); экологичность продукта [1].

К недостаткам можно отнести: особые требования к эксплуатационным условиям; высокую стоимость.

Рассмотрим электрические характеристики индукционного светильника «LVD 03-022» предназначенного для освещения промышленных цехов, складов и других помещений высотой более 5 метров. Светильник не боится влаги и пыли благодаря силиконовым уплотнителям. Корпус имеет подвесное крепление на крюк и выполнен из алюминиевого сплава методом литья под давлением и устойчив к пере-



падам температур и коррозии, имеет закаленное стекло с высокой прочностью и светопропускающей способностью. Кривая света разработана специально для цехов и складов. Светильники обладают следующими параметрами: световой поток – 12000 лм; напряжение питания – 220 В; степень защиты – IP54; срок гарантии – 5 лет.

Люминесцентные источники света относятся к газоразрядным, в которых видимый свет излучается в основном люминофором, который в свою очередь светится под воздействием ультрафиолетового излучения разряда. Принцип свечения в них базируется на разогреве, вольфрамового элемента. Электрический разряд в смеси инертных газов и паров ртути, который содержится в стеклянной колбе, вызывает излучение в ультрафиолетовом спектре, (т. е. невидимом для человека). Люминесцентные лампы нашли широкое применение в освещении общественных зданий: школ, больниц, офисов. Их целесообразно применять для общего освещения, прежде всего, помещений большой площади. Широко применяются также и в местном освещении рабочих мест, в световой рекламе, подсветке фасадов.

Достоинства люминесцентных источников света: производят больше света при меньших затратах электроэнергии; долгий срок использования. Люминесцентная лампа обычно работает в 8–10 раз дольше лампы накаливания; во время работы температура энергосберегающей лампы не превышает 60 °С (лампы накаливания – 95 °С); отсутствует мерцание.

Недостатками такого вида освещения являются: высокая цена; срок исправной работы (зависит от частоты включения и выключения питания — чем чаще щелкать выключателем, тем быстрее лампа выйдет из строя); содержание паров ртути, которые являются ядовитыми для людей.

При выборе источников света следует руководствоваться основными критериями, такими как обеспечение нормируемых параметров освещенности, комфортность, безопасность, надежность, а также удобство эксплуатации [2]. Современные источники света расширяют рамки возможностей, которыми располагали их предшественники. Возрастает продолжительность эксплуатации и световая отдача, расширяется температурный диапазон применения и предрасположенность к дистанционному управлению. Все это упрощает пользование световыми приборами, как в бытовых целях, так и в промышленных.

Таким образом, после сравнения различных источников света, на сегодняшний день наиболее предпочтительным вариантом освещения являются светодиодные источники света, так как они по многим параметрам превосходят другие источники света. Они не только экономичны, но и долговечны: их ресурс превышает время жизни компактных люминесцентных лам в несколько раз, а ламп накаливания – в десятки раз. Имеют превосходные светотехнические характеристики. Кроме того, светодиодные источники света, в отличие от ламп накаливания, не являются хрупкими, поэтому на их основе могут создаваться вандалостойкие осветительные устройства.

#### Л и т е р а т у р а

1. Савкова, Т. Н. Анализ светотехнических характеристик современных источников света / Т. Н. Савкова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 28–29 апр. 2011 г. – Гомель, 2011. – С. 507–511.
2. Емельянов, А. И. Осветительные приборы и комплексы с электрическими источниками света. Классификация и критерии подбора / А. И. Емельянов // Глав. энергетик. – 2024. – № 1. – С. 41–52.

## РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ДЛЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 35 И 110 кВ

В. А. Маркевич

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

Научный руководитель Т. В. Алферова

*Предложен вариант замены аналоговых вторичных цепей измерительных трансформаторов на оптоволоконные линии связи с целью повышения надежности и точности передачи данных за счет исключения влияния внешних помех.*

**Ключевые слова:** цифровая подстанция, оптоволоконные линии связи, выносные модули, устройство сбора и передачи информации.

В данной работе, согласно протоколу МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях», предлагается рассмотреть вариант замены аналоговых вторичных цепей измерительных трансформаторов на оптоволоконные линии связи с целью повышения надежности и точности передачи данных за счет исключения влияния внешних помех.

Применим технологию HardFiberProcessBus – системы выносных модулей ввода / вывода с передачей данных по оптоволоконным кабелям. Система включает в себя микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации (РЗА), оптические кабели и выносные модули устройств измерения, сбора и передачи данных (УИСПД). На подстанции должно быть установлено два модуля УИСПД (по одному на открытые распределительные устройства (ОРУ) 35 и 110 кВ, подключенных к разным трансформаторам тока, также на них необходимо завести вторичные цепи трансформаторов напряжения.

Структурная и принципиальные схемы предлагаемого технического решения приведены на рис. 1–3.

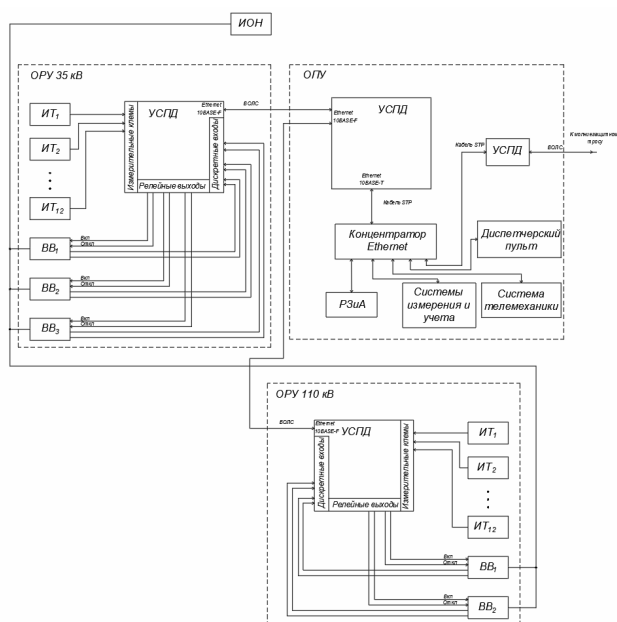


Рис. 1. Структурная схема цифровизации открытых распределительных устройств 35 и 110 кВ

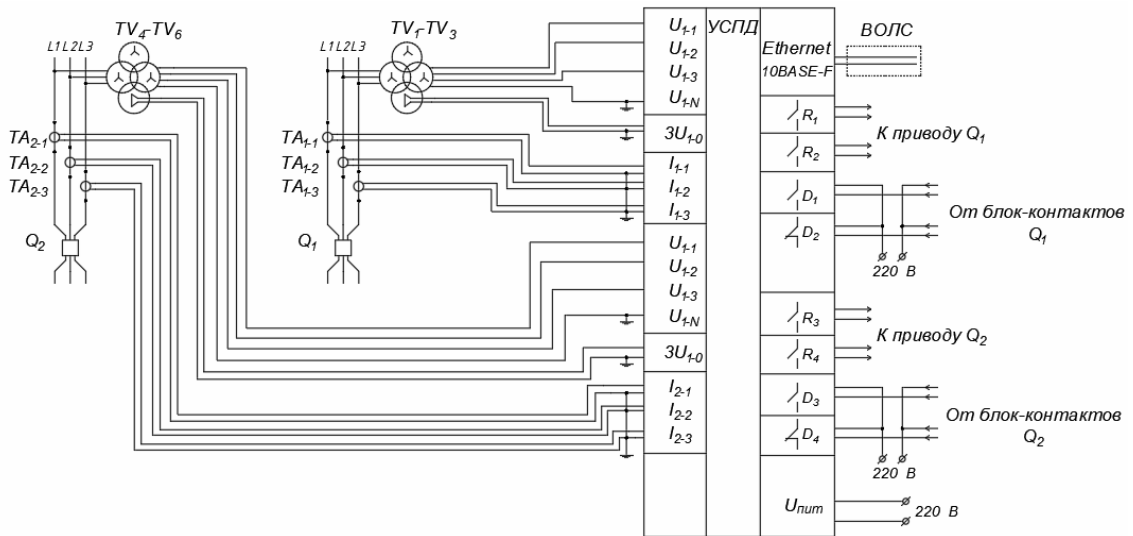


Рис. 2. Принципиальная схема подключения к устройству измерения, сбора и передачи данных открытого распределительного устройства 110 кВ

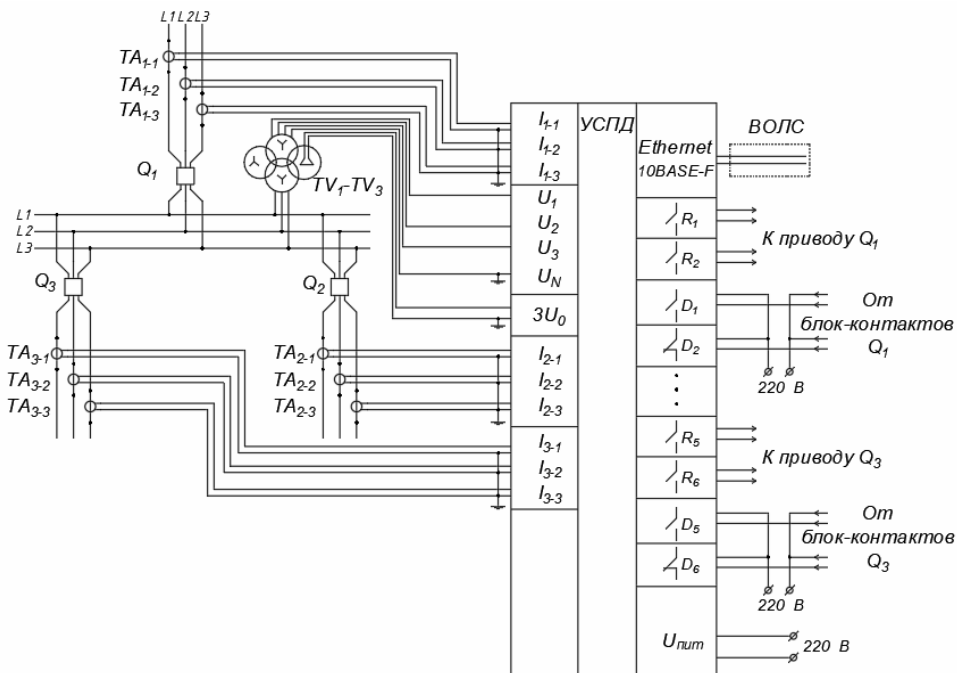


Рис. 3. Принципиальная схема подключения к устройству измерения, сбора и передачи данных открытого распределительного устройства 35 кВ

Схемы состоят из следующих элементов: устройств измерения, сбора и передачи данных; оптоволоконных кабелей связи; электрических сигнальных кабелей и концентраторов Ethernet.

Вторичные цепи измерительных трансформаторов напряжения и тока подключены к соответствующим входам УИСПД, где сигналы оцифровываются в соответствии с протоколом SV и передаются через волоконно-оптическую связь (ВОЛС) на устройство сбора и передачи информации (УСПД), которое в свою очередь пере-

дает данные через концентратор Ethernet устройствам релейной защиты и автоматики, учета, телемеханики.

Сигналы управления от диспетчерского пульта или устройств РЗА передаются в соответствии с протоколом GOOSE через концентратор Ethernet на УСПД, где по отдельной линии ВОЛС отправляются на соответствующий УИСПД, расположенный на территории ОРУ, имеющий релейные выходы и дискретные входы, подключенные к необходимому выключателю. ВОЛС необходимо выполнять двухжильным кабелем.

Согласно принципиальным схемам цифровизации ОРУ 35 и 110 кВ, все выходы измерительных трансформаторов тока и напряжения подключаются к УИСПД, расположенному в шкафах на самих ОРУ в непосредственной близости к измерительным трансформаторам, что позволяет сократить влияние внешних помех и снизить затраты на медные вторичные цепи. К соответствующим УИСПД также подключены три выключателя для ОРУ 35 кВ и два выключателя ОРУ 110 кВ.

Исходя из структурной и принципиальной схемы, могут быть составлены технические задания к УСПД и УИСПД:

– УИСПД, установленное на ОРУ 35 кВ должно иметь девять входов 5 А от трансформаторов тока; пять входов  $100/\sqrt{3}$ . В от трансформаторов напряжения, установленных на каждую из фаз; шесть релейных выходов и шесть дискретных входов, подключенных к выключателям 35 кВ;

– УИСПД, установленное на ОРУ 110 кВ, должно иметь шесть входов 5 А от трансформаторов тока; десять входов  $100/\sqrt{3}$ . В от трансформаторов напряжения, установленных на каждую из фаз двух входящих линий 110 кВ; четыре релейных выходов и четыре дискретных входов, подключенных к выключателям 110 кВ;

– УСПД, установленное в опорно-поворотное устройство для преобразования оптического сигнала в электрический, должно иметь соответствующие выходы и работать с двумя протоколами передачи данных, а именно SV (протокол для передачи мгновенных значений тока и напряжения) и GOOSE (протокол для передачи сигналов управления выключателям и получении информации об их текущем положении). Необходимая надежность работы данного УСПД может быть достигнута наличием резервных ядер;

– УСПД, установленное в опорно-поворотное устройство для передачи данных по ВОЛС, встроенную в молниезащитный трос воздушной линии, должно иметь выходы для подключения оптического и STP кабелей и обеспечивать работу по MMS-протоколу.

Предлагаемые схемы можно рассматривать как техническое задание по изготовлению аппаратной части УИСПД и УСПД. Программная часть выполняется в соответствии с МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях».

#### Литература

1. МЭК 61850. Сети и системы связи на подстанциях.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА В ПРОЦЕССЕ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА ТРИГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Р. Э. Мастепанов

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Рассмотрено применение тепловых насосов в процессе конденсации паров рабочего тела, способы их применения в тригенерационных установках для повышения их эффективности.*

**Ключевые слова:** тригенерация, тригенерационные установки, насосы, сорбционные тепловые насосы, конденсация.

Тригенерация – это процесс организации выработки одновременно трех энергий: электричества, тепла и холода; и эффективный способ удовлетворения потребителей данными видами энергии, необходимыми в различных отраслях промышленности (для реализации технологических процессов), а также в сфере услуг и жилищно-коммунальном хозяйстве. В определенных условиях тригенерация позволяет снизить затраты топливно-энергетических ресурсов и улучшить экологические показатели генерирующих установок.

Системы тригенерации создаются на базе мотор-генераторов либо машин Стирлинга с утилизацией теплоты отходящих газов.

Одним из прорывных направлений развития белорусской энергетики может стать разработка и серийное производство экологически чистых неэлектрических тепловых машин, в которых применяются сорбенты. Источником низкотемпературной энергии является окружающая среда (водные бассейны, грунт, а также вторичные и альтернативные источники энергии).

К таким устройствам относятся системы тригенерации энергии (производство электричества, теплоты и холода), тепловые насосы на твердых сорбентах для нагрева и охлаждения, системы кондиционирования, системы хранения и транспортировки газа. Тепловые насосы в сочетании с машинами Стирлинга либо мотор-генераторами составляют основу системы тригенерации.

Сорбционный тепловой насос, утилизирующий энергию отходящих газов и жидкостной системы охлаждения дизеля, при затратах 100 % первичной энергии топлива обеспечивает 100 % тепла для обогрева помещения, 30 % «холода» для охлаждения воды и 25 % электроэнергии для собственных нужд.

Тепловые машины на твердых сорбентах на 15–20 % улучшают общую эффективность систем комбинированного производства электроэнергии, теплоты и холода.

Адсорбционные реверсивные тепловые насосы позволяют получить от 20 до 30 кВт/м<sup>3</sup> тепловой энергии и до 5 кВт холода на кубический метр сорбента. Такие тепловые насосы экономят до 15–20 % первичной энергии для производства электричества, теплоты и холода. При утилизации теплоты отходящих газов и отработанной жидкости дизель-генераторов, либо двигателей Стирлинга, эффективность подобных установок возрастает на 15–20 %.

Типичным представителем тепловых машин является сорбционный (химический) тепловой насос, разработанный и испытанный в ИТМО НАН Беларуси.

Работа химических тепловых насосов основана на обратимом химической реакции «газ – твердое тело»:



В качестве твердого тела  $B$  обычно используют неорганические соли, которые образуют с рабочей жидкостью  $A$  комплекс  $AB$ : с водой – гидраты  $B \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , с аммиаком – аммиакаты  $B \cdot n\text{NH}_3$  и т. д.

Практическому применению неорганических солей в массивном состоянии препятствует несколько серьезных факторов:

- а) существенное увеличение объема твердой фазы в ходе образования комплекса;
- б) гистерезис в реакции (1), в результате которого разложение комплекса может происходить при более высокой температуре, чем его образование;
- в) малая скорость реакции (1) за счет малой реакционной поверхности и/или образования на поверхности соли новой фазы, диффузия газа через которую затруднена;

г) коррозионная активность солей и комплексов при контакте с металлическими частями химического теплового насоса.

Тепловой насос содержит высокотемпературный адсорбер, среднетемпературный адсорбер, низкотемпературный адсорбер-холодильник, а также испаритель/конденсатор. Испаритель/конденсатор выполнен с интенсификатором теплообмена в виде пористого покрытия для улучшения испарения жидкого хладагента. Тепловой насос может использоваться двумя способами:

**Вариант А.** Три адсорбера насоса одновременно потребляют энергию отходящих газов двигателя внутреннего сгорания для выработки холода и работают по двум циклам.

1) адсорберы имеют комнатную температуру и за время  $\tau_1$  нагреваются, соответственно, до температуры 230, 180 и 90 °С отходящими газами двигателя внутреннего сгорания и горячей жидкостью из системы охлаждения двигателя. Во время нагрева адсорберов идет процесс десорбции аммиака из сорбента и конденсации его паров в конденсаторе;

2) в период времени  $\tau_2$  все три адсорбера охлаждаются до комнатной температуры, происходит адсорбция паров аммиака и понижение температуры стенки испарителя до –3 °С (получение холода).

**Вариант В.** Источником энергии для теплового насоса являются выхлопные газы двигателя внутреннего сгорания системы мотор-генератор. Для подогрева низкотемпературного адсорбера и десорбции паров аммиака используется энергия, снимаемая системой жидкостного охлаждения высокотемпературного и среднетемпературного адсорберов  $\text{NiCl}_2$ ,  $\text{MnCl}_2$ .

В данном прототипе теплового насоса получение холода осуществляется в четыре стадии:

1) адсорберы  $\text{MnCl}_2$  и  $\text{NiCl}_2$  нагреваются отходящими газами с помощью тепловых труб, вставленных в них, и происходит процесс десорбции паров аммиака. Пары аммиака конденсируются в конденсаторе теплового насоса и в низкотемпературном адсорбере  $\text{BaCl}_2$ ;

2) адсорберы  $\text{MnCl}_2$  и  $\text{NiCl}_2$  с помощью вентиля отсоединяются от конденсатора/испарителя, и начинается процесс их охлаждения. Охлаждающая жидкость, имеющая температуру выше 95 °С, подается на адсорбер  $\text{BaCl}_2$ . Происходит процесс

нагрева сорбента и десорбция паров аммиака с последующей его конденсацией в конденсаторе/испарителе;

3) заканчивается процесс охлаждения всех адсорберов до температуры окружающей среды. Адсорбер  $BaCl_2$  с помощью вентиля отсоединяется от конденсатора/испарителя, адсорберы  $MnCl_2$ ,  $NiCl_2$  соединяются с низкотемпературным адсорбером  $BaCl_2$ . Начинается процесс охлаждения адсорбера из-за десорбции паров аммиака, поскольку более сильные сорбенты, находящиеся в адсорберах  $MnCl_2$ ,  $NiCl_2$ , забирают аммиак.

4) охлаждение конденсатора/испарителя при испарении в нем жидкого аммиака. Пары аммиака адсорбируются всеми тремя адсорберами, присоединенными к конденсатору/испарителю с помощью вентиля.

Максимальная тепловая мощность, подводимая к адсорберам  $MnCl_2$ ,  $NiCl_2$ , составляет 400 Вт на каждый адсорбер, при этом получаем 200 Вт холода в испарителе.

Анализ диаграммы Клапейрона–Клаузиуса, позволяет оценить эффективность работы теплового насоса с двумя источниками холода, которая равна 0,41 для первого прототипа теплового насоса. Для второго прототипа теплового насоса холодильный коэффициент эффективности равен 0,6.

Это означает, что с помощью сорбционного теплового насоса 1 кВт энергии отходящих газов дизеля преобразуется в 1,6 кВт теплоты для нагрева помещения и 0,6 кВт холода для его охлаждения.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ключинский, В. П. Тригенерационные турбодетандерные установки на основе низкокипящих рабочих тел / В. П. Ключинский // Беларусь в современном мире: материалы XII Международ. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 16–17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 329–331.
2. Овсяник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел. / А. В. Овсяник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.
3. Антух А. А. Тепловой насос для систем тригенерации энергии (электричество, теплота, холод) / А. А. Антух, Л. Л. Васильев, О. С. Филатова // Энергоэффективность. – 2006. – № 1. – С. 16–18.
4. Васильев, Л. Л. Перспективы применения тепловых насосов в Республике Беларусь / Л. Л. Васильев // ИФЖ. – Т. 78, № 1. – С. 23–24.
5. Васильев, Л. Л., Экологически чистые хладагенты и холодильные циклы для Республики Беларусь / Л. Л. Васильев // Энергоэффективность. – 2005. – № 8. – С. 21–23.

### **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**К. Е. Коршунов**

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

Научный руководитель Т. В. Алферова

*Силовые трансформаторы, как масляные, так и сухие, уже долгое время никак не изменяются конструктивно. Производятся улучшения отдельных элементов, что влияет на рабочие характеристики трансформаторов, но конструктивно ничего не изменяется.*

*Перспективным решением для уменьшения потерь в трансформаторе является замена магнитопровода из электротехнической стали на аморфные сплавы.*

**Ключевые слова:** аморфный сплав, магнитопровод, трансформатор, электротехническая сталь, энергоэффективность.

Аморфный сплав – это определенный вид прецизионного сплава. Путем химического подбора и метода охлаждения, которое проводится со скоростью, превышающую скорость кристаллизации, достигается аморфное состояние металла. Одно из основных отличий аморфного сплава от электротехнической стали – отсутствие периодичности в расположении атомов. Эти сплавы также отличаются от кристаллических сплавов большей устойчивостью к коррозии, они прочнее в несколько раз и с выпадает лучшей электро характеристикой. Благодаря современной технологии стало возможно получение сердечников различных диаметров, начиная от нескольких миллиметров заканчивая полуметровым диаметром.

В таком магнитопроводе три кольца: два из них – внутренние, одно наружное. Изготовлены из лент аморфной стали, которые имеют толщину 0,025 мм. Поверхность каждого из колец представляет собой ленту из обычной электротехнической стали, которая является замковой пластиной. Защитный слой из эпоксидной смолы покрывает все кольца магнитопровода, за исключением областей стыка, которые расположены в нижней части магнитопровода.

На сегодняшний день, для использования в трансформаторах наиболее распространенными являются аморфные сплавы на основе металлов переходной группы железо–никель–кобальт (Fe, Ni, Co). Взаимодействуя с металлоидами бор–кремний–углерод (B, Si, C), понижается температура плавления и обеспечивается более легкое достижение температуры стеклования аморфного сплава при его охлаждении. В результате исчезают междоменные границы, что приводит к высокой твердости, прочности и коррозионной стойкости сплава.

Для придания специальных свойств сплав подвергается термо- или термоманитной обработке, в результате чего структура ленты остается аморфной, становится частично кристаллизованной или нанокристаллизованной.

Нагрузочные потери трансформатора изменяются с увеличением нагрузки, в то время как потери холостого хода остаются постоянными. Ключом к решению проблемы потерь энергии является снижение потерь холостого хода. Для снижения потерь холостого хода в сердечнике силового трансформатора используются пятикратные ленты из аморфных сплавов, таких как  $Fe_{78}B_{13}Si_9$ .

За рубежом первые распределительные трансформаторы мощностью 630–1000 кВА с аморфным сердечником были изготовлены более 10 лет назад. В данном направлении дальше всех продвинулись США, Китай и Индия. С 2009 г., ряд европейских распределительных компаний также установили в опытную эксплуатацию несколько трансформаторов мощностью 400 кВА с сердечником из аморфной ленты. В 2012 г. первой в России к выпуску силовых трансформаторов с аморфными сердечниками АТМГ приступила группа «Трансформер».

К примеру, для трансформатора ТСЛ 1000 кВА потери составляют 410 Вт, а для обычного ТСЛ других производителей эта величина равна в среднем 1550–2200 Вт. Получается, что в сравнении с аналогичными устройствами трансформаторы с аморфным сердечником ТСЛ экономят потребителю в 4–6 раз больше денег в год (рис. 1).



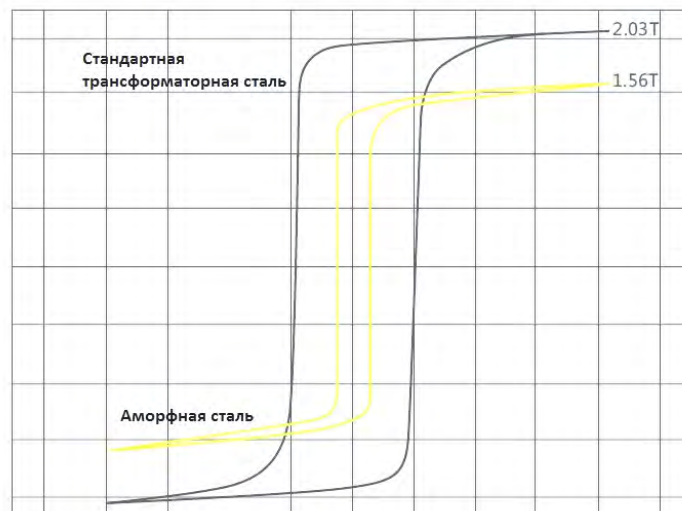


Рис. 1. Сравнительные потери на гистерезис аморфной и электротехнической стали

По данным американской компании Metglas, при использовании стальных магнитопроводов годовые потери силовых трансформаторов в распределительных сетях могут достигать около 8 % от стоимости покупки. В таблице приведены средние потери холостого хода силовых трансформаторов с номинальным напряжением 10 кВ и мощностью 25–2500 кВА.

#### Усредненные потери холостого хода для силовых трансформаторов

Мощность трехфазного трансформатора 10 кВ	Усредненные потери XX, магнитопровод – трансформаторная сталь SiFe	Усредненные потери XX, магнитопровод – аморфный сплав	Сравнительное снижение потерь, %
25 кВА	100	28	72%
40 кВА	140	39	72%
63 кВА	180	50	72%
100 кВА	260	66	75%
250 кВА	520	150	71%
630 кВА	1000	280	77%
1000 кВА	1700	350	80%
1600 кВА	2100	490	77%
2500 кВА	2700	550	80%

Энергоэффективные распределительные трансформаторы с магнитопроводами из нанокристаллических материалов, по данным энергетических компаний США и Японии, окупаются у покупателя примерно за три года.

Кроме снижения потерь в магнитопроводе из нанокристаллических сплавов также уменьшается значение тока намагничивания. В результате при снижении потерь холостого хода и снижении тока намагничивания в трансформаторах:

- снижается температура трансформатора и увеличивается его срок службы;
- в несколько раз снижаются затраты при передаче электроэнергии потребителю;
- имеет место общее сокращение энергопотребления в энергетике страны; в результате возникает общее существенное снижение объема сжигания органического топлива для выработки электроэнергии и вредных выбросов в атмосферу.

Производственный анализ, проведенный авторами статьи, показал, что трансформаторы с сердечниками из аморфных сплавов более энергоэффективны, чем трансформаторы с сердечниками из обычной электротехнической стали. Необходимо увеличить производство аморфных сплавов и постепенно перейти к их использованию в сердечниках современных трансформаторов различного назначения. Дальнейшие исследования свойств аморфных сплавов могут привести к их использованию в электромеханических электромагнитных системах и статических электромагнитных устройствах.

#### Литература

1. Современные тенденции применения аморфных сплавов в магнитопроводах силовых трансформаторов / С. В. Хавроничев [и др.] // Междунар. журнал приклад. и фундамент. исследований. – 2015. – № 12–4. – С. 607–610.
2. Гуринович, Е. А. Конструктивные особенности, характеристики, достоинства и недостатки трансформаторов с сердечниками из аморфных сплавов / Е. А. Гуринович // Актуальные проблемы энергетики : материалы 69-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: БНТУ, 2014. – С 112.

## ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

**В. А. Бабына**

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

Научный руководитель А. О. Добродей

*Рассмотрен принцип работы и конструкция оптических трансформаторов тока. Проанализированы их свойства, технические возможности и преимущества применения в электроэнергетике. Приведены метрологические характеристики, включая погрешности по величине силы тока и по углу, а также соответствие требованиям по классу точности*

**Ключевые слова:** эффект Фарадея, трансформатор, измерительный преобразователь.

За последнее десятилетие термин «аналоговый» успел стать синонимом к слову «устаревший». Когда речь идет о повышении точности измерительных средств и их интеграции в единую сеть мониторинга и контроля технологических процессов, потенциал, имеющийся у аналоговой аппаратуры, становится явно недостаточным. Одним из решений в данной области являются оптоволоконные трансформаторы, основанные на эффекте Фарадея. Этот эффект был открыт примерно в то же время, что и закон электромагнитной индукции, но его эффективное использование ожидало появления соответствующих технологий.

Магнитооптический измерительный преобразователь переменного тока, основанный на использовании магнитооптического эффекта Фарадея представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид оптического трансформатора тока

Магнитооптический измерительный преобразователь переменного и импульсного тока включает в себя чувствительный элемент (ячейку Фарадея) и оптоэлектронный блок (рис. 2). Его задача – преобразование первичных мгновенных значений переменных и импульсных токов в пропорциональные значения низкого вторичного тока или цифровой сигнал. Основой для его работы служит магнитооптический эффект Фарадея, проявляющийся в повороте плоскости поляризации линейно поляризованного света.

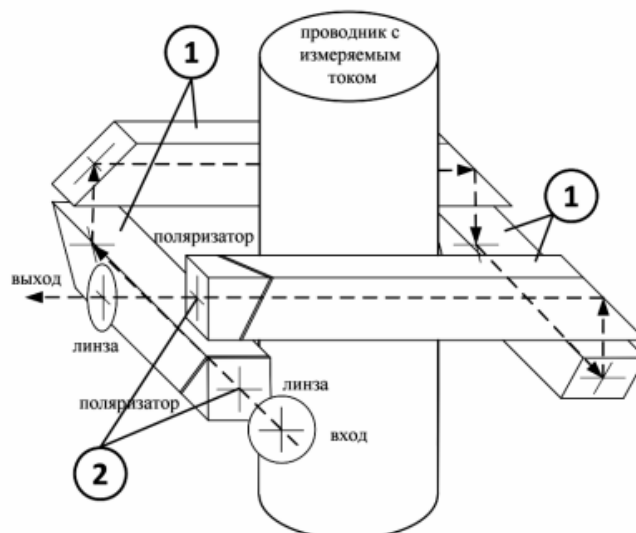


Рис. 2. Устройство ячейки Фарадея

Особенности конструкции: В разработанном преобразователе чувствительным элементом являются четыре призмы (1), расположенные последовательно по пути распространения света. Эти призмы выполнены из стандартного диамагнитного стекла и образуют замкнутый контур вокруг проводника с измеряемым током. Кроме того, поляризаторы (2) интегрированы в эти призмы.

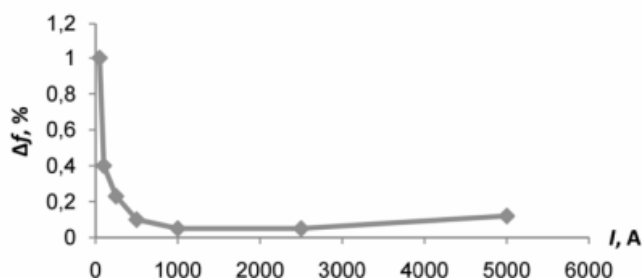


Рис. 3. Погрешность величины силы тока

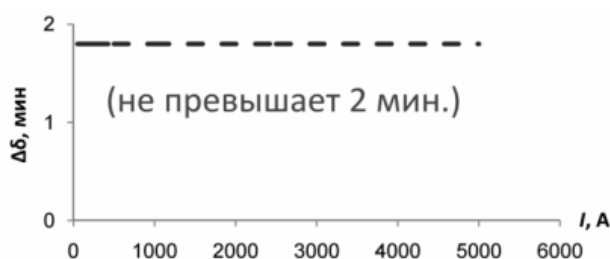


Рис. 4. Угловая погрешность

Использование оптических методов измерения тока позволяет получать измеренные значения в цифровом виде, а примененная схема измерения тока дает возможность значительно повысить точность измерений и снизить погрешности. В конструкции электронных трансформаторов тока можно выделить две основные части:

- внешняя часть: здесь чувствительный оптический элемент жестко закреплен на опорной изоляционной колонне с соединительным оптическим кабелем.
- внутренняя часть состоит из блока электроники.

Специальное термостабильное оптическое волокно, используемое в измерительных элементах оптических трансформаторов, обеспечивает высокую стабильность свойств в диапазоне изменения температур до 100 °С (интегральный разброс показаний в этом диапазоне температур составляет около 1 %). При реальном диапазоне температур от –60 до +60 °С это обеспечивает погрешность измерений, соответствующую требованиям к измерительным приборам класса точности 1.

Для обеспечения точности измерений в соответствии с требованиями класса точности измерений 0,2S (расширенный диапазон в области малых погрешностей) в приборах применен метод цифровой компенсации температурной погрешности при малых значениях токов. Для обеспечения долговременной работы оптических трансформаторов и контроля состояния волоконного датчика тока важно наличие встроенной системы онлайн-диагностики. Эта система может функционировать через специальный диагностический порт, который позволяет проводить удаленную диагностику, либо путем формирования общего статуса работоспособности в соответствии со стандартом МЭК 61850-8-1.

Для оптоволоконного трансформатора тока существует определенное ограничение по расстоянию между блоком электроники, устанавливаемым на общеподстанционном пункте управления (ОПУ), и чувствительным оптическим элементом, устанавливаемым на открытое распределительное устройство (его максимум равен 1 300 м).

Классы точности ТТЭО с цифровым выходом:

- по переменному току: 0,1; 0,2S; 0,5S; 1,0; 5P;
- по постоянному току:  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,2$ ;  $\pm 0,5$ ;  $\pm 1,0$ .

Ключевые преимущества оптических трансформаторов тока по сравнению с электромагнитными:

- точность характеристик в широком диапазоне температур;
- отсутствие насыщения, гистерезиса, резонанса, а также отсутствие искажения формы тока после короткого замыкания;
- широкий частотный диапазон, который позволяет выполнять качества электроэнергетики с учетом до 100 гармоник;
- исключение влияния нагрузки вторичных цепей;
- отсутствие электрических связей между силовыми и измерительными цепями, исключаящее неправильную работу при аварийных режимах работы внешней сети;
- повышенная устойчивость оптоволоконных каналов к внешним электромагнитным помехам, а также низкая восприимчивость к вибрации и повышенная сейсмостойкость;
- меньшие вес и габариты по сравнению с аналогичными электромагнитными образцами;
- повышенная безопасность вследствие отсутствия масла и элегаза;
- длительный срок эксплуатации.

#### Л и т е р а т у р а

1. Найденев, А. Д. Оптические трансформаторы тока / А. Д. Найденев // Вестн. науки и образования. – 2020. – № 8-1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/opticheskie-transformatory-toka>. – Дата доступа : 10.04.2024.
2. Оптические трансформаторы тока и напряжения для цифровой подстанции. – Режим доступа: <https://www.mars-energo.ru/assets/files/catalog/Transformatory.pdf>. – Дата доступа: 10.04.2024.

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЭНЕРГЕТИКЕ

**В. А. Заяц**

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

Научный руководитель А. О. Добродей

*Проанализировано исследование интеллекта (ИИ) на энергетическую отрасль, освещающая его роль в оптимизации «умных сетей» и повышении надежности энергоснабжения. Описываются успехи ИИ в управлении энергосистемами, мониторинге оборудования и эффективности производства. Примеры включают проект Smart Grid и разработки Google для ветроэлектростанций. Представлены результаты экспериментов, подтверждающие преимущества ИИ в снижении затрат и повышении точности прогнозирования.*

**Ключевые слова:** ИИ, «умные сети», энергетическая отрасль, SmartGrid, Google, нейросети, управление, потребление, энергия.

Использование ИИ преобразует энергетическую отрасль, открывая передовые подходы к управлению сложными энергетическими системами. Внедрение ИИ в контроль за «умными сетями» ускоряется, демонстрируя значительные успехи в улучшении операционной эффективности, точности прогнозирования потребления

энергии и общей надежности энергоснабжения. Рассмотрим технологии и перспективы использования ИИ в энергетике.

**Оптимизации энергетических систем.** С алгоритмами машинного обучения, ИИ обладает возможностью анализировать информацию о потреблении и выработке энергии, а также прогнозировать пиковые нагрузки для эффективного распределения ресурсов. Автоматизация управления энергосистемами с помощью ИИ способствует предотвращению утечек и повреждений, сокращая время простоя и минимизируя вероятность возникновения аварий.

**Мониторинг состояния оборудования.** Искусственный интеллект способен выявлять потенциальные неисправности и предлагать стратегии их устранения. Это значительно уменьшает риск непредвиденных остановок, сокращает расходы на техническое обслуживание и повышает общую надежность энергетических систем.

**Повышение эффективности производства энергии.** Искусственный интеллект анализирует данные о выработке энергии, помогает настраивать параметры оборудования для оптимальной работы, контролировать процесс производства и анализировать будущие потребления. Это ведет к снижению издержек и повышению качества энергии.

Проект Smart Grid является отличным примером эффективного использования ИИ в энергетике. Создание цифровой платформы, управляемой алгоритмами машинного обучения, позволило оптимизировать работу энергосистем. В результате было достигнуто снижение времени простоя на 20 % и уменьшение расходов на техническое обслуживание и ремонт на 30 %

Google создали нейросеть, которая обучается на работе конкретной ветроэлектростанции, ее потребителях и прогнозах погоды, и через некоторое время начинает почасово предсказывать силу ветра на два дня и высчитывать оптимальное соотношение хранения/отдачи энергии. Экономия за счет этого достигает 20 %.

Нейросеть, созданная экспертами из Пердью, обучена распознавать трещины на основе данных из 300 тысяч изображений. Это обеспечивает высокую точность в обследовании систем реакторов. Анализируя каждый сантиметр изображения, нейросеть идентифицирует трещины и отслеживает их изменения между последовательными кадрами, используя алгоритмы объединения данных.

Для получения данных об эффективности ИИ в энергетике были произведены эксперименты в различных компаниях. Эксперимент будет сравнивать результаты работы системы с использованием ИИ и без его применения, чтобы оценить влияние ИИ на оптимизацию процессов энергетического управления. Результаты исследования указаны в табл. 1–4.

Таблица 1

#### Сравнение эффективности и точности прогнозирования нагрузок

Метод прогнозирования	Точность прогнозирования, %	Отклонение от фактической нагрузки, %
Без использования ИИ	80	5
Использование ИИ	95	2

Таблица 2

**Сравнение оптимизации работы энергетической системы**

Показатель	Без использования ИИ	С использованием ИИ
Эффективность работы системы	75	90
Снижение затрат на энергию	10	25
Оптимизация использования ресурсов	Средняя	Высокая
Минимизация эмиссий углерода	Низкая	Высокая

Таблица 3

**С преимуществами и недостатками применения искусственного интеллекта в оптимизации работы энергетических систем**

Аспект	Преимущества	Недостатки
Эффективность	Увеличение эффективности системы	Определенный уровень неопределенности
Точность прогнозирования нагрузок	Точные прогнозы, минимизация ошибок	Требование к большим объемам данных
Автоматизация процессов	Снижение человеческого вмешательства	Зависимость от надежности системы и доступности данных
Гибкость и адаптивность	Способность к адаптации в изменяющихся условиях	Требование к высокой производительности аппаратного обеспечения
Затраты и сложность внедрения	Сокращение затрат на энергию и ресурсы	Необходимость высокой квалификации специалистов

Таблица 4

**Анализ эффективности различных алгоритмов и методов машинного обучения**

Алгоритм/ Метод машинного обучения	Эффективность, %	Точность, %	Время обучения, сек
Нейронные сети	90	92	120
Решающие деревья	85	88	60
Генетические алгоритмы	88	91	180
Методы оптимизации	87	90	100

Преимущества ИИ в энергетике:

- оптимизация распределения энергии;
- управление энергетическими сетями;
- прогнозирование нагрузок.

Недостатки ИИ в энергетике:

- высокая стоимость и сложность;
- недостаток прозрачности и интерпретируемости;
- риск злоупотребления и злонамеренного использования.

Таким образом, использование искусственного интеллекта в энергетике открывает большие возможности для повышения эффективности и надежности работы энергосистем. Применение технологий машинного обучения и анализа данных позволяет оптимизировать работу энергосистем, повысить качество производства энергии и снизить затраты на обслуживание и ремонт оборудования. Однако необходимо учитывать потенциальные риски и обеспечивать строгий контроль за работой ИИ в энергетических системах.

#### Литература

1. Использование искусственного интеллекта в управлении энергосистемами. – Режим доступа: <https://scilead.ru/article/4847-ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-v-upra> – Дата доступа: 10.04.2024.
2. Искусственный интеллект в электроэнергетике: зачем и на что он способен. Пример ИИ-системы. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/674110/>. – Дата доступа: 10.04.2024.
3. Возможности искусственного интеллекта. – Режим доступа: [https://www.livebusiness.org/tags/vozmozhnosti\\_ii/](https://www.livebusiness.org/tags/vozmozhnosti_ii/). – Дата доступа: 10.04.2024.
4. Искусственный интеллект в электроэнергетике. – Режим доступа: <https://www.euroenergyservice.com/o-kompanii/poleznaya-informacziya/iskusstvennyj-intellekt>. – Дата доступа: 10.04.2024.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПАРОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕРМОСИФОНА С ВНУТРЕННИМИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ ВСТАВКАМИ И ТЕРМОСИФОНА КЛАССИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

П. С. Колмачева, А. В. Таран

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

Научный руководитель Т. Н. Никулина

*Экспериментально исследован теплообмен в термосифонных элементах с оребренной поверхностью конденсатора и внутренними цилиндрическими вставками в испарителе, заправленных фреоном R410a, при изменении условий расположения элементов в пространстве. Предложенная конструкция устройства позволяет работать термосифону при разных углах наклона (проведены эксперименты при углах наклона 0°, 90°) и увеличивает область применения в промышленности. Проведен анализ полученных результатов.*

**Ключевые слова:** термосифон, пародинамический термосифон, энергосберегающая технология, интенсификация теплообмена, модификация поверхностей теплообмена.

Замкнутые двухфазные термосифоны рассматриваются как достаточно перспективные, высокоэффективные, надежные теплопередающие теплообменные устройства. В связи с этим актуальным является исследование возможности применения термосифонов как основного элемента системы охлаждения приборов, устройств и оборудования.

Объектом исследования является процесс теплообмена в замкнутом двухфазном теплопередающем элементе – термосифоне.

Целями работы являются:

- анализ и выявление наиболее существенных свойств теплоносителей для двухфазных теплопередающих устройств;
- выбор теплоносителя для экспериментальных исследований;



– экспериментальное исследование процесса теплообмена для создания эффективных теплообменных аппаратов с применением термосифонов.

Предметом исследования является модель теплообменника на основе термосифонных элементов с улучшенными характеристиками (рис. 1).

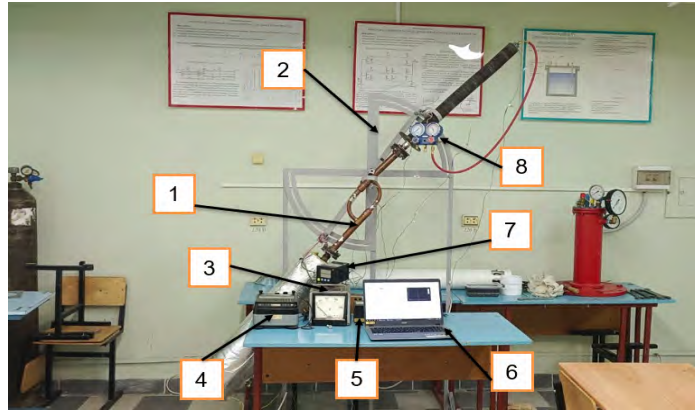


Рис. 1. Экспериментальный стенд:

1 – термосифон; 2 – стойка; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – амперметр;  
5 – вольтметр; 6 – компьютер, для сбора данных;  
7 – измеритель-регулятор Сосна-002; 8 – манометр

Конструкция экспериментального стенда разборная, что позволяет проводить исследования как для классического, так и для пародинамического термосифона и сравнивать их эффективность при одинаковых условиях (рис. 2).

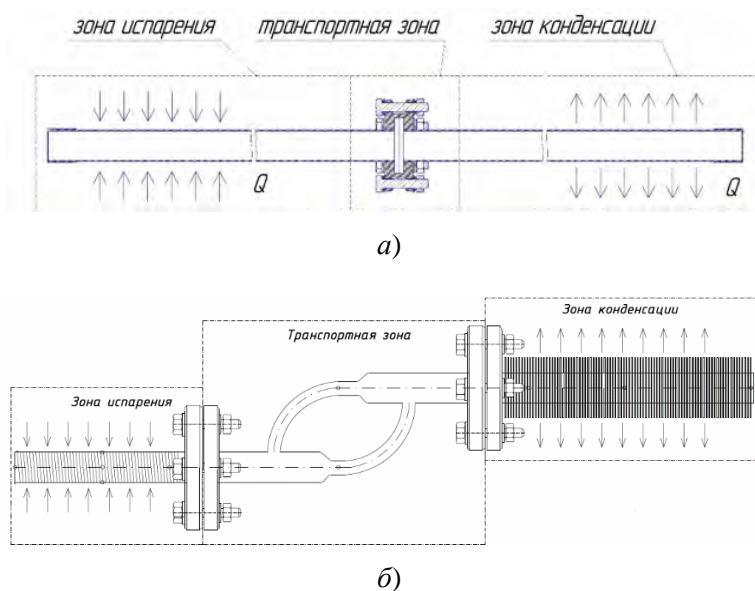


Рис. 2. Схемы экспериментального стенда:

а – классический термосифон; б – пародинамический термосифон

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

Выбор теплоносителя для конкретных условий работы термосифона должен производиться на основе совместного учета ряда факторов, определяющих принципиальную работоспособность замкнутых двухфазных теплопередающих устройств в заданных условиях, высокие эксплуатационные качества (надежность, долговечность, безопасность), стоимость и доступность.

Для выбора теплоносителя рекомендуется использовать показатель качества FOM (figure of merit). По итогам анализа свойств фреонов R134a, R404a, R410a и R407c (наиболее часто используются в промышленности) в качестве теплоносителя для экспериментального исследования был выбран фреон R410a (рис. 3).

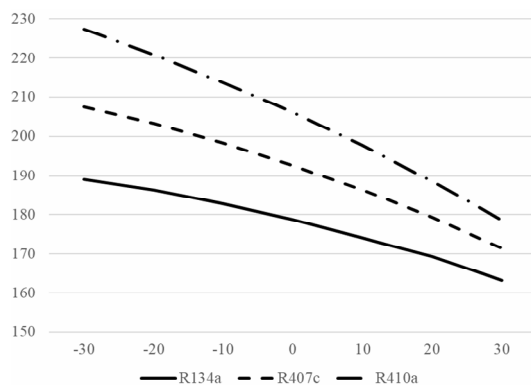


Рис. 3. Определение показателя качества теплоносителя

В рамках данной работы была проведена серия экспериментальных исследований работы термосифона с внутренними циркуляционными вставками для определения распределения температур стенки испарителя и конденсатора термосифона при разных подводимых тепловых нагрузках к испарителю термосифона. Условия проводимых экспериментов:

- угол наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости –  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ .
- подводимая тепловая нагрузка к испарителю:  $0$ – $87,2$  Вт;
- циркуляционная вставка:  $d_{\text{нар}} = 26$  мм.

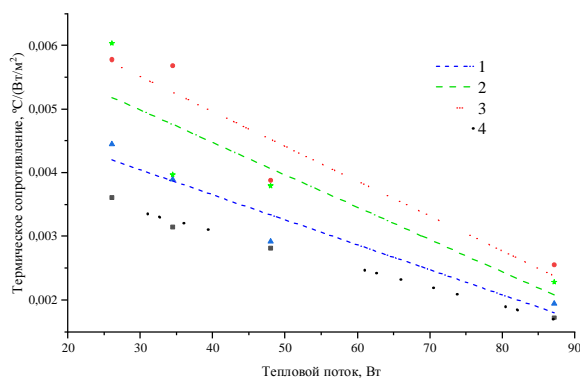


Рис. 4. Зависимость термического сопротивления от подводимого теплового потока:

- 1 – пародинамический термосифон с цилиндрическими вставками при угле наклона  $0^\circ$ ;
- 2 – пародинамический термосифон с цилиндрическими вставками при угле наклона  $90^\circ$ ;
- 3 – классический термосифон при угле наклона  $90^\circ$ ;
- 4 – классический термосифон при угле наклона  $0^\circ$

В результате экспериментального исследования работы термосифонных элементов с внутренними циркуляционными вставками, заправленных озонобезопасным хладагентом, при различных углах наклона, выявлено:

- распределение температур в пародинамическом термосифоне с циркуляционными вставками и термосифоне классической конструкции одинаково;
- испаритель пародинамического термосифона с цилиндрическими вставками при угле наклона  $0^\circ$  работает эффективнее, чем термосифон классической конструкции с развитой поверхностью конденсатора;
- кольцевой зазор (3 мм) не оказывает существенного влияния на термическое сопротивление пародинамического термосифона.

#### Л и т е р а т у р а

1. Васильев, Л. Л. Перспективы применения тепловых насосов в Республике Беларусь / Л. Л. Васильев // ИФЖ. – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 23–34.
2. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. – Киев : Факт, 2005. – 704 с.
3. Reay, D. Heat Pipes: Theory, Design and Applications. Butterworth Heinemann / D. Reay, P. Kew, – Oxford: Fifth Edition, 2006. – 378 p.
4. Экспериментальное исследование работы термосифонов, заправленных хладагентами R407C, R404A, R410A / А. В. Шаповалов [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого, Гомель, 2020. – № 3/4. – С. 87–93.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО НА ОСНОВЕ ДИЗЕЛЬНЫХ ДИСТИЛЛЯТОВ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕГОНКИ

А. А. Ковальчук

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

*Рассмотрены особенности печного бытового топлива и его смеси с дистиллятом дизельного топлива в различных концентрациях. Экспериментально определены следующие показатели: температура вспышки, температура воспламенения, плотность и вязкость. Определена эффективность добавления дистиллята дизельного топлива.*

**Ключевые слова:** печное бытовое топливо, дизельное топливо, температура вспышки, вторичная перегонка.

Печное топливо – это продукт нефтепереработки, изготовленный из дистиллятных фракций, полученных в результате прямой перегонки и вторичной переработки сырой нефти. Такой способ производства обеспечивает относительно низкую себестоимость [1]. Топливо предназначено для сжигания в отопительных приборах малой мощности и теплогенераторах средней мощности, установленных в домах [3].

Особенностью темного печного топлива является теплотворная способность. Топливо отлично подходит, когда нужно обогреть небольшой дом или подсобное помещение, а также используется в небольших энергоустановках, очень экономично и энергоэффективно за счет того, что имеет высокую калорийность. Еще одним преимуществом является то, что при сгорании оно не имеет запаха, характерного для многих других нефтепродуктов, нет трудностей с его хранением и транспортировкой (см. таблицу).

По основным свойствам этот вид топлива близок к летнему дизельному топливу. Температура конца кипения и застывания, вязкость, плотность печного бытового топлива несколько выше, чем у летнего дизельного топлива [6].

## Характеристики печного бытового топлива

Показатели	Значения
Фракционный состав:	
10% перегоняется при температуре, °С, не ниже	160
90% перегоняется при температуре, °С, не выше	360
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	8,0
Температура застывания, °С, не выше	-15
Температура вспышки, °С	116,8
Цвет	Красновато-коричневый
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	852
Зольность, %, не более	0,02
Коксуемость 10%-го остатка, %, не более	0,35
Содержание механических примесей	Отсутствует

Измерение температуры вспышки используется для определения максимально допустимой температуры нагрева топлива в пожаробезопасных условиях в открытой емкости, не защищенной от попадания воздуха. Температура вспышки – это самая низкая температура горючей жидкости, при которой пары или газы, образующиеся на ее поверхности, воспламеняются от источника зажигания без воспламенения самой жидкости (рис. 1).

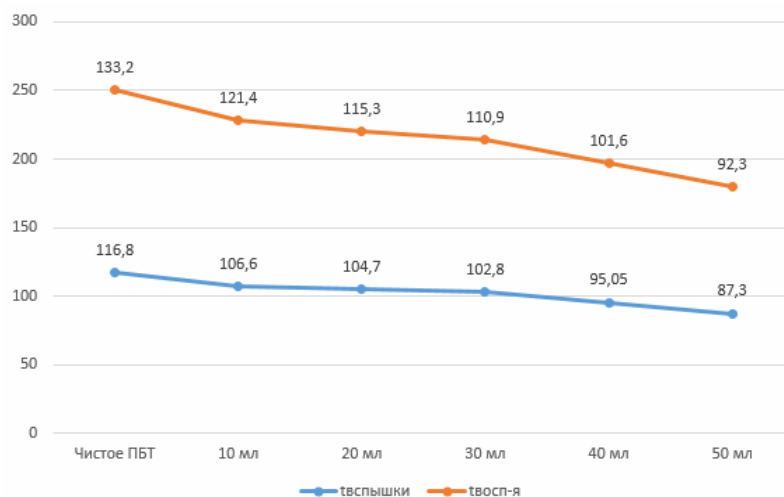


Рис. 1. Температура вспышки и воспламенения

В результате проведения опытов наблюдалось снижение температуры вспышки и воспламенения с увеличением концентрации дизельных дистиллятов вторичной перегонки.

Температура вспышки напрямую связана со свойствами испарения топлива. При повышении температуры жидкость расширяется молекулярно и испаряется быстрее. Топливо с более низкой температурой вспышки имеет более легкие и мелкие молекулы и легче испаряется. Для начала горения требуется меньше энергии [2]. Стоит отметить, что при этом повышается пожароопасность топлива, поэтому необ-

ходимо соблюдать меры предосторожности, необходимые для безопасного обращения с ним. В результате измерений при увеличении концентрации вторичного дистиллята дизельного топлива вязкость уменьшается (рис. 2).

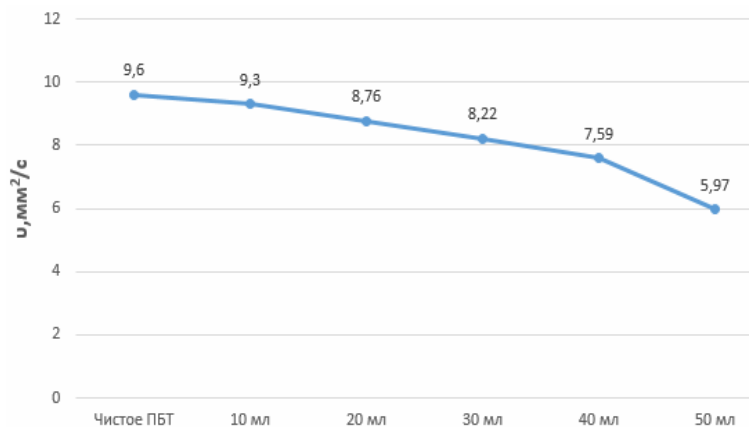


Рис. 2. Вязкость топлива

Использование топлива с меньшим значением вязкости увеличивает качество смешивания и не приводит к образованию крупных капель. Топливо высокой вязкости дольше испаряется и не может сгореть полностью. Дымовые газы становятся черными, более токсичными, что приводит к увеличению расход топлива. Плотность это не менее важный параметр, влияющий на качество и эффективность топлива (рис. 3).

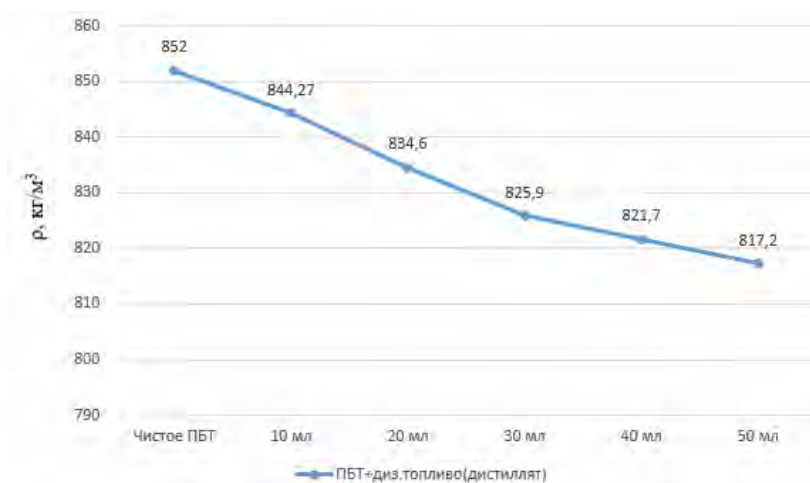


Рис. 3. Плотность

Плотность дизельного топлива определяется содержанием тяжелых фракций. Снижение плотности улучшает испаряемость и замедляет отложение углерода.

#### Литература

1. Ковальчук, А. А. Влияние вторичной перегонки на свойства печного бытового топлива и его смеси с этанолом /А. А. Ковальчук, Е. Н. Макеева // 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, Гомель гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 255–258.
2. Бикбаева, Г. А. Изучение и анализ оптимальных характеристик печного бытового топлива компаундированием из остаточных нефтепродуктов / Г. А. Бикбаева, И. Р. Сафиуллина, Н. Ю. Свечникова // Актуал. проблемы соврем. науки, техники и образования. – № 68. – 2010. – Т. 1. – С. 115–118.
  3. Топливное печное бытовое : пат. RU 2161175C1 / Зубков В. Н., Куприянов А. Л., Бацелев А. В., Мороз В. М., Якушев В. В., Чаговец А. Н., Митусова Т. Н. ; заявитель ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод». – № 2000115928/04 ; заявл. 22.06.200 ; опубл. 27.12.2000.
  4. Оценка эффективности использования топлива печного бытового в качестве резервного топлива на Новокуйбышевской ТЭЦ-1 / В. Е. Сидоров [и др.]. – Globus. – 2020. – № 1 (47). – С. 90–94.
  5. Морозова, О. Ю. Печное бытовое топливо-экологичная альтернатива резервного топлива для пиковых котельных / О. Ю. Морозова, Н. М. Кидун // Экология и защита окружающей среды : тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 5 мая 2021 г. / Белорус. гос. ун-т. – Минск : БГУ, 2021. – С. 260–262.
  6. Спиркин, В. Г. Химмотология топлив : учеб. пособие / В. Г. Спиркин. – РПУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 176 с.

## **КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ И ВЕТРЯНЫХ УСТАНОВОК ПАРАЛЛЕЛЬНО С ТРАДИЦИОННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ ДЛЯ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

**К. Сарыев**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

*Рассмотрены вопросы, связанные с бесперебойным снабжением электроэнергией потребителей, удаленных от центральной электростанции. В климатических условиях Туркменистана предложена схема подключения к энергосистеме комбинированных фотоэлектрических солнечных и ветровых электростанций, с учетом интенсивности солнечного излучения и потенциала ветра. Подробно поясняется способ подключения к электроэнергетической системе и описывается актуальность проектирования комбинированных систем по выработке электроэнергии. Для надежности расчетов в проектной работе предложена методика использования программного обеспечения.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая солнечная и ветряная станции, энергетическая система, потенциал солнечной и ветровой энергии, увеличение надежности, бесперебойное энергоснабжение, уменьшение потерь мощности и напряжения, Туркменистан.

Для повышения надежности бесперебойного электроснабжения децентрализованных потребителей за счет увеличения длительности режима потребления пиковых нагрузок потребителем разрабатывается технологическое обоснование использования электрической энергии подключенной к центральной линии электропередач, тем самым предусматривается снижения потерь на дополнительное регулирование параметров источника переменного тока комбинированной солнечной и ветровой электрической станции, а также расширение функциональных возможностей за счет расширения диапазона мощностей энергосистемы. Возможность сезонного отправления электрической энергии, выработанной комбинированными солнечными и ветряной электрическими станциями, подключенной к центральной линии электропередачи, заключается в полном использовании мощности электростанции от ком-

бинированных возобновляемых источников энергии. Рост потребителей электрической энергии, подключаемых к энергосистеме, требует увеличения мощности выработки генерации. При полном использовании мощности электростанции от комбинированных возобновляемых источников энергии сокращаются вредные выбросы в атмосферу ( $\text{CO}_2$ ) и продлевается срок службы газотурбинных установок.

Преобразование электрической энергии, вырабатываемой комбинированными солнечными фотоэлектрическими и ветровыми электростанциями, осуществляется в следующем порядке: фотоэлектрическая станция вырабатывает электрическую энергию постоянного тока, а преобразование на переменный ток выполняется с помощью инвертора. Ветровая электростанция вырабатывает электрическую энергию переменного тока, а преобразование на электрическую энергию постоянного тока выполняется с помощью инвертора. Далее в комбинированной системе осуществляется преобразование с помощью инвертора электрической энергии постоянного тока в электрическую энергию переменного тока и выдача ее на нагрузку.

Большое значение для эффективного функционирования в децентрализованных сетях имеет грамотно организованная система управления, которая выполняет следующие функции: в автономном режиме поддержка баланса мощностей; коммутация, управление мощностью регулируемых источников энергии; поддержка стабильности напряжения и чистоты децентрализованных сетей; обеспечение сбора и анализа информации, необходимых потребителям для «умного» управления нагрузками.

При этом электрическая энергия из энергосистемы используются одновременно с работающими ветровыми электрическими станциями и фотоэлектрическими станциями, при этом процесс аккумуляции электрической энергии на аккумуляторных батареях не используется, тем самым решается вопрос о технической эксплуатации аккумуляторных батарей (как заряд–разряд), так как срок эксплуатации зависит от вида аккумуляторных батарей и учитываются местные климатические условия, а также соблюдение рабочей температуры (от  $-20$  до  $+50$  °C).

В некоторых случаях автономную электроэнергетическую сеть целесообразно создавать в случае невозможности присоединения к централизованной линии электропередачи в регионах с большими ресурсами возобновляемых источников энергии. При этом мощность накопителей энергии должна быть рассчитана с учетом длительности вероятных интервалов времени без ветра и солнечной радиации, а это в свою очередь приводит к удорожанию полученной продукции от фотоэлектрических и ветроэлектрических установок. Возможность организовать работу децентрализованных сетей параллельно с централизованной сетью обернется значительной выгодой, поскольку снижается уровень капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Техническим результатом научной работы является повышение надежности электроснабжения потребителей за счет уменьшения длительности режима потребления пиковых нагрузок и полного исключения использования накопителя с требуемой величиной емкости, за счет снижения потерь на дополнительное регулирование параметров источника переменного тока расширение функциональных возможностей благодаря обеспечению расширения диапазона мощности энергосистемы, значительно превышающих мощности возобновляемых источников энергии и увеличению числа подключаемых к энергосистеме потребителей.

Применение результатов научной работы в энергетической системе при организации электроснабжения ответственных потребителей переменного тока с нагрузкой большей мощности обеспечивает ему критерий «промышленная применимость».

Для технологического обоснования предложенного способа поясняется чертежами, где представлена блок-схема для параллельного использования комбинированной электрической станции: электроэнергетическая система с комбинированной возобновляемыми источниками энергии, работающими одновременно для электроснабжения потребителей переменного тока. Пример создания схемы потребителей переменного и постоянного тока с использованием фотоэлектрической солнечной станций с установленной мощностью 7 МВт и два ветроэлектрических станций с установленной мощностью 1,5 МВт, а также при проектировании комбинированных электрических станций предусмотрено два дизельных генератора мощностью 1МВт (рис. 1).

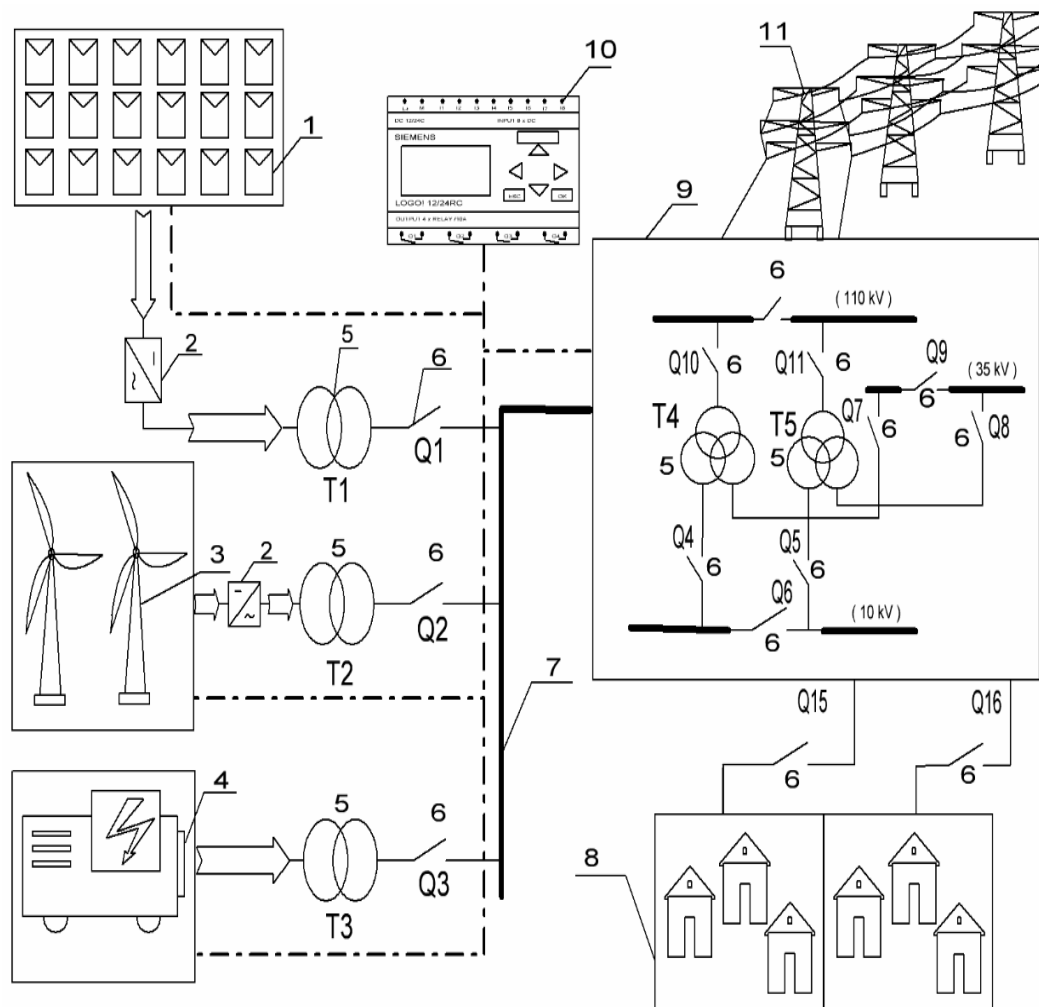


Рис. 1. Схема последовательного соединения комбинированных электрических станций к потребителю и к линии электропередачи

Таким образом, техническое обоснование предложенного способа позволяет повысить надежность электроснабжения потребителя за счет снижения влияния нестабильных источников переменного тока на режим работы потребителя, а также расширения функциональных возможностей способа за счет возможности укрупнения энергосистем и обеспечения увеличения мощности нагрузки потребителя и числа подключенных к энергосистеме потребителей. Это в свою очередь также позволяет унифицировать каждый элемент энергосистемы и организовать посезонно



преобразование излишек выработанной электрической энергии с подключением комбинированной электростанции в линию электропередачи, что и приведет к снижению затрат и времени на организацию бесперебойного электроснабжения децентрализованных потребителей.

#### Литература

1. Н. Алланазаров, К. Сарыев [и др.] «Интернет портал по возобновляемым источникам энергии». Государственная служба по интеллектуальной собственности министерства финансов и экономики Туркменистана. Свидетельство на программу для ЭВМ № 290. Дата регистрации в Государственном реестре: 25.01.2023.
2. K. Saryyev., S. Nazarov., A. Matyakubov. «Scientific and technical basis for the implementation of combined technologies using solar and wind energy in the conditions of Turkmenistan». IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1045 012127. ESDCA-II-2022.
3. A. Jumayev., E. Atayev. «Pilot projects of industrial photovoltaic solar stations». EEST-2021. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 979 (2022) 012142.

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ГОМЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

А. А. Белаш

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

Научные руководители: С. Г. Жуковец, Т. В. Алферова

*На примере Гомельских электрических сетей рассмотрена экономическая эффективность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга состояния линий электропередач (ЛЭП).*

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, линии электропередач, мониторинг состояния, инвестиционные затраты, эффективность, окупаемость.

В настоящее время наиболее совершенным и технологичным способом осмотра, мониторинга и диагностирования объектов электроэнергетики является использование БПЛА, применение которых позволяет оценить работоспособность, аварийность, бесперебойность работы оборудования подстанций и высоковольтных ЛЭП, являющихся самыми аварийными элементами энергосистемы в целом [1].

Для оценки эффективности применения БПЛА с целью мониторинга состояния линий электропередач представим расчет себестоимости регулярного (ежегодного) осмотра воздушных линий электрических сетей на примере Гомельской области с помощью БПЛА и обычной наземной группой.

Для расчета годовых расходов на проведение осмотров ЛЭП приведем данные по протяженности воздушных линий Гомельской области (табл. 1) [2].

Таблица 1

## Данные по протяженности воздушных линий и стоимости их осмотра

Показатель	Единицы измерения	Значения
Протяженность воздушных линий 35–330 кВ	км	6792
Стоимость осмотра воздушных линий 35–330 кВ	руб./км	25

Для определения количества бригад, необходимых для осмотра всей протяженности воздушных линий, рассчитаем годовые расходы на проведение их осмотров (табл. 2).

Таблица 2

## Расчет годовых расходов на проведение осмотров ВЛ

Показатель	Единицы измерения	Значения
Годовые расходы на проведение осмотров, руб.	руб.	$6792 \times 25 = 174300$
Производительность одной бригады	км/сут.	16
Производительность одного беспилотных летательных аппаратов	км/сут.	200
Количество дней для осмотра одной бригадой, дней	дн.	$\frac{6792}{16} = 424,5$
Количество дней для осмотра одним беспилотным летательным аппаратом, дней	дн.	$\frac{6792}{200} = 33,96$
Среднее число рабочих дней в году	дн.	250
Число необходимых бригад	бригада	$1,698 \approx 2$
Число необходимых беспилотных летательных аппаратов	беспилотные летательные аппараты	$0,136 \approx 1$

Единовременные инвестиционные затраты и амортизационные отчисления приведены в табл. 3, годовые эксплуатационные расходы для группы, использующей БПЛА в табл. 4, для обычной наземной группы – в табл. 5.

Таблица 3

## Единовременные инвестиционные затраты и амортизационные отчисления

Показатель	Инвестиции единовременные, руб.	Срок службы, лет	Амортизационные отчисления за год, руб.
Дрон с программным обеспечением	50000	5	10000
Добавочные комплектующие	30000	5	6000
Автомобиль	50000	10	5000
<i>Итого</i>	130000	–	21000

Таблица 4

## Годовые эксплуатационные расходы для группы, использующей БПЛА

Показатель	Значения
Зарботная плата, руб.	$U_{зп} = Ч \cdot ЗП_{ср} \cdot 12 = 2 \cdot 2000 \cdot 12 = 48000$
Отчисления на социальные нужды, руб.	$U_{сн} = \frac{H_{соц} + H_{стр.н.с.}}{100} U_{зп} = \frac{34 + 0,6}{100} 48000 = 16608$
Амортизационные отчисления, руб.	$U_{ам} = 21000$
<i>Итого</i> , руб.	$\mathcal{E}_{год1} = 85608$

Таблица 5

## Годовые расходы для обычной наземной группы

Показатель	Значения
Зарботная плата, руб.	$U_{зп} = БЧЗП_{ср} \times 12 = 2 \times 3 \times 1500 \times 12 = 108000$
Отчисления на социальные нужды, руб.	$U_{сн} = \frac{H_{соц} + H_{стр.н.с.}}{100} U_{зп} = \frac{34 + 0,6}{100} \times 108000 = 37368$
<i>Итого</i> , руб.	$\mathcal{E}_{год2} = 145368$

Разница годовых эксплуатационных расходов без БПЛА и с БПЛА:

$$\mathcal{E}_{год} = \mathcal{E}_{год2} - \mathcal{E}_{год1} = 145368 - 85608 = 59760 \text{ руб.}$$

Рассчитаем простой и динамический сроки окупаемости.

1) статический срок окупаемости:

$$T_{ст} = \frac{K}{\mathcal{E}_{год}} = \frac{130000}{59760} = 2,17 \text{ года;}$$

2) расчет динамического срока окупаемости приведен в табл. 9, а графическое представление статического и динамического сроков окупаемости на рис. 11.

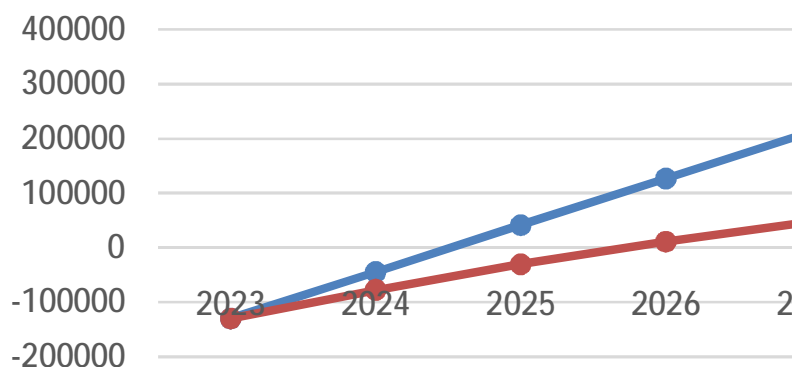


Рис. 11. Графическое представление статического и динамического сроков окупаемости

## Расчет динамического срока окупаемости

Год	Капиталовложения $K_t$ , руб.	Экономия, $\Delta_t$ руб.	Коэффициент дисконтирования $d_t$	Дисконтированный поток наличности, руб.	Чистый дисконтированный доход при $E = 13\%$ , руб.
0	130000	–	1,0000	–130000,00	–130000,00
1	–	59760	0,8850	52884,96	–77115,04
2	–	59760	0,7831	46800,85	–30314,20
3	–	59760	0,6931	41416,68	11102,48

Динамический срок окупаемости:

$$T_{\text{дин}} = t - \frac{\text{ЧДД}_t}{\text{ЧДД}_{t+1} - \text{ЧДД}_t} \cdot 2 - \frac{-30314,20}{11102,48 - (-30314,20)} = 2,73 \text{ года.}$$

Таким образом, при полученных сроках окупаемости явно видна экономическая выгода применения БПЛА для мониторинга ЛЭП Гомельских электрических сетей.

## Литература

1. Скрябина, А. В. Применение БПЛА для диагностирования оборудования объектов электроэнергетики / А. В. Скрябина // Материалы Всерос. науч.-метод. конф. «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». – Оренбург, 1–3 февр. 2017. – С. 525–527.
2. О Гомельэнерго: производственная характеристика предприятия. – Режим доступа: <https://www.gomelenergo.by/about/>. – Дата доступа: 03.04.2024.

## ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА АРТЕЗИАНСКОЙ ВОДЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ ВОДОНОСНОГО ПЛАСТА

К. А. Агунович

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

Произведен анализ проб воды из артезианской скважины №451/Д-15 город Туров (глубина скважины – 333,5 метров) и скважины из агрогородка Радуга Ветковского района Гомельской области (глубина скважины – 18 метров). В ходе работы выявлена зависимость показателей качества воды от глубины водоносного пласта. По полученным данным сравнены показатели относительно норм СанПиН 2.1.4.12-23–2006, выявлены отклонения от требований к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Относительно превышающих параметров выбрана оптимальная водоподготовительная установка для дальнейшего удовлетворительного использования скважины.

**Ключевые слова:** артезианская скважина, показатель качества, анализ воды, водоподготовительная установка, сравнительный анализ.

Для человека чистая питьевая вода играет огромную роль: она необходима для поддержания жизнедеятельности и сохранения здоровья. Поэтому данная работа своей целью ставит обнаружение нарушений качества проб воды из различных скважин в соответствии с нормами СанПиН 2.1.4.12-23-2006, который соответствует гигиеническим требованиям к воде из источников нецентрализованного питьевого водоснабжения населения.

Для исследования были выбраны пробы из артезианской скважины № 451/Д-15 города Туров, (глубина скважины – 333,5 метров) и скважины из агрогородка Радуга Ветковского района Гомельской области (глубина скважины – 18 метров). Обозначим их как проба воды № 1 и № 2, соответственно.

В зависимости от глубины залегания пласта различают почвенные, грунтовые, артезианские воды и верховодку. Они образуются из-за скапливания жидкости в земле между водоупорными пластами. Несмотря на то что в каждом месте карта залегания слоев уникальна, было выявлено, что средняя глубина расположения почвенных вод – от нескольких см до 1,5 м; верховодка может занимать пространство от 0,4–1 м, редко достигает 5 м; грунтовые воды речных равнин – не превышают 20 м, граница артезианского бассейна – 0,7–1,5 км. Таким образом, проба № 1 принадлежит к артезианскому бассейну, а № 2 к грунтовому.

Процесс исследования начался с определения водородного показателя (рН). В зависимости от его величины изменяется скорость протекания химических реакций, степень коррозионной агрессивности воды, токсичность загрязняющих веществ. Он показывает интенсивность реакции, но не количество вещества. Определяли показатель двумя способами: с помощью кислотно-основной индикаторной бумаги и методом кислотно-основного титрования, добавляя к фиксированному объему фенолфталеина титрант.

Следующий критерий оценки – железо. В природе оно встречается в трех основных формах: истинно-растворенное, нерастворенное, коллоидное. Суммарную концентрацию всех форм называют «железо общее». Его определяли, проводя визуальное колориметрирование пробы на белом фоне при достаточной освещенности.

Показатель щелочности брали исходя из замера в миллиграммах эквивалентов на килограмм. Это показатель, который характеризует общее количество щелочных компонентов в воде. Чем выше значение общей щелочности, тем более щелочная вода. Для фиксации нужной концентрации титровали в присутствии индикаторов, меняющих свою окраску в зависимости от реакции среды.

Хлоридосодержание говорит нам о присутствии солей соляной кислоты. Все природные воды содержат в своем составе хлориды, чаще всего встречающиеся в виде натриевых, магниевых и кальциевых солей. Произвели расчет содержания хлоридов, предварительно определив количество необходимого вещества для проведения титрования.

Важным нормативом также является солесодержание. Солесодержание – условный показатель, характеризующий общее содержание в воде всех растворенных веществ, способных проводить электрический ток, то есть диссоциирующих на ионы; выражается в мг хлористого натрия в литре воды, эквивалентного измеренной величине электрической проводимости. Определяли параметры с помощью прибора серии ССТ-3300, проверяя электропроводность воды в мкСм/см, затем, переводя согласно эквиваленту, к примеру, удельную электропроводность водных растворов различных солей с концентрацией до 500 мг/дм<sup>3</sup> в условном пересчете на NaCl, можно примерно оценить из соотношения  $1 \text{ мкСм/см} = 0,6 \text{ мг/дм}$ .

Завершающим опытом стало определение жесткости. Жесткость воды – мера содержания в воде растворенных солей кальция и магния. Источником их являются в основном известняки и доломиты. Различают постоянную, временную и общую жесткость. Постоянная жесткость воды (некарбонатная) – часть общей жесткости воды, остающаяся после кипячения воды. Обусловливается содержанием сульфатов, хлоридов и других (кроме бикарбонатов) солей кальция и магния. При нагревании или кипячении воды они остаются в растворе.

Временная жесткость воды (устраиваемая, карбонатная) – часть общей жесткости, удаляющаяся кипячением воды, обусловливается содержанием бикарбонатов. При нагревании или кипячении воды бикарбонаты переходят в нерастворимые карбонаты, при этом жесткая вода умягчается.

Общая жесткость воды определяется как суммарное содержание в воде солей кальция и магния, выражается как сумма карбонатной и некарбонатной жесткости. Определяли содержание железа методом титрования.

Для удобства анализа полученных значений сведем все в таблицу.

Показатели	Вода из артезианской скважины № 451/Д-15 город Туров, (глубина скважины – 333,5 м)	Вода из скважины агрогородка Радуга Ветковского района Гомельской области (глубина скважины – 18 метров)	СанПиН 2.1.4.12-23–2006. «Санитарная охрана и гигиенические требования к качеству воды источников нецентрализованного питьевого водоснабжения населения»
рН	7	7	6–9
Железо общее, мг/л	0,1	0,2	0,3
Щелочность, мг · экв/л	0,4	7,2	6,5
Содержание хлоридов, мг/л	1	42,1	350
Общее Солеосодержание, мг/л	1,241	128,64	1000–1500
Жесткость (ж)	0,1	9,6	7

Зная данные показатели, можно дать пробам воды характеристику. Проба № 1 обладает нейтральной средой, является ультрапресной по минерализации и очень мягкой по жесткости. Все остальные показатели значительно меньше норм СанПиН, что говорит о высоком качестве. Вода из агрогородка радуга так же нейтральная, но по общему солеосодержанию – солоноватая, а по жесткости – жесткая. Таким образом, можно заметить, что единственным критерием, по которому есть отклонения, – жесткость. Поэтому для дальнейшего использования скважины в питьевых целях нужно использовать фильтр жесткости.

Наиболее популярными, распространенными, а также эффективными в борьбе против жесткости являются пять фильтров: половолоконный, электромагнитный, магнитный, ионообменный и система обратного осмоса. Половолоконный фильтр задерживает образования солей с размерами от 0,01 мкм с помощью специальной преграды. Задержанные в узких технологических протоках примеси удаляются промывкой. Электромагнитный фильтр с помощью своего поля превращает соли жесткости в мелкие кристаллы, которые не остаются в трубах и технике, промываются

потоком воды. Но этот умягчитель не изменяет химический состав, а лишь может повысить эксплуатационные сроки различных устройств. Например, его часто используют при установке теплых полов. Магнитный фильтр имеет схожий принцип работы, но предотвращает осаждение только при открытии крана и перемещении жидкости в трубах. Размещать его нужно достаточно близко к желаемой зоне, так как он имеет ограниченный радиус действия. Эти два фильтра не подходят, так как не изменяют самих показателей питьевой воды. Ионообменный фильтр уменьшает жесткость до 0,5 мг-экв/л при помощи гранулированной синтетической смолы, насыщенной в исходном состоянии натриевыми ионами. Жидкость, проходя через эту систему, обменивает соли кальция и магния на ионы наполнителя, тем самым уменьшая уровень жесткости. Система обратного осмоса наиболее эффективна. Она не пропускает молекулы солей, поэтому применяются в качестве самой надежной преграды опасным загрязнениям, однако требует постоянной замены фильтров и является наиболее дорогой по себестоимости.

Анализируя рынок данных фильтров, нам удалось найти воду с очень близкими показателями качества и данные, свидетельствовавшие о значительных изменениях после применения систем водоподготовки. Учитывая соотношение цена-качество, полволоконный фильтр является для нас оптимальным. Так, на входе в систему имея воду с показателем в 8,5, на выходе получаем с показателем 1,2.

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**А. Овулягулыев**

*Научно-практический центр «Возобновляемые источники энергии»  
Государственного энергетического института Туркменистана, г. Мары*

*Приведены основы научно-методологического подхода к созданию энергоэффективных животноводческих зданий и сооружений. Рассмотрена возможность применения в коровниках систем низкотемпературного лучистого отопления. Представлены результаты исследований систем лучистого отопления в лабораторных условиях научно-практического центра и рассмотрены перспективы их дальнейшего использования в сельском хозяйстве.*

**Ключевые слова:** животноводческие помещения, энергоэффективность, энергосбережение, лучистое отопление, инфракрасные излучатели.

В настоящее время одной из первоочередных задач Правительства Туркменистана является укрепление продовольственной безопасности страны. Уменьшение себестоимости и издержек в животноводстве (крупный рогатый скот) может быть достигнуто повышением энергоэффективности и снижением энергоемкости четырех производственных сельскохозяйственных предприятий. В течение последних 4 лет в Государственном энергетическом институте Туркменистана под руководством преподавателей и профессоров развивается и успешно функционирует научная школа по разработке энергоэффективных систем обеспечения параметров микроклимата (СОМ) животноводческих зданий, в том числе коровнических комплексов. Проблематика проводимых исследований сводится к решению двух основных технологических задач: минимизация (вплоть до нулевого значения) потребления животноводче-

скими и комплексами искусственно сгенерированной энергии; оптимизация конструктивного исполнения отопительно-вентиляционных систем в производственных сельскохозяйственных зданиях по критериям энергоэффективности, эксплуатационной надежности и повышения биологически-ветеринарных показателей содержащихся животных.

**Решение первой задачи** возможно путем разработки научно обоснованного методологического подхода, основное положение которого следующее: при наличии вне отапливаемых животноводческих зданиях в холодный период года постоянно действующих биологических тепловыделений от животных ( $Q_6$ ) теплофизические характеристики наружных ограждений должны обеспечивать такой удельный тепловой поток через них, чтобы предотвратить переохлаждение животных ( $\Sigma Q = 0$ ) при расчетной температуре наружного воздуха  $t_n$ . Наличие постоянных тепловыделений  $Q_6$  не позволяет рассчитывать теплофизические характеристики комплексов по аналогии с гражданскими зданиями из-за большой погрешности в расчетах [3, 4].

Отметим, что при нестационарных условиях теплообмена при низких температурах внутреннего воздуха  $t_v$  и высоких значениях относительной влажности  $\phi_6$  в коровниках добиться высокой точности определения  $\Delta_{тн}$  и  $\alpha_v$  не представляется возможным.

Другим неоспоримым преимуществом методики определения  $R_0^{тп}$  является учет взаимосвязи функционального технологического назначения животноводческих зданий с биологическими характеристиками содержащихся в них животных. Особенно важно при проектировании коровнических комплексов добиваться максимальной загрузки помещений путем рационального секционирования.

В процессе жизнедеятельности коровы, телята выделяют влагу  $j_{ж}$ , г/ч. Следовательно, для ассимиляции влагоизбытков в помещения коровников надо подавать минимально необходимое количество воздуха  $G_{н.мин}$  (кг/ч), определяемое по формуле

$$G_{н.мин} = \frac{G_{вл}}{d_{уд} - d_{пр}},$$

где  $G_{вл}$  – количество влаги, выделяемое всем поголовьем, г/ч, определяемое как

$$G_{вл} = jn,$$

где  $n$  – поголовье животных в рассматриваемом помещении, гол.;  $d_{уд}$  и  $d_{пр}$  – влагосодержание удаляемого из помещения и приточного воздуха соответственно, г/кг сухого воздуха. Таким образом, максимальные затраты теплоты на нагрев приточного наружного воздуха в холодный период года составляют:

$$Q_{наг} = Q_{вент}^{max} = C_v G_{н.мин} (t_n^1 - t_n),$$

где  $C_v$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °С);  $t_n^1$  – условная температура наружного воздуха, начиная с которой требуется его подогрев, °С.

Важно отметить, что необходимость затрачивать теплоту для нагрева наружного приточного воздуха не позволяет рассматривать животноводческие комплексы как полностью неотапливаемые. Условная температура наружного воздуха  $t_n^1$  определяется из теплового баланса каждого конкретного сооружения коровника:



$$t_n^1 = t_b - \frac{\sigma_6}{\frac{F}{R_0^{TP}} + c_b G_{n.min}}.$$

Анализ формулы позволяет сделать вывод, что при понижении текущей температуры наружного воздуха от  $t_n^1$  до расчетной температуры по своду правил теплозатраты на подогрев наружного воздуха увеличиваются от 0 до  $Q_{вент}^{max}$ , а в остальной период, когда текущая температура наружного воздуха  $t_n > t_n^1$ , в коровниках, имеются теплоизбытки (графическая интерпретация представлена на рис. 1).

Расчетная мощность дополнительных резервных систем отопления возрастает обратно пропорционально степени загрузки помещения животными  $a$ :

$$a = \frac{n_d}{n};$$

$$Q_{от}^{доп} = (n - n_d)q_{ж} = n(1 - a)q_{ж},$$

где  $n_d$  – действительное заполнение комплекса животными, голов;  $q_{ж}$  – явные тепловыделения от одного животного (коровы, теленка), Вт/голов.

Сделан вывод, что при условии неполного (нерасчетного) заполнения коровника зависимость по определению условной температуры наружного воздуха  $t_n^{1a}$  имеет следующий вид:

$$t_n^{1a} = t_b - \frac{aQ_6}{\frac{F}{R_0^{TP}} + c_b G_{n.min}}.$$

Общее энергопотребление  $Q_{от}$  складывается из затрат на нагрев минимального количества наружного приточного воздуха в холодный период года  $Q_{наг}$  (6) и мощности систем дополнительного отопления:

$$Q_{от} = Q_{наг} + Q_{от}^{доп}.$$

При исследовании второй задачи, а именно – выбора наиболее рациональной отопительной системы для восполнения дефицита теплоты  $Q_{от}$ , помещения содержания крупного рогатого скота, а также помещения со специфическими требованиями к параметрам микроклимата (телятники, доильные отделения, ветеринарные блоки, помещения содержания молочных) предлагается оборудовать системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

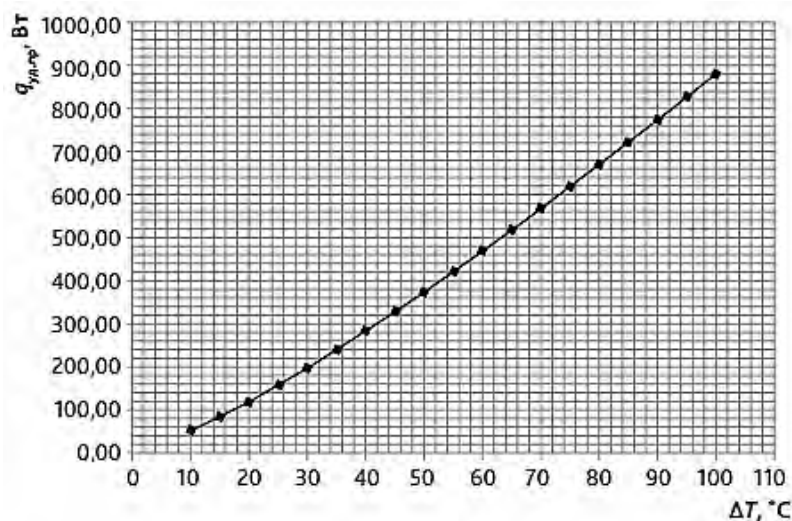


Рис. 1. Тепловая мощность 1 пог. м излучателя в зависимости от температурного напора

Лабораторные испытания систем водяного лучистого отопления показали их высокую эффективность, а полученные при исследованиях данные легли в основу «Рекомендаций по проектированию систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей марки Helios 750», являющихся, по сути, инженерной методикой для расчета теплового режима помещений различного назначения. Более высокие степени теплового комфорта в помещениях достигаются за счет повышения уровня радиационной температуры помещения, а также равномерного распределения температуры воздуха по высоте и отсутствия перегрева верхней зоны и недогрева нижней зоны помещения, что заметно повышает ветеринарные показатели продуктивности производства. Неоспоримым преимуществом, где наблюдаются повышенные значения концентрации аммиачных соединений в воздухе, является устройство системы отопления, не поддающееся коррозии, что снижает эксплуатационные затраты и, как следствие, себестоимость производства животноводства.

В заключение отметим, что основным преимуществом использования систем лучистого отопления в животноводческих помещениях является передача теплоты непосредственно поверхностям в помещении (в том числе поверхности тела животных) без нагрева воздуха помещения.

## ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ТУРКМЕНИСТАНЕ

О. Чарыева, Э. Непесов

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Научные руководители: Г. Ч. Алланов, А. А. Мухамметниязов

Приведены результаты расчетов по выбору СИП проводов для уменьшения потерь напряжения и энергии. Результаты расчетов показали, что замена проводников марки АС-25 на СИП-4 4x25 потери напряжения уменьшились на 1,23 раза, что в свою очередь доказывает эффективность их использования.

**Ключевые слова:** потери в линии, допустимый ток, СИП, эффективность.

Потери энергии происходят во всех элементах энергосистемы при преобразовании и передаче электрической энергии. Возникает необходимость о своевременном расширении электроэнергетической системы, и ее развитие должно опережать рост энергопотребления.

Воздушные линии электропередачи 0,4 кВ конструктивно состоят из токоведущего провода, опоры (деревянной, железобетонной) и изолятора для крепления проводника к опоре.

При строительстве воздушных линий электропередачи сетей напряжением 0,4 кВ электроэнергетической системы до сих пор применяют как деревянные опоры, так и железобетонные (железобетонные) опоры. Неоплетенные проводники присоединяются к колонне через штыревые фарфоровые или стеклянные изоляторы. Зачастую в сельской местности это совершается при повреждении воздушных линий электросети из-за различных повреждений изолирующих конструкций и падении проводника на землю. Электрические сети напряжением 0,4 кВ, по правилам эксплуатации, относятся к изолированным электрическим сетям с нейтралью.

В системах с изолированной нейтралью замыкание фазы на землю не вызывает автоматического отключения поврежденного участка сети. Но напряжение на неповрежденных фазах повышается до сетевого. В этих системах, если напряжение в цепи замыкания на землю превышает заданный предел, то замыкание не отключается. Без срабатывания или объединения сигнала с землей работа релейной защиты усугубляется малым током. Требования к заземлению смягчены, но с точки зрения промышленности заземление проводников в нейтрально-резонансно-заземленных и нейтрально-изолированных сетях представляет большую опасность для жилых помещений. В заземленном соединении могут возникать постоянные перенапряжения из-за неустойчивого горения электрода. Эти перенапряжения, охватывающие всю сеть, могут вызвать однофазное короткое замыкание на землю в другой точке сети.

За несколько лет наблюдения и ремонта воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ были выявлены нарушения в их работе. Недостатки воздушных линий электросетей 0,4 кВ: повышенная опасность в жилых помещениях (для людей) из-за чрезмерной протяженности линии электропередачи; перевес транспортных средств (транспорта), прерывающих передачу линии; возможность прикосновения людей к непокрытому проводнику; механические выбросы в линии электропередачи, воздействие ветра и частые тушения из-за воздействия ветвей деревьев; создание пожарной опасности при прохождении неизолированных проводов через лесные массивы; использование неучтенной электроэнергии; падение напряжения в сетях низкого напряжения.

Использование СИП вместо неизолированных проводов в существующих и вновь монтируемых воздушных линиях электропередачи 0,4 кВ с целью повышения надежности электроснабжения сельской местности и повышения благосостояния сельской местности приводит к ряду экономических преимуществ и надежности работа линии (рис. 1).

В рамках научной работы сделан расчет на снижение напряжения в существующих низковольтных сетях Туркменистана. Падение напряжения рассчитывалось по нагрузкам линии электропередачи марки АС-25, питающей этих потребителей (см. табл. 1).

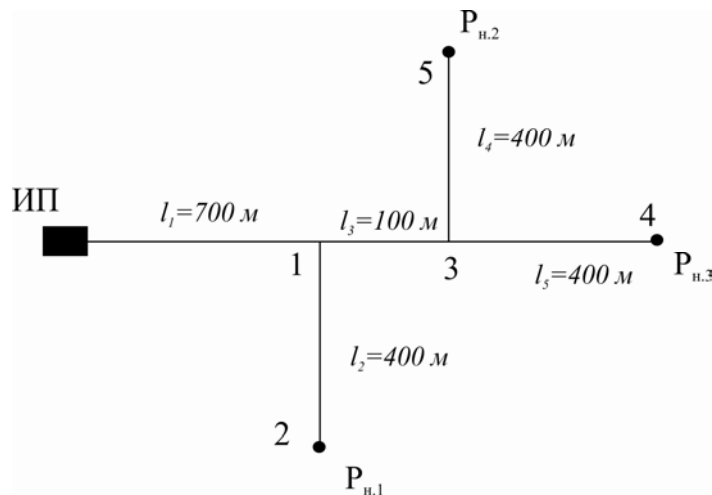


Рис. 1. Расчетная схема сети 0,4 кВ

Таблица 1

## Нагрузка потребителей

Номер потребителей	1	2	3
$P_{\text{наг}}$ , кВт	4,5	6,2	4,3

Расчитываем нагрузки на различных участках линии:

$$P_{3-5} = 6,2 \text{ кВт}; P_{3-4} = 4,3 \text{ кВт}; P_{1-3} = 10,5 \text{ кВт}; P_{1-2} = 4,5 \text{ кВт}; P_{ИМ-1} = 15 \text{ кВт}.$$

Расчитываем полную мощность на различных участках линии:

$$S_i = \frac{P_i}{\cos i\varphi};$$

$$S_{3-5} = 7,3 \text{ кВА}; S_{3-4} = 5,1 \text{ кВА}; S_{1-3} = 12,4 \text{ кВА}; S_{1-2} = 5,3 \text{ кВА}; P_{ИМ-1} = 17,7 \text{ кВА}.$$

Расчитываем ток на различных участках линии:

$$I_{\text{рас.}i} = \frac{P_i}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}} \cos i\varphi};$$

$$I_{3-5} = 10,54 \text{ А}; I_{3-4} = 7,3 \text{ А}; I_{1-3} = 17,85 \text{ А}; I_{1-2} = 7,65 \text{ А}; I_{ИМ-1} = 25,5 \text{ А}.$$

Расчитаем потери напряжения на участках линии, марки АС-25:

$$\Delta U_i = \left( \frac{S_i L_i}{(\sqrt{3}U_{\text{НОМ}})} \right) (R_{l.i} \cos_i \varphi + X_{l.i} \sin_i \varphi);$$

$$\Delta U_{3-5} = 5,5 \text{ В}; \Delta U_{3-4} = 3,9 \text{ В}; \Delta U_{1-3} = 2,36 \text{ В}; \Delta U_{1-2} = 4,1 \text{ В}; \Delta U_{IM-1} = 23,5 \text{ В}.$$

Расчитаем потери напряжения на участках линии, марки АС-25 в процентном соотношении:

$$\Delta U \%_i = \left( \frac{\Delta U_i}{U_{\text{ном}}} \right) 100 \%;$$

$$\Delta U \%_{3-5} = 1,4 \% ; \Delta U \%_{3-4} = 1 \% ; \Delta U \%_{1-3} = 0,6 \% ; \Delta U \%_{1-2} = 1,1 \% ; \Delta U \%_{IM-1} = 6,2 \% .$$

В результате проведенных расчетов выбираем СИП, а результаты выбора параметров проводника занесем в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты выбора параметров проводника

Номер линии	Вид и сечение проводника	Споротивление проводника	
		активное, $R_0$ , Ом/км	реактивное, $X_0$ , Ом/км
3-5	СИП-4 4x25	1,2	0,089
3-4	СИП-4 4x25	1,2	0,089
1-3	СИП-4 4x25	1,2	0,089
1-2	СИП-4 4x25	1,2	0,089
IM-1	СИП-4 4x25	1,2	0,089

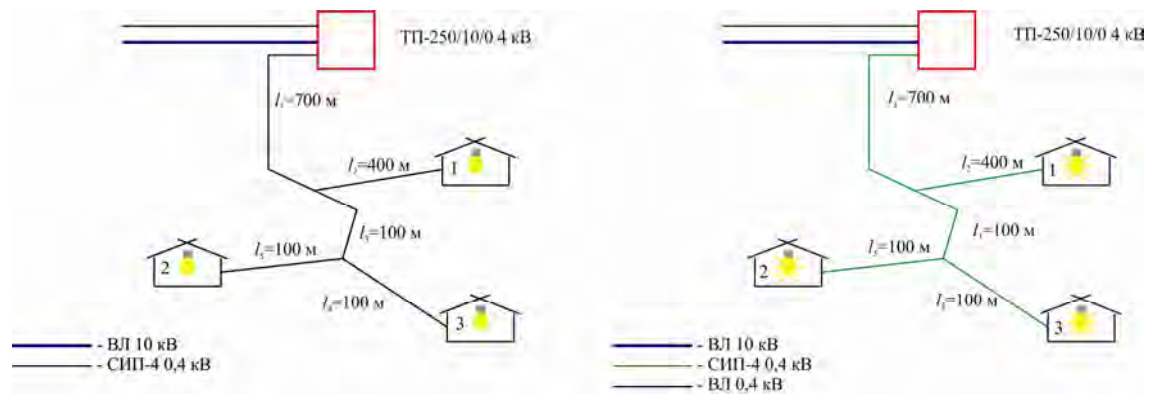


Рис. 2. Схема карты рассчитанной и вновь выбранной сети

В табл. 3 приведены результаты электрических расчетов выбранной низковольтной сети и ранее существующей схемы.

**Результаты электрических расчетов вновь выбранной низковольтной сети  
и ранее существующей схемы**

Линия	Длина линии, $l_i$ , м	Полная мощность, $S_i$ , кВА	Расчет текущий, $I_{расч. i}$ , А	Допустимый ток, $I_{доп. i}$ , А/А	Потеря напряжения, %
3–5	400	7,3	10,54	$\frac{142}{130}$	$\frac{1,4}{1,2}$
3–4	400	5,1	5,1	$\frac{142}{130}$	$\frac{1}{0,7}$
1–3	100	12,4	12,4	$\frac{142}{130}$	$\frac{0,6}{0,4}$
1–2	400	5,3	5,3	$\frac{142}{130}$	$\frac{1,1}{0,8}$
ИП-1	700	17,7	17,7	$\frac{142}{130}$	$\frac{6,2}{4,7}$

Как видно из расчетов, потери напряжения уменьшатся в 1,23 раза; а это значит, что общее количество столбцов уменьшится; устраняются затраты на перемещение; это устраняются затраты на молочные изоляторы; уменьшаются затраты на техническое обслуживание линии; монтаж линии будет проще и позволит выполнить его быстрее; повышается безопасность использования сети; в определенной степени предотвращается безответственное использование электроэнергии; Увеличивается срок службы.

Литература

1. Техническая коллекция ENSTO. Решения для воздушных линий электропередачи напряжением 0,4–35 кВ. – 2018. – 101 с.
2. Федоров, А. А. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий / А. А. Федоров, Л. Е. Старкова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
3. Кабышев, А. В. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок: Учебное пособие / А. В. Кабышев, С. Г. Обухов – Томск : ТПУ, 2006. – 248 с.

## ИННОВАЦИИ РОБОТОТЕХНИКИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

**Ю. И. Бондарев**

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

Научный руководитель А. О. Добродей

*Рассмотрено практическое применение роботов и беспилотных летающих автоматов в энергетике. Анализируются их преимущества и недостатки, технические возможности. Приведены примеры их использования.*

**Ключевые слова:** роботы, работа на высоте, беспилотники.

Один из видов сервисных роботов, используемых в электроэнергетике, – робот для контроля и очистки высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП).

В энергетике также используют и БПЛА, в том числе, для инспекции и очистки высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) (рис. 1). Преимущество такого подхода в том, что обзорный робот совмещен с беспилотной летающей платформой, поэтому на провода он добирается своим ходом, не требуя использования людей с лицензией и навыками высотных работ. Выполнив работу, робот также самостоятельно спускается вниз.

Беспилотники – это эффективное средство для использования в энергетике, в частности в электроэнергетике. Они могут применяться, например, для обследования высотных и линейных сооружений (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид робота для очистки линий электропередачи



Рис. 2. Внешний вид LineRanger, Hydro-Quebec

Беспилотники предназначены для обследования состояния расщепленной фазы ЛЭП.

Благодаря этому робот позволяет быстро обследовать большие фрагменты ЛЭП, включая участки, к которым сложно подобраться людям. Управление движением робота и поворотами камеры осуществляется с пульта дистанционного управления,



на экран которого выводится изображение с камеры робота. Робот может оснащаться дополнительной полезной нагрузкой, в частности LineCore для мониторинга степени коррозии проводов или устройством LineOhm для оценки состояния соединения проводов (рис. 3, 4).



Рис. 3. Пульт управления беспилотными летательными аппаратами



Рис. 4. Робот из университета Джорджии, США

Преимущества использования БПЛА в сфере электроэнергетики:

- оперативность: БПЛА позволяет вести обследования со скоростью в десятки километров в час или, наоборот, в режиме зависания у необходимой точки. Это обеспечивает выигрыш в скорости контроля по-сравнению с традиционным способом обследования с земли;
- объективность: снижается роль человеческого фактора. Остаются документы обследования в виде фото и видеоматериалов;
- качество: высокое разрешение получаемых материалов, их гео-привязка;



– безопасность: использование беспилотника вместо сотрудников снижает вероятность несчастных случаев. Особенно по сравнению с использованием промышленных альпинистов;

– экономика: «экипаж» беспилотника – достаточно двух человек, которые при необходимости могут обследовать до 200 км ЛЭП в день.

Виды использования БПЛА в электроэнергетике:

– мониторинг (оптический и тепловизионный) для выявления аварийных ситуаций и перегревов;

– инвентаризацию опор и объектов инфраструктуры;

– определение материалов опор;

– выявление отклонений от проектного положения элементов опор (траверсы от горизонтали, разворот траверсы) от ледохода, размывания тальми или дождевыми водами

– контроль коррозии деталей опор, оголения и ржавления арматуры

– выявление деформации опор;

– выявление нарушений лакокрасочного или цинкового покрытия;

– выявление повреждений металлоконструкций;

– выявление трещин, раковин, щелей и пятен на бетоне;

– отклонение геометрических размеров фундамента от проектных;

– недостаточное заглубление фундаментов опор и ж/б стоек;

– наличие трещин, сколов бетона и обнажение арматуры наземной части;

– дефекты антикоррозийной защиты и коррозия оголовников и арматуры;

– отсутствие или неправильная установка ригелей, предусмотренных проектом;

– материал изоляторов (наличие изоляторов из разного материала и разного диаметра на обследуемой опоре и в одной гирлянде);

– контроль количества изоляторов в гирлянде;

– механические повреждения фарфора или стекла изоляторов;

– загрязнение изоляторов промышленными уносами (с указанием цвета изоляторов);

– загрязнение изоляторов птицами;

– контроль мест установки и наличия повреждения гасителей вибрации и распорок;



Рис. 4. Pacific Gas and Electric Company (PG&E) в США

Конкретный пример использования беспилотных летающих аппаратов (БЛА) и роботов для контроля и обслуживания высоковольтных линий электропередач можно найти в опыте энергетических компаний в различных странах.

Одним из примеров такого использования является опыт компании Pacific Gas and Electric Company (PG&E) в США (рис. 4). PG&E начала использовать БПЛА и роботов для инспекции и обслуживания своих высоковольтных линий электропередач в труднодоступных районах, таких как гористая местность или лесистые участки. Они применили технологии, такие как инфракрасная тепловизия, высококачественные камеры и LiDAR (лазерное сканирование), чтобы обнаруживать дефекты и проблемы на линиях без необходимости отправлять рабочих на высоту.

Экономическая выгода в использовании этих технологий заключается в нескольких аспектах:

- снижение операционных расходов: сокращение затрат на оплату труда и логистику, так как инспекции и обслуживание могут быть выполнены быстрее и эффективнее с помощью автоматизированных систем;

- повышение эффективности инспекций: БЛА и роботы могут проводить более частые и более детальные инспекции, что помогает выявлять проблемы на ранней стадии и предотвращать аварийные ситуации;

- увеличение безопасности и снижение рисков: Сокращение риска для работников, так как они могут избегать опасных условий, таких как работа на больших высотах или в труднодоступных местах.

Хотя точные цифры экономической выгоды в этом конкретном являются коммерческой тайной, но использование БПЛА и роботов для контроля и обслуживания высоковольтных линий электропередач позволяет энергетическим компаниям сокращать затраты, повышать эффективность и улучшать безопасность, что в конечном итоге приводит к экономической выгоде.

#### Литература

1. Применение роботов в энергетике. – Режим доступа: <https://powercoup.by/novyie-tehnologii/primenenie-robotov-v-energetike>. – Дата доступа: 10.04.2024.
2. Робототехника в энергетике. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/publications/promyshlennoe-oborudovanie/6522/>. – Дата доступа: 10.04.2024.

Научное издание

**ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ,  
ЭНЕРГЕТИКИ  
И УПРАВЛЕНИЯ**

**МАТЕРИАЛЫ  
XXIV Международной научно-технической  
конференции студентов, аспирантов  
и молодых ученых**

**Гомель, 25–26 апреля 2024 года**

**В двух частях  
Часть 1**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редактор *Т. Н. Мисюрова*

Компьютерная верстка: *Н. Б. Козловская, И. П. Минина*

Подписано в печать 25.09.24.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 27,43. Уч.-изд. л. 22,47.

Тираж 30 экз. Заказ № 575/13.

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.

пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель