

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

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

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

**Гомель, 28–29 апреля 2022 года**

**В двух частях  
Часть 1**

**Гомель 2022**

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

И88

Редакционная коллегия:

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

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

д-р техн. наук, проф. *И. А. Мурашко*

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

д-р техн. наук, проф. *Н. В. Грунтович*

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

канд. техн. наук, доц. *Д. Л. Стасенко*

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

канд. техн. наук, доц. *Н. В. Иноземцева*

канд. техн. наук *А. О. Добродей*

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

канд. техн. наук, доц. *В. В. Тодарев*

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

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

канд. экон. наук, доц. *Ю. А. Волкова*

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

Под общей редакцией д-ра техн. наук, доц. *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 XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 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*, 2022. – 275 с.

ISBN 978-985-535-497-1.

Содержатся материалы XXII 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 978-985-535-497-1 (ч. 1)

ISBN 978-985-535-499-5

© Оформление. Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени *П. О. Сухого*», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Волкова Ю. А.</i> Тенденции промышленного развития Республики Беларусь .....	8
---	---

## Секция I. МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Григорьев Ф. А., Мышкин Н. К.</i> Подбор дисперсионной среды из растительного сырья для пластичных смазочных материалов .....	14
<i>Докукин В. Д., Волнянко Е. Н.</i> Конечно-элементное моделирование напряженного состояния в системе «колесо – рельс» .....	17
<i>Докукин В. Д., Волнянко Е. Н.</i> Исследование микрогеометрии поверхности трения методом конфокальной лазерной микроскопии .....	20
<i>Хазеев Е. В., Стасенко Д. Л.</i> Построение математической модели гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке.....	23
<i>Бочаров Н. В., Степанкин И. Н.</i> 3D-визуализация цифрового отклика результатов компьютерной томографии керна (на примере керна Речицкого месторождения Припятского прогиба) .....	26
<i>Машечко Е. И., Шепелева И. С.</i> Низкоомные нефтяные коллекторы протерозойских отложений Осташковичского месторождения нефти.....	30
<i>Ланко О. А., Михайлов М. И.</i> Исследование влияния процентного содержания компонентов композиционного материала на максимальное напряжение при сжатии.....	33
<i>Крупа А. А., Стасенко Д. Л.</i> Магнитно-абразивная обработка листового проката из немагнитных материалов.....	35
<i>Гурбан О. К., Пинчук В. В.</i> Регенерация электрической энергии в жидкой среде ....	38
<i>Железнякова Ю. И., Стасенко Д. Л.</i> Расчет золотникового гидрораспределителя с улучшенными динамическими характеристиками .....	41
<i>Мазейко И. Д., Старовойтов Н. А.</i> Автоматизированное написание управляющих программ для токарных станков с ЧПУ с помощью САМ-приложения к КОМПАС-3D .....	44
<i>Порошина С. Л., Климович В. А., Порошин В. Д.</i> К вопросу оценки интенсивности проявления процессов рассоления продуктивных коллекторов и осаждения галита в добывающих скважинах по гидрохимическим данным.....	46
<i>Пупенко К. В., Андреевец Ю. А.</i> Определение геометрических параметров золотниковых пар секционного распределителя типа РАМ с LS-управлением .....	50
<i>Пикас Е. А., Рогов С. В.</i> Повышение качества производимой продукции и снижение количества брака.....	54
<i>Хазеев Е. В., Стасенко Д. Л.</i> Имитационное моделирование гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке в среде «Amesim» .....	56
<i>Симогостицкий Д. В., Абрамович О. К.</i> Актуальные вопросы анализа разработки нефтяных месторождений .....	59
<i>Дещеня А. Д., Кульгейко Г. С.</i> Определение параметров шероховатости поверхностей трения с учетом режима приработки .....	62
<i>Кудренко Г. Г., Попов В. Б.</i> Инновации в расчете подъемно-навесного устройства сельскохозяйственного трактора.....	65

<i>Асвинова П. В., Порошин В. Д.</i> Обработка и интерпретация гидрохимических данных в нефтепромысловых целях по межсолевой залежи нефти III блока Березинского месторождения .....	68
<i>Глазенкова Е. С., Михайлов М. И.</i> Исследование виброустойчивости шпиндельного узла обрабатывающего центра с ЧПУ .....	71
<i>Акулич В. С., Михайлов М. И.</i> Исследование влияния условий базирования инструментальных блоков на их статическую и динамическую точность .....	74
<i>Глазенкова Е. С., Михайлов М. И.</i> Влияние угла наклона винтовых зубьев концевых фрез на их напряженно-деформированное состояние .....	76
<i>Анопреенко М. В., Михайлов М. И.</i> Точность позиционирования промышленного робота RA 605 .....	79
<i>Шевченко А. В., Михайлов М. И.</i> Решение обратной задачи кинематики в условиях робототехнического комплекса .....	83
<i>Рогов С. В.</i> Применение магнитно-электрического метода упрочнения для повышения износостойкости поверхности и их восстановления .....	87

---

## Секция II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

---

<i>Гайниев А. А., Хубатхузин А. А.</i> Модификация поверхности цеолитов в качестве дисперсного наполнителя композиционных материалов .....	90
<i>Марущак Ю. И., Ленько К. А., Ясинская Н. Н., Петюль И. А.</i> Выбор оптимального количества испытаний при определении коэффициента тангенциального сопротивления .....	93
<i>Кузьменко Е. Д.</i> Сравнительный анализ методов поверхностной обработки сталей по формированию механических свойств .....	95
<i>Михальченко А. А., Невзорова А. Б.</i> Исследование качества деталей из различных видов пластика, изготовленных методом FDM-печати .....	99
<i>Астапкин А. С., Винидиктова Н. С., Царенко И. В.</i> Выбор пластификатора для получения полипропиленовых лент, полученных по технологии ориентационной вытяжки .....	102
<i>Глинников Е. С., Винидиктова Н. С., Стасенко Д. Л.</i> Оптимизация параметров электрического поля для извлечения летучих фракций углеводородов из нефти и нефтепродуктов .....	105
<i>Рябцев А. С., Винидиктова Н. С., Царенко И. В.</i> Влияние вазелинового масла на структуру и деформационно-прочностные свойства полипропиленовых лент, полученных по технологии ориентационной вытяжки .....	108
<i>Романцов Р. С., Прусенко И. Н.</i> Влияние огнеупорного наполнителя на протекание смоляного процесса в литейных стержнях .....	111
<i>Предчанко И. В., Одарченко И. Б.</i> Возможности применения методов нейросетевой кластеризации для оценки технологичности отливки .....	114
<i>Кашперов А. А., Кадолич Ж. В.</i> Материалы для имплантов опорно-двигательного аппарата человека .....	118
<i>Ходосовская О. Ю., Бобарикин Ю. Л.</i> Оценка влияния роликов обратной деформации в системе «обратный намот» на дугу прогиба металлокорда в процессе релаксации .....	120
<i>Тимофеев Е. С., Жаранов В. А.</i> Экологические параметры электроплавильных печей и методы контроля выбросов .....	123

<i>Магомедов Н. О., Жаранов В. А.</i> Применение предварительного подогрева шихты для электропечей малой и средней емкости .....	126
<i>Мартьянов Ю. В., Рудницкий В. М., Бобарикин Ю. Л.</i> Влияние настройки рихтовального устройства в узле намотки волочильного стана на прямолинейность тонкой проволоки .....	129
<i>Черняков Ю. Д., Одарченко И. Б.</i> Факторы, определяющие условия формирования отливок из хромистого чугуна в комбинированные формы .....	132
<i>Грудина Н. В., Даниленко Д. К., Кольцова И. А., Козлов В. И.</i> «Индустрия 4.0» как интеграция звеньев промышленной производственной цепи с применением «новейших информационных и коммуникационных технологий» .....	135
<i>Грудина Н. В., Кузмич А. Д., Кольцова И. А., Шантыко А. С.</i> Переход на безбумажные технологии – новые технологии для новой техники в концепции «Индустрии 4.0» .....	138
<i>Слепнев Г. А., Астапенко И. В.</i> Анализ влияния геометрии круглого периодического арматурного профиля на деформационно-кинематические параметры конца прокатки .....	141
<i>Панковец И. А., Верещагин М. Н.</i> Исследование различных стресс-факторов, влияющих на качество поверхности при прокате в черновой группе клетей заготовки сечением 250 × 300 мм .....	145
<i>Петрусевич В. А., Астапенко И. В.</i> Анализ влияния вращения волоки на напряженное состояние очага деформации при волочении стали .....	148
<i>Бовкало М. А., Астапенко И. В.</i> Совершенствование режимов прокатки высокоуглеродистой катанки Ø 5,5 мм в условиях проволочного стана 150 СПЦ-1 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» .....	152
<i>Авдеева Е. В., Михалко А. М.</i> Фильтрационные свойства волокнистых материалов на основе полиэтилена, полученных методом бесфильтрной вытяжки .....	155
<i>Путеев В. С., Бобарикин Ю. Л.</i> Влияние системы «мягкого» обжатия на качество непрерывнолитого слитка высокоуглеродистой стали .....	158
<i>Петрусевич В. А., Бобарикин Ю. Л.</i> Зависимость для определения величины технологичности свивки металлокорда из тонкой стальной высокоуглеродистой проволоки .....	160
<i>Рабков А. В., Поздняков Е. П., Куис Д. В., Сидоренко Т. И., Степанкин И. Н.</i> Износостойкость цементованных и нитроцементованных слоев стали 16CrMnS5 .....	162
<i>Рабков А. В., Поздняков Е. П., Куис Д. В., Сидоренко Т. И., Коротцов А. М., Степанкин И. Н.</i> Особенности структуры и свойств модифицированных слоев низколегированной конструкционной стали 18ХГТ .....	165

---

### Секция III. ЭНЕРГЕТИКА

---

<i>Мазурова А. С., Широков О. Г., Алфёрова Т. В.</i> Влияние светодиодной осветительной нагрузки на форму кривой потребляемого электрического тока .....	169
<i>Таранко Е. В., Ковганов З. В., Попкова Н. А.</i> Анализ путей решения экологической проблемы отработавшего ядерного топлива .....	172
<i>Коновалов Д. Е., Ковзик А. В., Селиверстов Г. И.</i> Система контроля управления доступом: проблемы, решения и управление рисками безопасности ...	175

<i>Павлов В. В., Горносталь Д. М., Бычкова Л. Г.</i> Исследование колебательного контура с индуктивной переменной связью .....	177
<i>Сычевский М. Н., Рудченко Г. А.</i> Энергетический аудит. Отечественный и зарубежный опыт применения .....	180
<i>Светличный Д. А., Шаповалов А. В.</i> Способы интенсификации теплообмена в теплопередающих устройствах .....	183
<i>Панасик В. А., Широков О. Г.</i> Изучение пусковых характеристик светодиодных источников света .....	186
<i>Байдиков А. В., Никулина Т. Н.</i> Сравнительный анализ капитально-эксплуатационных затрат применения тепловых насосов .....	188
<i>Вегера М. А., Костюченко И. Д., Кориунов К. Е., Козлов А. В., Тиличенко М. П.</i> Частотное регулирование скорости вращения ротора однофазного конденсаторного асинхронного электродвигателя .....	191
<i>Никитенко В. П., Овсянник А. В.</i> Теплообмен при конденсации смесевых озонобезопасных хладагентов .....	194
<i>Шуст А. Е., Овсянник А. В.</i> Повышение энергетической эффективности тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина .....	197
<i>Бекаревич Д. А., Соловей Е. В., Кидун Н. М., Шаповалов А. В.</i> Применение замкнутых двухфазных теплопередающих систем в инновационных системах трансформации тепла .....	199
<i>Пархомчук Д. Г., Рудченко Г. А.</i> Повышение энергоэффективности предприятий теплоснабжения Республики Беларусь: этапы, направления, результаты .....	202
<i>Ованесян А. С., Пасюкевич И. А., Макеева Е. Н.</i> Эффективность работы теплообменных аппаратов работающих на диметиловом эфире и углекислом газе .....	205
<i>Ковальчук А. А., Макеева Е. Н.</i> Влияние вторичной перегонки на свойства нефтепродуктов .....	208
<i>Кориунов К. Е., Капанский А. А.</i> Программные средства для информатизации вспомогательных производственных процессов инженерно-технических служб предприятия .....	211
<i>Веромеев М. С., Проневич О. И.</i> Трансформатор Тесла по схеме качера Бровина .....	214
<i>Подушкин Д. В., Рудченко Г. А.</i> Цифровизация энергетического сектора Республики Беларусь .....	217
<i>Соловей Е. В., Шамело И. О., Морозова О. Ю.</i> Печное бытовое топливо – новый вид резервного топлива в энергосистеме Республики Беларусь .....	220
<i>Рабков А. Ю., Ревенок М. А.</i> Капельница Кельвина .....	223
<i>Речиц А. Г., Злотников И. И.</i> Изучение перспективных светопоглощающих покрытий для солнечных коллекторов .....	226
<i>Матьякубов А., Сарыев К. А.</i> Сценарии развития концентрированных солнечных станций в Туркменистане .....	229
<i>Оразмаммедов А., Гельдыев А. А., Оразмаммедов П.</i> Стратегия развития возобновляемой энергетики в Туркменистане как фактор защиты окружающей среды .....	232
<i>Акмырадова М. К., Хоммадова Г. С., Аннаев С.</i> Философия использования возобновляемых источников энергии .....	235
<i>Алланазаров Н. А., Сарыев В. Б.</i> Эффективность цифровых систем в оценке солнечной энергии .....	238

---

<b>Кинаятов М. Е., Барулин А. И.</b> Исследование надежности электромашиного аппарата по теплотехническим характеристикам .....	241
<b>Макрецкий А. В., Рыспаев К. С.</b> Сравнительный анализ потока отказов оборудования электросетевого комплекса в странах СНГ .....	244
<b>Доскенова С. Ж., Рыспаев К. С.</b> Интеграция электросетевого оборудования различных источников энергии .....	247
<b>Есенбаев Б. К., Рыспаев К. С.</b> Оценка солнечной активности и ветропатенциала Республики Казахстан на примере Костанайской области .....	250
<b>Исмоилов И. К., Турсунов Д. А., Жабборов Б. Т., Жабборов Т. К.</b> Дифференциальная техническая диагностика силовых маслонаполненных трансформаторов повышает достоверность при выявлении дефектов .....	254
<b>Насретдинова Ф. Н., Узбеков М. О.</b> Разработка экономико-статистической модели расхода электроэнергии для цементного завода г. Ферганы и оценка регулировочной способности по энергоэффективности .....	257
<b>Насретдинова Ф. Н., Умурзакова Г. Р., Узбеков М. О.</b> Нормирование расхода электроэнергии для многономенклатурного производства на примере СП ООО «Уз Ханву Инжиниринг» г. Фергана .....	260
<b>Койниш Е. В., Жуковец С. Г.</b> Внедрение в учебный процесс программного обеспечения для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Производство электроэнергии» .....	264
<b>Кохан А. С., Широков О. Г.</b> Моделирование провалов напряжения .....	266
<b>Милыбаева А. М., Рыспаев К. С.</b> Формирование энергетического пула при производстве электроэнергии на основе биогазовой установки .....	269
<b>Ниязбаев М. С., Рыспаев К. С.</b> Аппаратное обеспечение интеллектуальной платформы современной системы отопления .....	272

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

## ТЕНДЕНЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО РАЗВИТИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ю. А. Волкова

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

Промышленность – важнейший сектор экономики Республики Беларусь, который на сегодняшний день обеспечивает занятость около 23 % трудящихся и формирует более 92 % экспорта товаров. Промышленность в силу специфики своего функционирования является драйвером изменений во всех секторах экономики, оказывая определяющее влияние на уровень социально-экономического развития страны. Поэтому эффективность функционирования промышленного комплекса играет важнейшую роль в обеспечении конкурентоспособности и экономической безопасности государства [3, с. 65]. Особую актуальность в этой связи представляет исследование тенденций развития промышленности и динамики ее вклада в формирование основных социально-экономических показателей Республики Беларусь.

Важнейшим с точки зрения обеспечения экономической безопасности государства показателем является валовая добавленная стоимость, представляющая собой разность между выпуском товаров и (или) услуг и промежуточным потреблением. Промышленность формирует более 25 % валового внутреннего продукта Республики Беларусь. Анализ динамики валовой добавленной стоимости, формируемой отечественными промышленными предприятиями (рис. 1), позволяет заключить, что, несмотря на наблюдаемый рост анализируемого показателя в действующих ценах (167,4 % к уровню 2015 г.), в сопоставимых ценах общий прирост за 2015–2020 гг. составил лишь +11,6 %. При этом в 2016 и 2020 гг. отмечалось снижение валовой добавленной стоимости, формируемой промышленными предприятиями, по отношению к значениям предыдущих лет.

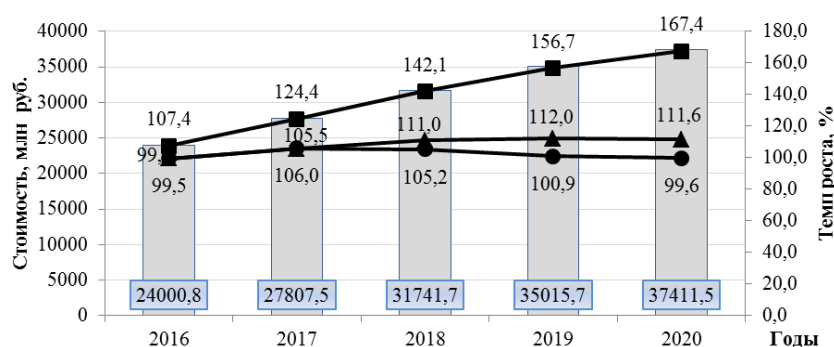


Рис. 1. Динамика валовой добавленной стоимости в промышленности в 2016–2020 гг.:

- – валовая добавленная стоимость в промышленности, млн руб.;
- – темп роста валовой добавленной стоимости по отношению к 2015 г. в постоянных ценах, %;
- ▲ – темп роста валовой добавленной стоимости по отношению к 2015 г. в сопоставимых ценах, %;
- – темп роста валовой добавленной стоимости по отношению к предыдущему году в сопоставимых ценах, %

Примечание. Разработано автором на основании данных Национального статистического комитета Республики Беларусь [4, с. 12].



Сложившаяся динамика валового внутреннего продукта промышленного комплекса является закономерным результатом изменения вклада промышленности в формирование таких показателей социально-экономического развития нашей страны, как среднесписочная численность занятых, стоимость основных средств, инвестиции в основной капитал (рис. 2).

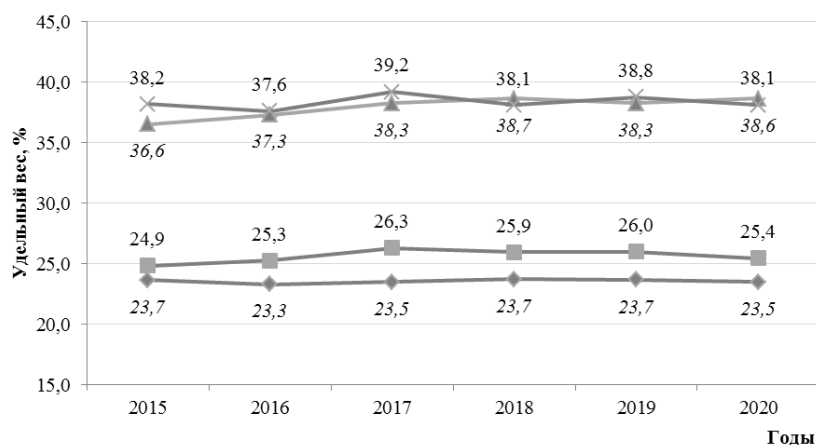


Рис. 2. Вклад промышленного комплекса в формирование основных социально-экономических показателей Республики Беларусь в 2011–2020 гг.:

— ромб — среднесписочная численность; — треугольник — стоимость основных средств; — квадрат — ВВП; — крест — инвестиции в основной капитал

Примечание. Разработано автором на основании данных Национального статистического комитета Республики Беларусь [4, с. 12].

Как видно из рис. 2, устойчиво положительную тенденцию изменения имеет лишь удельный вес первоначальной стоимости основных средств промышленности в стоимости основных средств в экономике. Имеет близкую вариацию и порядок значений показатель удельного веса инвестиций в основной капитал, что объясняется высокой капиталоемкостью производства. Понижительной динамикой характеризуется удельный вес валовой добавленной стоимости, формируемой в промышленности, и занятых в промышленности в общей численности занятых в экономике, что в целом характерно для постиндустриального этапа развития экономики.

Вместе с тем в настоящее время мировым трендом является реиндустриализация, тесно связанная с внедрением инноваций и цифровых технологий в производственные процессы. В научной литературе современный этап промышленного развития получил название «Индустрия 4.0». Данная концепция предполагает цифровизацию активов промышленных предприятий с внедрением в производство и потребление так называемых киберфизических систем – инженерных конструкций, управляемых удаленно посредством информационно-коммуникационных технологий [2, с. 108]. Таким образом, важными критериями динамики развития промышленности на сегодняшний день являются, прежде всего, расширение отраслей с высокой добавленной стоимостью, высоко- и среднетехнологичных производств и рост факторной производительности.

Анализ структуры обрабатывающей промышленности и динамики вклада в объем промышленного производства высокотехнологичных видов деятельности, представленных на рис. 3, позволяет заключить отсутствие существенных структурных сдвигов в пользу высокотехнологичных, а также среднетехнологичных высокого уровня видов экономической деятельности.

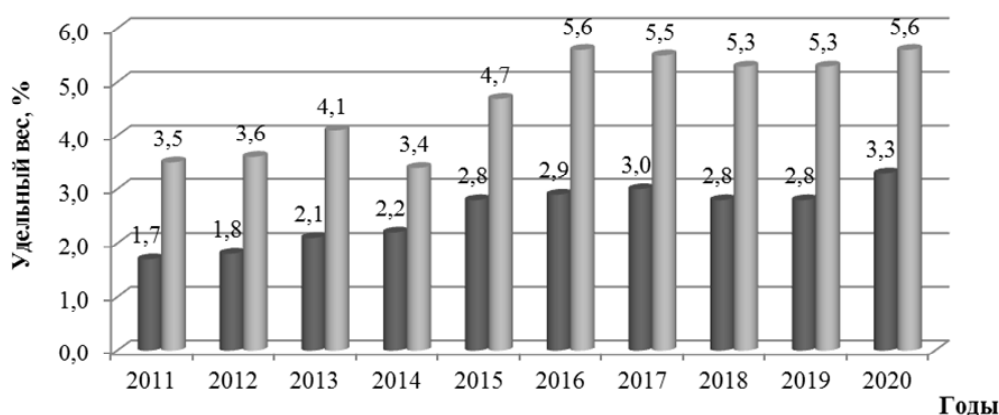


Рис. 3. Динамика доли высокотехнологичных видов деятельности в общем объеме промышленного производства в 2011–2020 гг.:  
 ■ – удельный вес высокотехнологичных видов деятельности в общем объеме промышленного производства, %; ■ – удельный вес высокотехнологичных производств в формировании валовой добавленной стоимости обрабатывающей промышленности, %  
 Примечание. Разработано автором на основании данных Национального статистического комитета Республики Беларусь [4, с. 14].

Из рис. 3 следует, что динамика показателей удельного веса высокотехнологичных видов деятельности в объеме промышленного производства носит колебательный характер с общей тенденцией к медленному росту. Вместе с тем современный этап развития экономики ставит перед отечественной промышленностью задачу более быстрой структурной трансформации промышленного комплекса с наращиванием объема производства в высокотехнологичных и среднетехнологичных (высокого уровня) видах деятельности, что обусловлено объективной необходимостью быстрого развития сферы ИКТ для нужд как населения, так и самой промышленности.

Еще одним фактором, обуславливающим необходимость развития высокотехнологичных производств, является более высокая их эффективность в использовании капитала и инвестиций, о чем свидетельствуют результаты проведенного анализа объема промышленного производства, приходящегося на 1 рубль инвестиций в основной капитал, осуществляемых в 2011–2020 гг., которые показали, что наиболее эффективными инвестициями являлись вложения в высокотехнологичные и среднетехнологичные высокого уровня производства [1]. К аналогичным выводам привел и анализ инновационной активности промышленных предприятий в отраслевом разрезе: высокотехнологичные отрасли отмечают наибольшую инновационную активность предприятий [1].

При этом необходимо отметить общий рост инновационной активности промышленных предприятий как по количеству организаций, осуществляющих технологические инновации, так и по удельному весу отгруженной ими инновационной продукции (рис. 4).

Для активизации инновационной деятельности промышленных предприятий целесообразна разработка и внедрение комплекса мер, стимулирующих организации к увеличению финансирования их инновационной деятельности с целью роста внутренних затрат промышленных организаций на исследования и разработки, что позволит в перспективе сохранить технологическую конкурентоспособность отечественного промышленного комплекса [2].

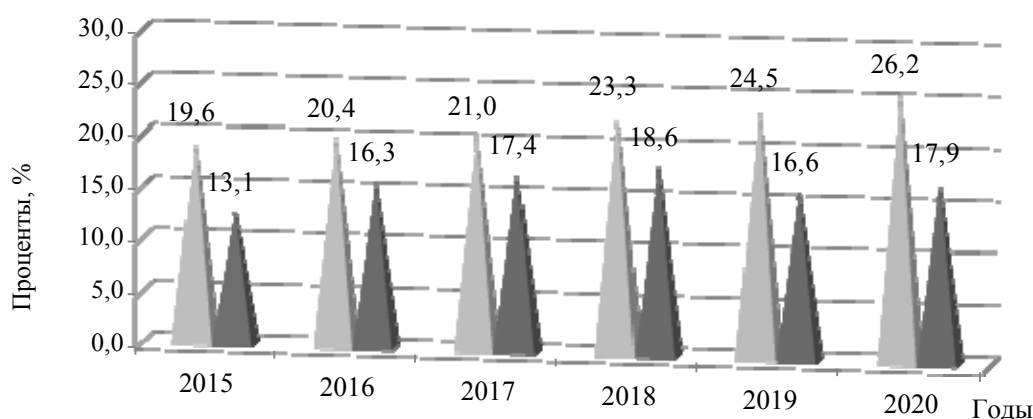


Рис. 4. Динамика инновационной активности промышленных организаций Республики Беларусь в 2015–2020 гг.:

- – удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации, %
- – удельный вес отгруженной инновационной продукции, %

Примечание. Разработано автором на основании данных Национального статистического комитета Республики Беларусь [5, с. 392].

Производительность труда является одним из важнейших показателей эффективности деятельности промышленных предприятий. В анализируемом периоде отмечается достаточно медленный рост данного показателя (рис. 5). При этом данный рост обусловлен не только увеличением валовой добавленной стоимости в промышленности, но и снижением среднесписочной численности работников промышленности с 936,8 тыс. человек в 2015 г. до 847,4 тыс. человек в 2020 г., что отражено в динамике темпов роста соответствующего показателя. Снижение численности работников промышленности, в свою очередь, не является однозначно отрицательной тенденцией, а отражает структурные изменения в экономике, обусловленные естественными предпосылками соответствующего этапа ее развития.

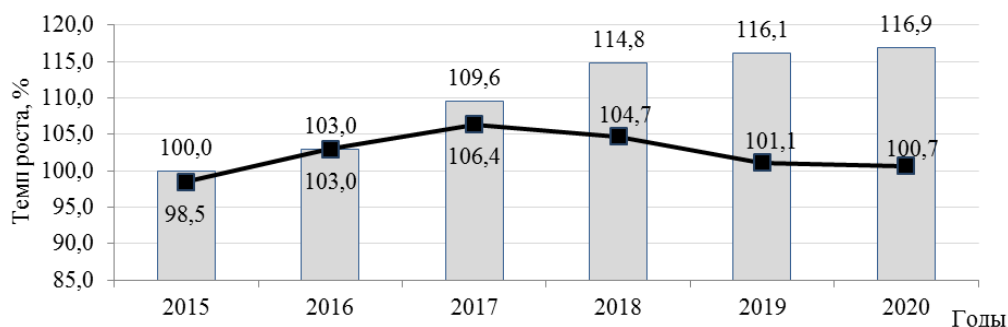


Рис. 5. Динамика темпов роста производительности труда в промышленности Республики Беларусь в 2015–2020 гг.:

- – темп роста производительности труда по добавленной стоимости в сопоставимых ценах по отношению к 2015 г., %
- – темп роста производительности труда по добавленной стоимости в сопоставимых ценах по отношению к предыдущему году, %

Примечание. Разработано автором на основании данных Национального статистического комитета Республики Беларусь [4, с. 20–47].

Устойчивой положительной динамикой в анализируемом периоде характеризовались показатели финансового результата деятельности промышленных организаций: рентабельность продаж и рентабельность продукции. Наиболее рентабельными видами деятельности (по показателю рентабельности продаж) в среднем за 2016–2020 гг. являются: производство основных фармацевтических продуктов и фармацевтических препаратов (21,5 %), производство химических продуктов (13,9 %); производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки (12,4 %). Наибольший прирост рентабельности продаж отмечается в производстве вычислительной, электронной и оптической аппаратуры (+5,9 п. п.) и производстве основных фармацевтических продуктов и фармацевтических препаратов (+3,0 п. п.) [4, с. 20–47], что опять свидетельствует о более высокой эффективности высокотехнологичных видов деятельности.

Характеризуя внешнеторговые аспекты промышленного развития, следует отметить небольшие колебательные изменения коэффициента покрытия импорта экспортом, который остается на уровне ниже 1, что говорит о преобладании импорта во внешнеторговом обороте. Характеризуя географическую структуру внешнеторговых отношений в 2021 г., следует отметить, что около 61 % внешней торговли товарами приходится на страны СНГ, и, в частности, Российскую Федерацию – 49 %. Вторым по значимости внешнеторговым партнером является Китай, затем Украина, Германия и т. д. По характеру внешнеторговых отношений со странами СНГ преобладает импорт (52 % импорта против 47 % экспорта), с Российской Федерацией 59 % импорта против 41 % экспорта, со странами вне СНГ преобладает экспорт (50,1 %) над импортом (49,9 %). Текущие условия санкционного давления диктуют необходимость переориентации внешней торговли промышленными товарами на рынки стран ЕАЭС.

Анализ динамики географической структуры отечественного производства промышленных товаров свидетельствует о снижении региональной дифференциации в объемах промышленного производства, проявляющуюся в снижении удельного веса регионов-лидеров (Гомельская, Витебская области, г. Минск) и соответствующем росте других регионов.

Таким образом, проведенный анализ динамики основных показателей эффективности функционирования промышленного комплекса Республики Беларусь в 2016–2020 гг. позволил установить наличие ряда тенденций его развития: устойчиво низких темпов прироста валовой добавленной стоимости в промышленности; устойчивого роста производительности труда по валовой добавленной стоимости с наличием тенденций к его замедлению и снижению среднесписочной численности работников промышленности; низкого колебательного роста удельного веса отгруженной инновационной продукции в общем объеме отгруженной и доли высокотехнологичных видов деятельности в объеме промышленного производства; снижение доли экспорта в общем объеме отгруженной инновационной продукции, а также устойчиво низких значений коэффициента покрытия импорта экспортом и показателя удельного веса экспорта в общем объеме промышленного производства; снижение удельного веса убыточных организаций при колебательной динамике и недостаточно высоких значениях показателей рентабельности продаж и рентабельности продукции, товаров, работ, услуг. В результате проведенного анализа основных тенденций развития промышленного комплекса Республики Беларусь можно сделать вывод о необходимости интенсификации промышленного развития за счет структурной трансформации промышленного комплекса с увеличением доли высокотехнологичных видов деятельности, что обуславливается, во-первых, более высоким уровнем

эффективности организаций данных видов деятельности по сравнению со средним по промышленности, во-вторых, необходимостью цифровой трансформации промышленных предприятий, предопределяющей опережающее развитие высокотехнологичных производств.

#### Литература

1. Волкова, Ю. А. Инвестиционная деятельность промышленных предприятий Республики Беларусь: тенденции и приоритеты развития / Ю. А. Волкова // Стратегия развития экономики Беларуси: вызовы, инструменты реализации и перспективы : сб. науч. ст. : в 2 т. Т. 1 / редкол.: В. Л. Гурский [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси ; Ин-т экономики НАН Беларуси. – Минск : Право и экономика, 2021. – С. 470–476.
2. Волкова, Ю. А. Особенности инновационной деятельности промышленных предприятий Республики Беларусь в условиях развития цифровой экономики / Ю. А. Волкова // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 2. – С. 107–117.
3. Волкова, Ю. А. Тенденции развития промышленного комплекса Республики Беларусь / Ю.А. Волкова // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 3. – С. 65–74.
4. Промышленность Республики Беларусь, 2021 : стат. буклет / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева (пред.) [и др.]. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2021. – 52 с.
5. Республика Беларусь, 2021 : стат. ежегодник / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева (пред.) [и др.]. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2021. – 408 с.

## СЕКЦИЯ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

---

### ПОДБОР ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Ф. А. Григорьев**

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

Научный руководитель Н. К. Мышкин

Пластичные смазочные материалы широко используются в самых разных отраслях промышленности и транспорта. Практически все они в своем составе содержат минеральные или синтетические масла в качестве дисперсионной среды (жидкой фазы), что создает целый ряд проблем при их утилизации. По этой причине, помимо улучшения функциональных свойств смазочных материалов, стали актуальны вопросы их экологичности и возможности их производства из возобновляемого биodeградируемого сырья [1]. Одним из путей решения этих проблем является использование в качестве дисперсионных сред растительных масел.

Целью данной работы является выбор наиболее перспективного растительного масла для использования в качестве дисперсионной среды в кальциевых пластичных смазочных материалах.

В качестве объектов исследования использовались масла растительного происхождения: рапсовое нерафинированное технического качества (Рт), рапсовое рафинированное пищевого качества (Рп), касторовое техническое (К) и льняное (Л). Масла не подвергались модифицированию для повышения окислительной стабильности или для улучшения их триботехнических характеристик. Для сравнительных целей применялось индустриальное масло И-40. В роли дисперсной фазы (твердого загустителя) использовался 12-гидроксистеарат кальция. Для определения оптимальной концентрации загустителя в качестве базы для сравнения использовался промышленный смазочный материал ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6467–74, далее – Ц201).

Оценка противоизносных свойств производилась на четырехшариковой машине трения в соответствии с ГОСТ 9490–75. Исследование коллоидной стабильности производилась на аппарате ЛИНТЕЛ АКС-20 с использованием ГОСТ 7142–74. Испытания по определению предела прочности пластичных смазочных материалов проводились на аппарате ЛИНТЕЛ СК-20 по ГОСТ 7143–73. Определение свободных щелочей и свободных органических кислот проводили в соответствии с ГОСТ 6707–76.

Для подбора необходимой концентрации дисперсного наполнителя, а также для сходства механических характеристик со смазочным материалом ЦИАТИМ-201, были изготовлены пластичные смазочные материалы с 10, 15 и 20 мас. % дисперсного наполнителя, с дисперсионной фазой в виде масла И-40. Результаты оценки механических и химических характеристик смазочных материалов представлены в табл. 1. Можно видеть, что полученные смазочные материалы на основе И-40 очень близки, а по некоторым параметрам превосходят стандартный образец. Также можно отметить, что по совокупности характеристик смазочный материал К15И40 сходен с ЦИАТИМ-201.

Некоторые отличия в пределе прочности на сдвиг может быть объяснено тем, что в смазке ЦИАТИМ-201 в качестве загущающего компонента используется стеарат лития, а также содержится антиокислительная присадка [2].

Таблица 1

**Химические и механические характеристики исследованных  
пластичных смазочных материалов**

Смазочный материал	Параметры			
	Содержание свободных щелочей в пересчете на NaOH, %	Коллоидная стабильность, %	Предел прочности на сдвиг при 50 °С, Па	Температура каплепадения, °С
Ц201	0,094	26	217	175
К10И40	0,121	–	–	–
К15И40	0,113	19,18	161	212
К20И40	0,199	17,59	361	213

Таким образом, использование 15 мас. % дисперсной фазы можно считать оптимальной концентрацией для получения пластичных смазочных материалов на основе растительного сырья. Результаты триботехнических характеристик дисперсионных сред представлены в табл. 2. Можно видеть, что применение растительных масел в качестве дисперсионной фазы перспективно, так как показатель износа растительных масел в среднем меньше на 22 % по сравнению с индустриальным маслом И-40.

Таблица 2

**Триботехнические характеристики дисперсионных сред [3]**

Тип масла	Показатель износа, мм
И-40	0,86
Касторовое	0,79
Льняное	0,73
Рапсовое П.	0,71
Рапсовое Т.	0,45

Изготовление пластичных смазочных материалов с дисперсионной фазой из растительного сырья производился по той же технологической схеме, что при использовании масла И-40. Химические, механические и триботехнические характеристики пластичных смазочных материалов с дисперсионной средой из растительного сырья представлены в табл. 3.

Более высокие триботехнические характеристики пластичных смазочных материалов с дисперсионной средой из растительного сырья по сравнению с Циатим-201 обусловлены наличием в них большого числа ненасыщенных жирных кислот, которые, попадая на поверхность сопрягаемых деталей, формируют прочный граничный слой [4]. В то же время процессы полимеризации растительных масел, в ходе техно-

логического процесса изготовления пластичных смазочных материалов, существенно повышают как предел прочности на сдвиг, так и коллоидную стабильность, что, в свою очередь, ухудшает эксплуатационные параметры полученных смазочных материалов. Причиной этого является то, что в процессе эксплуатации, под влиянием температуры и контактного давления, дисперсионная фаза будет меньше выделяться из матричной основы. С одной стороны, такое их свойство, как медленное выделение дисперсионной среды из дисперсной фазы, положительно сказывается на сроке их хранения, но, с другой стороны, меньшее количество выделяемого масла под воздействием контактного давления и температуры хуже защищает истираемые поверхности от износа.

Таблица 3

**Химические, механические и триботехнические характеристики  
исследованных пластичных смазочных материалов**

Параметр	Смазочный материал					
	Ц201	К15И40	К15Рп	К15Рт	К15К	К15Л
Содержание свободных щелочей в пересчете на NaOH, %	0,067	0,113	–	–	–	–
Содержание свободных кислот, мгКОН/г	–	–	0,691	2,128	0,613	0,735
Коллоидная стабильность, %	26	19,18	31	11	5	10
Предел прочности на сдвиг при 50 °С, Па	363	161	408	114	1023	2194
Температура каплепадения, °С	175	212	245	237	252	252
Показатель износа, мм	1,06	0,59	0,67	0,89	0,81	0,80

Результаты исследований свидетельствуют о перспективности применения растительных масел в качестве дисперсионной фазы в пластичных смазочных материалах. Полученные данные проясняют механизмы их влияния на химические, механические и триботехнические характеристики и указывают направление поиска соответствующих присадок на уменьшение влияния ненасыщенных жирных кислот, содержащихся в растительных маслах. Наилучшими триботехническими показателями обладает смазочный материал на основе технического рапсового масла, что делает его выбор для дальнейших исследований предпочтительным.

Литература

1. Директива 2009/28/ЕС 23.07.2009. Параграф 17. Критерии экологичности для биотоплива и биожидкостей. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/2571107/a7b26eafd8fd23d18ca4410ac5359e0e/>.
2. Фукс, И. Г. Пластичные смазки / И. Г. Фукс. – М. : Химия, 1972. – 158 с.
3. Григорьев, Ф. А. Смазочные материалы на основе смесей растительных масел с добавлением функциональных присадок / Ф. А. Григорьев, И. Н. Ковалева // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. VI Респ. науч.-техн. конф. молодых ученых / ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2020. – С. 139–40.
4. Lubricating properties of organic phosphate ester aqueous solutions / S. Liu [et al.] // Tribol. Lett. – 2010. – Vol. 37. – P. 573–580.



**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»****В. Д. Докукин***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Е. Н. Волнянко

В связи с ростом грузонапряженности на железных дорогах резко увеличился выход из строя рельсов по наиболее опасному дефекту – контактно-усталостному повреждению головки рельса. Для уменьшения напряженного состояния колеса и рельса применяются различные технологии лубрикации. Применение лубрикации способствует уменьшению силы трения при фрикционном взаимодействии колеса с рельсом. В данной работе рассматривается влияние коэффициента трения на долговечность рельса. Прогнозируется напряженно-деформируемое состояние колеса и рельса при их взаимодействии в зависимости от коэффициента трения. Моделирование задачи происходит в профессиональном программном обеспечении Ansys Mechanical.

Цель работы – разработка статико напряженной модели системы «колесо – рельс». Для выполнения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи: создать геометрическую модель системы «колесо – рельс»; выбрать физико-механические свойства материалов; провести моделирование конечно-элементной сетки; задать граничные условия и силовые нагружения; провести расчет; проанализировать полученные результаты моделирования.

**Принятое допущение.** Поскольку рассматривается движение колесной пары по прямому участку пути, то в силу симметрии граничных условий, действующих на колесную пару, в ходе численного исследования рассматривалась половина модели [1].

**Результаты моделирования.** В качестве материала колеса принималась марка стали 1 ГОСТ 10791–2011 ( $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $V = 0,3$ ;  $\sigma_t \approx 250$  МПа;  $\sigma_b \approx 1000$  МПа), в качестве материала рельса – сталь 76Ф ГОСТ 51686–2013 ( $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $V = 0,3$ ;  $\sigma_t \approx 800$  МПа;  $\sigma_b \approx 1180$  МПа).

В качестве глобальной системы координат при составлении расчетной модели была выбрана правая декартова система. Ось  $OY$  системы координат направлена вдоль рельса, ось  $OX$  – поперек рельса, ось  $OZ$  – вертикально вверх [1].

Производим настройку параметров конечно-элементной модели. Тип используемых элементов: квадратичные гексаэдральные и квадратичные тетраэдральные. Количество элементов – 58571; количество узлов – 105177 [1].

К расчетной модели прикладывались следующие граничные условия: запрет перемещения вдоль оси  $OX$  поверхности симметрии оси колесной пары; запрет перемещения вдоль оси  $OY$  на торцах рельсов; полный запрет перемещений на поверхностях опирания рельсов на шпалы. Ко внутренней стороне оси колесной пары против оси  $OZ$  приложено осевое давление, равное 230 кН. В первом варианте расчет системы ведется в неподвижном состоянии вагона. Во втором варианте учитывается крутящий момент ( $M = 7000$  Н · м), момент инерций (программа автоматически рассчитывает) и коэффициент трения  $f = 0,05$ . В третьем варианте задачи крутящий момент остается прежним, а коэффициент трения изменяется ( $f = 0,15$ ). Учитывается ускорение свободного падения.

Решение задачи проводим в упруго пластической постановке, т. е. с учетом пластических свойств материалов.

Для оценки ресурса рельса используется явление усталости материала. Подход к расчету, основанный на напряжениях, проводился с использованием постоянной амплитуды и пропорционального нагружения. В нашем случае минимальный и максимальный уровни напряжения не изменяются. Пропорциональное нагружение означает, что отношение главных напряжений есть константа и направления главных площадок не изменяются в течение всего времени нагружения. В программе используется метод SN. Этот метод использует линейные напряжения в качестве исходных, однако усталостное разрушение начинается при определенном уровне энергии пластических сдвиговых деформаций.

Для оценки сложного напряженного состояния системы «колесо – рельс», возникающего при движении железнодорожного состава, рассматривались эквивалентные напряжения по критерию Губера–Мизеса, как наиболее точно отражающие нагруженность для сталей. Расчет контакта производился с помощью аргумента Лагранжа [1].

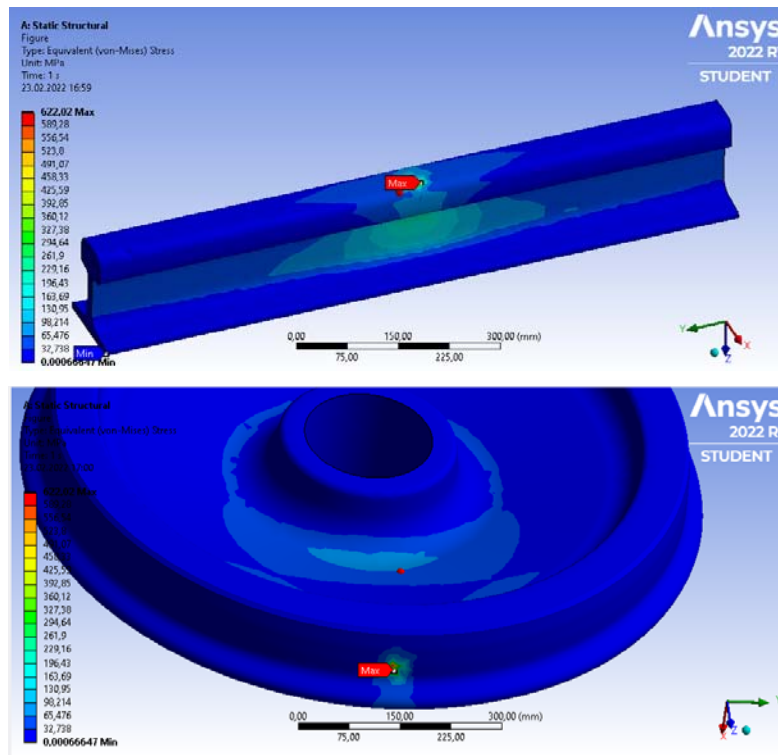


Рис. 1. Поле напряжений в системе «колесо – рельс»

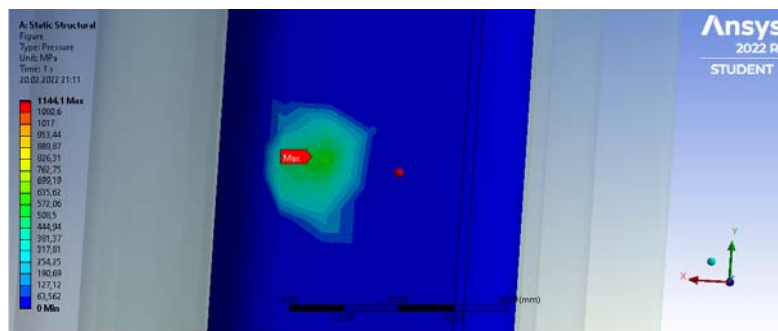
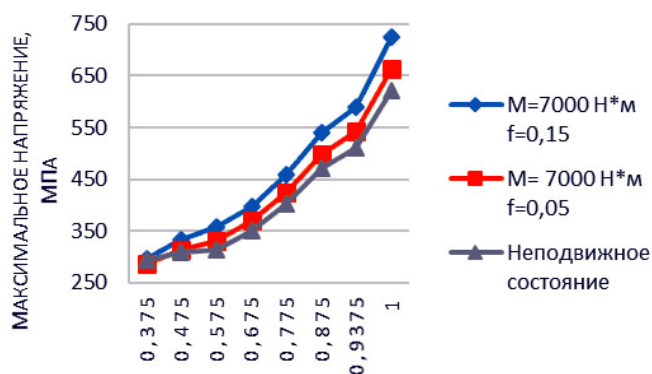


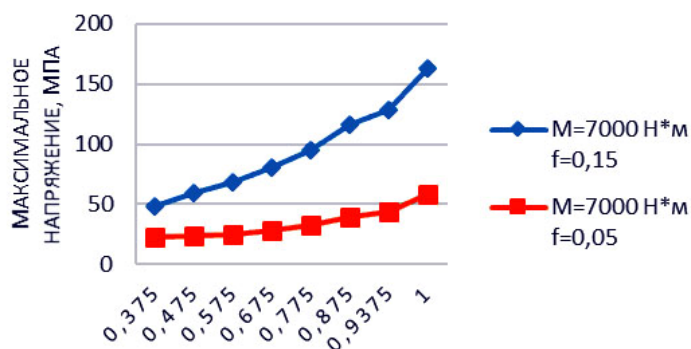
Рис. 2. Давление, возникающее в месте контакта колеса и рельса

Из полученных результатов видно, что напряжения в системе «колесо – рельс» (за исключением зоны контакта) при прямолинейном движении железнодорожного транспорта с разными коэффициентами трения имеют отличия.

В месте контакта колеса и рельса возникает зона повышенных напряжений размером около  $15 \times 15$  мм, максимальные напряжения в которой при неподвижном состоянии составляют 1145 МПа. При увеличении коэффициента трения происходит увеличение напряжений в зоне контакта колеса с рельсом (рис. 3, а). На это сказывается увеличение касательных сил трения в зоне контакта (рис. 3, б).



а)



б)

Рис. 3. График максимальных напряжений в системе «колесо – рельс» (а); напряжения, возникающие из-за воздействия силы трения в зоне контакта (б)

В результате моделирования было выявлено, что уменьшение коэффициента трения положительно сказывается на увеличении ресурса колеса и рельса. Использование автоматизированных расчетных пакетов может повысить скорость анализа различных технологических систем.

#### Литература

1. Кузьмицкий, Я. О. Конечно-элементное моделирование процесса перекатывания железнодорожного колеса через стык рельсов / Я. О. Кузьмицкий, Д. В. Шевченко, А. К. Беляев. – 2022. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/konechno-elementnoe-modelirovanie-protssessa-perekatyvaniya-zheleznodorozhnogo-kolesa-cherez-styk-relsov>. – Дата доступа: 02.03.2022.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ  
МЕТОДОМ КОНФОКАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ МИКРОСКОПИИ****В. Д. Докукин***Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Е. Н. Волнянко

Развитие новых прогрессивных технологических методов способствует конструированию более современных машин, снижению их себестоимости, уменьшению затрат труда на их изготовление. К числу важных достижений науки, открывающих новые возможности значительного повышения надежности машин, относятся новые методы оценки морфологии поверхностей обработанных деталей.

В настоящее время существуют две группы методов измерения шероховатости поверхности: щуповые и оптические. Щуповые – это контактные методы, когда измерения проводятся при помощи профилометра, чувствительного датчика, оборудованного тонкой иглой, с так называемой ощупывающей головкой. Оптические – это бесконтактные методы измерения шероховатости. К ним можно отнести измерения, проводимые с помощью приборов теневого сечения, приборов светового сечения, микроскопов интерференционных, действие которых основано на двулучевой интерференции света.

С появлением конфокальных лазерных сканирующих микроскопов (КЛСМ) у материаловедов появился прибор, при помощи которого можно построить 3D-модель рельефа поверхности исследуемого материала в широком диапазоне увеличений. Микроскоп позволяет получать полностью сфокусированное изображение объемных объектов с реалистичной цветопередачей при большом увеличении с высоким разрешением, недостижимым с помощью оптических микроскопов. В КЛСМ используются два источника света: источник белого света при работе в обычном оптическом режиме и лазер при работе в режиме лазерного сканирующего микроскопа.

В обычном оптическом режиме работы КЛСМ происходит многократная съемка поверхности излома при разных фокусных расстояниях оптической системы при полихромном освещении (светодиод белого свечения). Затем проводится программная обработка полученных изображений с целью получения интегрального 2D-изображения плоскости поверхности излома в натуральных цветах, состоящего из участков с максимальной резкостью.

В конфокальном режиме работы КЛСМ используется монохромное лазерное излучение, а матрица ПЗС (прибора с зарядовой связью) датчика находится в фокусе. Благодаря конфокальной плоскости отсекаются световые лучи, приходящие не из точки фокуса, что позволяет более точно определить профиль рельефа поверхности излома. Свет, излучаемый лазерным источником сканирующего микроскопа, фокусируется при помощи оптической системы, сканирующей по координатам  $x$  и  $y$ . В границах поля зрения сфокусированный луч сканирует по координатам  $x$  и  $y$  поверхность образца, и свет, отраженный от каждой точки, регистрируется записывающим устройством. Затем объектив смещается по координате  $z$  и сканирование поверхности повторяется. Это позволяет регистрировать информацию об интенсивности отраженного света для каждой точки области сканирования при всех возможных положениях объектива по оси  $z$ , принимая наиболее яркое отражение для каждой точки за положение фокуса. Таким образом, становится возможным синтезировать 3D-изображение по критерию яркости, отображающее профиль объекта. В дальнейшем осуществляется программная обработ-

ка, в процессе которой полученные результаты пересчитываются в  $z$ -координаты каждой точки поверхности, что позволяет получить 3D-модель поверхности и черно-белое 2D-изображение поверхности более высокого разрешения, чем в режиме оптического микроскопа.

Данные, полученные по лазерному каналу, объединяются затем с изображением, полученным от источника белого света. Итоговое изображение, помимо информации о яркости, включает в себя данные о цвете и профиле поверхности объекта [2]. В результате пользователь получает картинку, соперничающую по разрешению с растровым электронным микроскопом (РЭМ) [3] при увеличении до  $\times 5000$  и являющуюся при этом полноцветным изображением [4], [5].

Метод КЛСМ позволяет проводить измерения профилей рельефа поверхности и шероховатости без повреждения объекта, бесконтактный метод позволяет работать даже с мягкими объектами, например биологическими. Тонкий лазерный луч меньше диаметра иглы обычного профилометра, поэтому дает возможность проводить более точные измерения объектов сложной формы [6]. С применением метода КЛСМ стало возможным измерение геометрических характеристик профиля поперечного сечения, объема объектов на поверхности, площади поверхности и отношения заданной площади к общей площади объекта в любом месте на экране. Доступны такие функции, как высокоскоростное и высокоточное сшивание изображения с применением функции широкоформатного сканирования, что устраняет ограничения поля зрения при большом увеличении.

Метод КЛСМ позволяет получать три типа изображений исследуемой поверхности:

- 1) полностью сфокусированные цветные 3D- (рис. 2, *а*) и 2D-изображения (рис. 2, *б*) рельефа поверхности, которые нельзя получить с помощью РЭМ и оптического микроскопа;
- 2) изображение интенсивности отраженного света лазера, подобное изображению, полученному методом РЭМ (рис. 2, *в*);
- 3) цветовую карту высоты исследуемой поверхности (рис. 2, *г*). Возможно получение изображения изучаемой поверхности в виде сетки с задаваемым шагом (рис. 2, *д*) [2], [3].

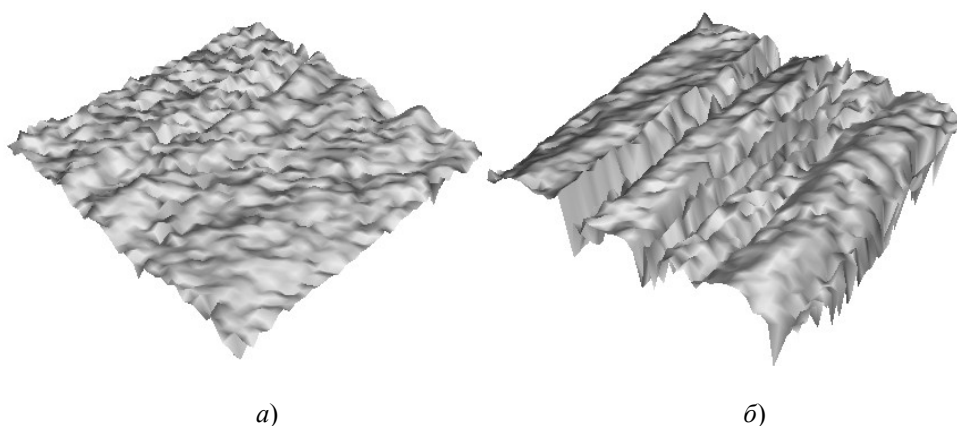


Рис. 1. Изображение стальных поверхностей трения со смазочными материалами, содержащими:

*а* – жидкие кристаллы; *б* – ультрадисперсный фторопласт

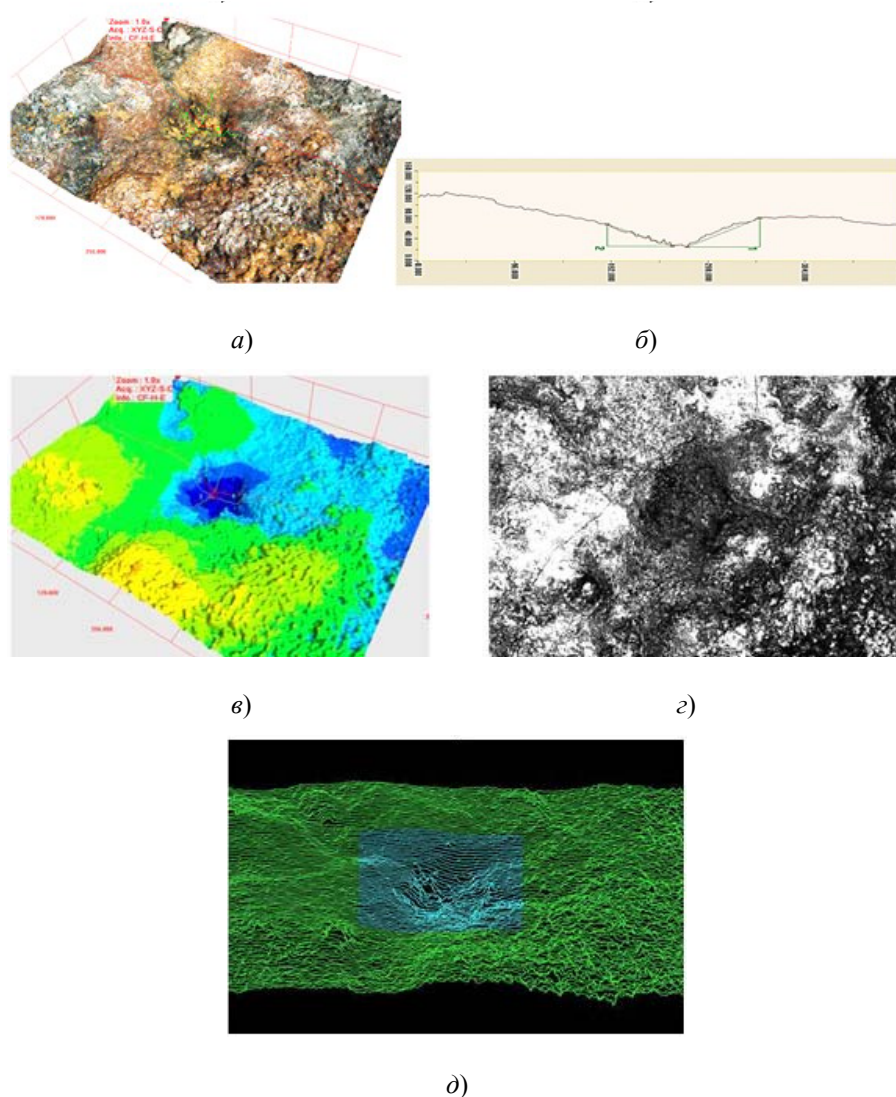


Рис. 2. Исследование коррозионных повреждений методом КЛСМ

Целесообразно применение метода КЛСМ для исследования коррозионных повреждений широкого спектра конструкционных материалов (рис. 2), изношенных поверхностей (рис. 1), получая 3D-модели поврежденной поверхности материалов с распределением цветовой гаммы продуктов коррозии и износа, топографии поверхностей трения, видимой в оптическом диапазоне света.

#### Литература

1. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.
2. Исходжанова, И. В. Применение конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для решения материаловедческих задач / И. В. Исходжанова // Прочность неоднородных структур : сб. материалов VII Евразийской науч.-практ. конф. – М. : МИСиС, 2014. – 138 с.
3. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов / Е. Б. Чабина [и др.] // Тр. ВИАМ, 2013. – № 5. – Ст. 06 (viam-works.ru).

4. Клевцов, Г. В. О возможности использования конфокального лазерного сканирующего микроскопа для исследования микрорельефа поверхности разрушения металлических материалов / Г. В. Клевцов, Е. Д. Мерсон // *Фундамент. исслед.* – 2012. – № 11. – С. 1185–1189.
5. Novis, D. B. The use of laser scanning confocal microscopy (LSCM) in materials science / D. B. Novis, A. H. Neuer // *Journal of Microscopy.* – 2010. – Vol. 240, № 3. – P. 173–180.
6. Кларк, Э. Р. Микроскопические методы исследования материалов / Э. Р. Кларк, К. Н. Эберхардт. – М. : Техносфера, 2007. – 376 с.

## **ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ОБЪЕМНОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ**

**Е. В. Хазеев**

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

В области машиностроения в настоящее время все большее значение приобретают теоретические и экспериментальные исследования неустановившихся процессов, в частности исследования, направленные на изучение гидравлических систем с объемной адаптацией к нагрузке мобильных машин. Данный интерес к нестационарным процессам вызван непрерывно растущими технико-экономическими требованиями к мобильным машинам в области машиностроения [1].

Целью настоящей работы является создание математической модели гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке и выполнение подбора основных математических моделей гидравлических элементов системы с объемной адаптацией к нагрузке для случая равномерного распределения суммарного расхода, настроенного на исполнительных органах в течение рабочего цикла.

Математическое описание исследуемой гидравлической системы представляет собой динамическую модель системы алгебраических и дифференциальных уравнений. Данные уравнения системы описывают работу гидравлического привода на каждом этапе рабочего цикла и отражают основные рабочие параметры гидравлической системы.

В начале разработки математической модели допускается принять следующими условия:

- рабочая жидкость является несжимаемой и однородной, неустановившийся поток не влияет на величину потерь;
- возникновение кавитации сводится к минимуму;
- коэффициенты расхода дросселирующих устройств и параметры рабочей жидкости являются постоянными значениями;
- потери давления по длине и потери на сухое трение являются малыми значениями, в результате чего данные величины в расчете допускается не учитывать.

Для определения основных узлов гидравлической системы с адаптацией к нагрузке построим ее структурную схему (рис 1). Из структурной схемы выделяем основные узлы и составляем системы уравнений для формирования математической модели.

Основные узлы системы:

- узел регулируемого насоса с чувствительным к нагрузке управляющим золотником, который состоит из регулируемого аксиально-поршневого насоса, регулятора насоса с чувствительным к нагрузке золотником и цилиндра;

- узел вспомогательного блока, который состоит из редукционного клапана и распределителя;
- узел основных распределителей, который состоит из пропорциональных распределителей и обратных клапанов;
- узел потребителей, который состоит из исполнительных гидравлических цилиндров и гидромотора;
- узел клапанной группы, который состоит из предохранительного клапана, клапана управления уровнем давления, регулятора расхода и редукционного клапана;
- узел гидравлических линий, который состоит их трубопроводов.

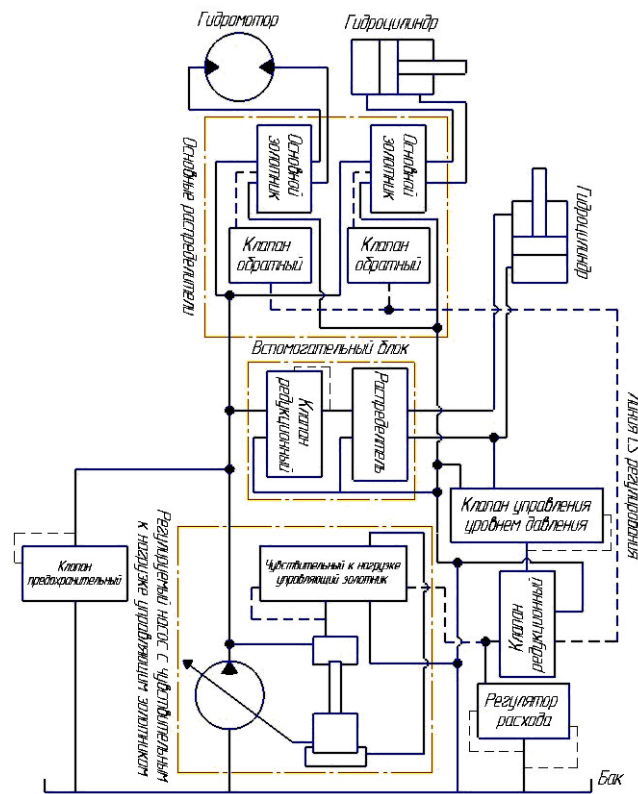


Рис. 1. Структурная схема гидравлической системы с адаптацией к нагрузке

Из математически описанных гидравлических элементов составляем систему уравнений для узла регулируемого насоса с чувствительным к нагрузке управляющим золотником [2]:

$$M_r = q_n f(q)(p_{j1} - p_{i1}) + a_\omega \frac{\omega_b}{u_d} + a_p |p_{j1} - p_{i2}| + a; \quad (1)$$

$$Q_{i1,j1} = q_n f(q) \frac{\omega_b}{u_d} \pm k_{ym} \cdot p_{i1,j1}, \quad (2)$$

где  $q_n$  – максимальный рабочий объем насоса,  $\text{м}^3$ ;  $f(q)$  – параметр регулирования ( $-1 \leq f(q) \leq 1$ );  $\omega_b$  – угловая скорость вала двигателя,  $\text{рад/с}$ ;  $a_\omega$  – коэффициент гид-



ромеханических потерь, зависящих от угловой скорости;  $a_p$  – коэффициент гидромеханических потерь, зависящих от давления;  $a$  – постоянная гидромеханических потерь;  $u_d$  – передаточное число редуктора;  $k_{yT}$  – коэффициент объемных потерь насоса;  $Q_{i1}$ ,  $p_{i1}$  – принимается со знаком «+»:

$$\frac{d\upsilon_k}{dt} = m^{-1} [p_{i2} \cdot F_{i2} - p_{j2} \cdot F_{j2} - h\upsilon_k - (R_{тр}^0 + k_{i2} \cdot p_{i2} + k_{j2} \cdot p_{j2}) \text{sign}\upsilon_k - R_{ц}], \quad (3)$$

где  $\upsilon_k$  – скорость поршня, м/с;  $m$  – приведенная к штоку масса подвижных частей гидроцилиндра, кг;  $F_{i2}$  – рабочая площадь поршня в полости 1, примыкающей к узлу  $i2$ , м<sup>2</sup>;  $F_{j2}$  – рабочая площадь поршня в полости 2, примыкающей к узлу  $j2$ , м<sup>2</sup>;  $h$  – коэффициент вязкого трения;  $R_{тр}^0$  – сила трения в манжетных уплотнениях при отсутствии величины давления, Н;  $R_{ц}$  – усилие на штоке, Н;  $L_{ц}$  – ход поршня, м.

$$\frac{dQ_{rs}}{dt} = B \left[ \mu f_{rs}(z) \text{sign}(p_r - p_s) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_r - p_s|} - Q_{rs} \right], \quad (4)$$

$f_{rs}(z)$  – площадь проходного сечения канала распределителя, соединяющего узлы  $r$  и  $s$ , в функции перемещения золотника  $z$ , м<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, при помощи уравнений (1)–(4) формируем систему уравнений для узла регулируемого насоса с чувствительным к нагрузке управляющим золотником:

$$N_H = \begin{cases} M_r = q_H f(q) (p_{j1} - p_{i1}) + a_\omega \frac{\omega_B}{u_d} + a_p |p_{j1} - p_{i2}| + a, \\ Q_{i1, j1} = q_H f(q) \frac{\omega_B}{u_d} \pm k_{yT} \cdot p_{i1, j1}, \\ \frac{d\upsilon_k}{dt} = m^{-1} [p_{i2} \cdot F_{i2} - p_{j2} \cdot F_{j2} - h\upsilon_k - (R_{тр}^0 + k_{i2} \cdot p_{i2} + k_{j2} \cdot p_{j2}) \text{sign}\upsilon_k - R_{ц}], \\ \frac{dQ_{rs}}{dt} = B \left[ \mu f_{rs}(z) \text{sign}(p_r - p_s) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_r - p_s|} - Q_{rs} \right]. \end{cases} \quad (5)$$

Аналогичным образом составляем системы уравнений для узла основных распределителей, узла потребителей, узлов вспомогательного блока и гидравлических линий [3].

Стоит отметить, что уравнения для определения величин давлений входят в описание только тех гидравлических элементов, которые содержат относительно большие величины, по сравнению с другими элементами, объема рабочей жидкости (гидроцилиндры, трубопроводы). Следовательно, на схеме данные гидравлические элементы должны быть разделены иными гидравлическими устройствами, в которых величину сжимаемости жидкости можно не учитывать и уравнения которых служат для определения величин расходов (например, два последовательно соединенных трубопровода или полость гидроцилиндра и трубопровод, необходимо разделить местным сопротивлением, что, в свою очередь, не противоречит физическому смыслу). Данная осо-

бенность позволяет получить замкнутую систему уравнений для определения величин давлений и расходов в местах соединения гидравлических элементов.

Таким образом, порядок системы уравнений определяется следующим образом: пусть гидравлическая схема гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке содержит узел регулируемого насоса с чувствительным к нагрузке управляющим золотником  $N_n$ , узел вспомогательного блока  $N_{в.б}$ , узел основных распределителей  $N_{о.р}$ , узел потребителей  $N_п$ , узел клапанной группы  $N_{к.г}$ , узел гидравлических линий  $N_{г.л}$ , обозначив через  $n_i$  число ходов золотника  $i$ -го распределителя, то получаем следующий порядок уравнений:

$$N = N_n + N_{в.б} + N_{о.р} + N_п + 4N_{к.г} + 34N_{г.л} + \sum_{i=1}^{N_{сп1}} n_i + \sum_{i=1}^{N_{сп2}} n_i + 2 \sum_{i=1}^{N_{сп3}} n_i. \quad (6)$$

В результате построения структурной схемы гидравлической системы с адаптацией к нагрузке и выбору основных математических моделей гидравлических элементов формируется математическая модель исследуемой гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке для случая равномерного распределения суммарного расхода, настроенного на исполнительных органах в течение рабочего цикла.

#### Литература

1. Гидросистема мобильной машины : пат. RU 2276237 С2 / В. П. Баторшин, Е. С. Голоскин, А. М. Петров. – 2004. – 8 с.
2. Бажин, И. И. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И. И. Бажин, Ю. Г. Беренгард, М. М. Гайцгори ; под общ. ред. С. А. Ермакова. – М. : Машиностроение, 1988. – 312 с.
3. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем : учеб. для вузов по специальностям «Гидропневмоавтоматика и гидропривод» и «Гидравлические машины и средства автоматизации» / Д. Н. Попов ; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1987. – 464 с.

### **3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ОТКЛИКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ КЕРНА (НА ПРИМЕРЕ КЕРНА РЕЧИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА)**

**Н. В. Бочаров**

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

Научный руководитель И. Н. Степанкин

В настоящее время во многих нефтегазовых компаниях активно развивается технология «Цифровой керн». Цифровое моделирование керна становится одним из традиционных лабораторных исследований, а иногда является единственно возможным, так как традиционные испытания имеют ряд недостатков: невозможность проведения множественных экспериментов на одном образце и, как следствие, неполное описание всех свойств образца; ограниченность воссоздания пластовых условий в лаборатории; сложность, а иногда и невозможность получения и обработки качественного кернавого материала. Данный метод изучения позволяет на основе данных исследования структуры образцов высокоточным оборудованием создавать компьютерные модели кернов и их структуры, а также моделировать протекающие в них процессы.

В статье представлена методика создания 3D-модели керна Речицкого месторождения на основе изображений, полученных после восстановления цифрового отклика компьютерной томографии (КТ), с целью дальнейшего решения различных геомеханических, петрофизических и гидродинамических задач.

Главным преимуществом метода рентгеновской КТ, помимо общей количественной оценки объема пустотного пространства, является визуализация внутренней структуры горной породы без разрушения образца. В размерной цифровой модели выделяются поры, каверны, трещины, а также участки матрицы с различной плотностью с соблюдением исходного природного масштаба. Для создания серии снимков образец помещают в держатель, который медленно вращается вокруг одной из осей на  $360^\circ$ . От скорости вращения зависит количество снимков и качество итоговой модели. Снимок представляет собой полутоновые изображения, в которых яркость характеризует степень поглощения рентгеновского излучения. Степень поглощения зависит от физических свойств горной породы, чаще всего плотности [1].

Существует зависимость между размерами образца керна и качеством его КТ. Чем меньше образец, тем больше разрешение съемки и, соответственно, получается модель с большей детализацией. Можно выделить два основных масштаба детализации: макроструктура и микроструктура. Выбор уровня детализации определяет какие задачи можно решать, используя ту или иную модель. Томография стандартных образцов керна ( $d = 30$  мм и более) соответствует макроуровню и позволяет изучать структуру с крупными порами, кавернами, трещинами и различными включениями без учета микропористости. Томография образцов с диаметром менее 30 мм (как правило, 15, 9, 4 или 3 мм), включая частички шлама и сколы, соответствует микроуровню и позволяет изучать структуру, выделяя зерна матрицы породы, цементирующие вещества, микропоры и микротрещины. Уменьшение модели (соответственно, увеличение разрешения) способствует существенному повышению объема и качества информации, хранящейся в снимках. Возрастает детализация морфологии цифрового отклика, но увеличивается объем файла. Например, объем одного снимка стандартного образца ( $d = 30$  мм) составляет около 2 Мб и общий объем стека – около 4–5 Гб, а объем снимка образца 4 мм составляет около 20 Мб и объем стека – около 80 Гб. Данный факт указывает, на то, что изучение более детализированных структур требует очень больших вычислительных мощностей.

При создании 3D-модели керна можно выделить следующие этапы: подготовка образца и последующая КТ, фильтрация (удаление шумов) полученных изображений, сегментация и создание объемной модели.

Рассмотрим пример. Для исследования был выбран образец керна № 7862 524 скважины 5–6 пачки Речицкого месторождения длиной 61,76 мм и диаметром 29,92 мм (рис. 1). Образец отсканирован на рентгеновском компьютерном томографе Procon X-ray CT-ALPHA с размером вокселя 28,8 мкм. В результате сканирования было получено 2287 проекций. Затем данные проекции были преобразованы в 16-битные изображения TIFF-формата в оттенках серого. В программе ImageJ 16-битный стек был переведен в 8-битный, эта операция позволяет уменьшить объем стека в два раза. Затем этот стек был импортирован в программный комплекс Avizo для дальнейшей обработки.

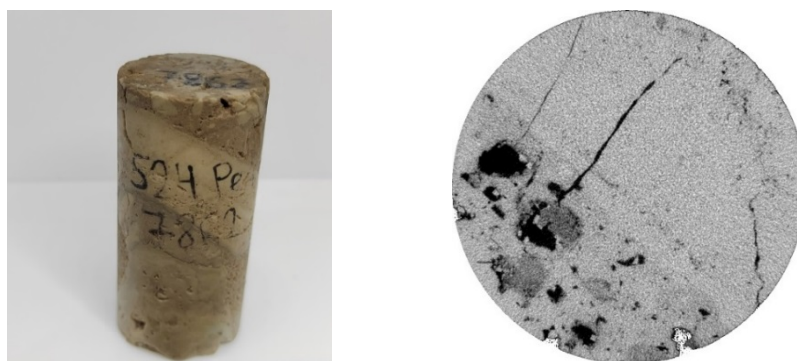


Рис. 1. Фотография образца (слева) и одна проекция КТ (справа)

Следующим этапом является фильтрация (удаление шумов) изображений. В Avizo представлен большой список различных средств фильтрации, такие как Гауссовский фильтр, фильтр анизотропной диффузии, медианный фильтр, фильтр нелокального среднего (Non-Local Means Filter) и др. После сравнения был выбран фильтр нелокального среднего, он является классическим средством удаления шумов и улучшения качества изображения.

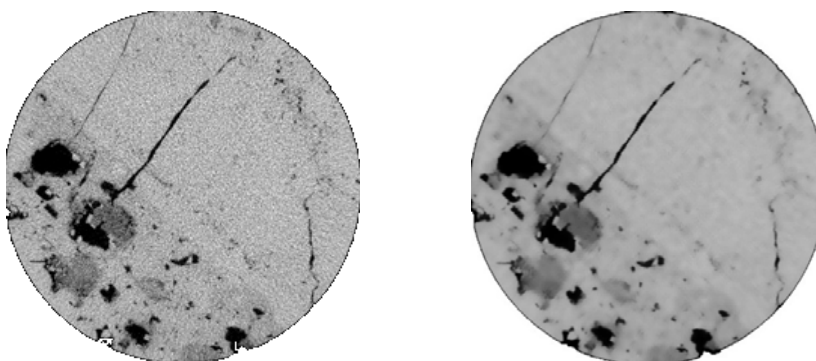


Рис. 2. Изображение до (слева) и после (справа) фильтрации

Далее необходимо сегментировать изображения, т. е. выделить различные фазы. В данном примере мы выделяли твердую фазу и пустотное пространство. При сегментации мы сравнивали два метода: метод порогового значения (Threshold) и метод водораздела (Watershed). Суть метода порогового значения в том, что он выделяет пиксели выше или ниже заданного значений оттенка серого. Метод водораздела основывается на предыдущем, с некоторыми заметными улучшениями. Так как мы работаем с 8-битными изображениями, то в базовой контрастности изображения учитывается 255 оттенков серого цвета, без использования цветовой гаммы всего физического спектра. Были установлены следующие граничные условия по пороговым значениям контрастности в оттенках серого цвета: для пустотного пространства 0–50 единиц, для твердой фазы 50–255 единиц. После сегментации получены карты полей меток (бинарные изображения), представляющие собой векторную интерпретацию объемного набора вокселей (рис. 3). После анализа бинарных изображений был сделан вывод, что при одинаковом значении оттенка серого, той или иной фазы, сегментация методом водоразделов является более точной.



Рис. 3. Сегментированное (бинарное) изображение методом порогового значения (слева) и водораздела (справа). Белым цветом выделена твердая фаза, черным цветом – пустотное пространство и задний фон

Последним этапом является создание 3D-модели (поверхности) по бинарным изображениям.

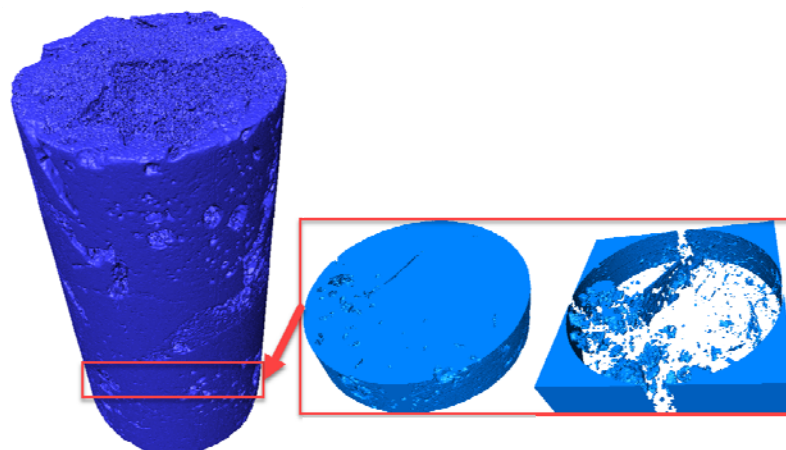


Рис. 4. 3D-модель образца № 7862 524 скважины Речицкого месторождения

Полученные структуры сохраняются в STL-формате для дальнейшего хранения и работы, которая включает в себя конечно-элементный анализ и моделирование различных процессов.

Цифровизация нефтегазовой отрасли является главным приоритетом научной деятельности многих компаний. Построение 3D-модели ядра на основе снимков компьютерной томографии является первым основным этапом в построении его цифрового двойника, при помощи которого можно решать множество производственных задач. Их реализация уже сегодня включает построение цифровых ядер для проведения геомеханического, петрофизического и гидродинамического моделирования.

#### Литература

1. Савицкий, Я. В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании ядра нефтяных и газовых месторождений / Я. В. Савицкий // Вестн. Перм. нац. исследоват. политехн. ун-та. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 28–37. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.4.

**НИЗКООМНЫЕ НЕФТЯНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ ПРОТЕРОЗОЙСКИХ  
ОТЛОЖЕНИЙ ОСТАШКОВИЧСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ****Е. И. Машечко***Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель И. С. Шепелева

С целью эксплуатации семилукского горизонта в восточной части Осташковичского месторождения и поиска залежей нефти в породах терригенного комплекса 05.05.2021 г. начата бурением скважина 241s2 Осташковичская. Скважина пробурена с использованием части ствола скважины 241, глубина зарезки – 2153 м. Скважина окончена бурением 28.07.2021 г. в породах кристаллического фундамента при глубине 3670 м.

Согласно программе отбора керна и испытаний на 2021 г. по скважине 241s2 Осташковичская планировались следующие мероприятия: отбор керна и ИП в отложениях ланского горизонта с целью уточнения литологического разреза и получения гидродинамической характеристики; отбор керна и ИП в нижней части старооскольского горизонта с целью оценки фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов и характера насыщения.

В процессе бурения отложения подсолевого терригенного комплекса вскрыты на отметках, близких к проектным ( $D_3ln$  ниже на 8 метров).

По керну: *отложения ланского горизонта* – К-1 (инт. 3285-3291 м – 6,0 м – в/к – 100 %) – песчаники светло-серые, зеленовато-серые, серые, темно-серые, коричневатосерые, участками розоватые, мелко-, микрзернистые, слоистые с включениями и маломощными пропластками глин аргиллитоподобных, серо-зеленых, зеленых, пестроцветных, плотных, крепких. В интервалах 3285,5–3287,5 м и 3288,5–3288,7 м отмечается слабый запах УВ и незначительные точечные выпоты нефти.

*Рис. 1*

*Отложения старооскольского горизонта* – К-2 (инт. 3408–3414 м – 6,0 м – в/к – 100 %) – переслаивание глин аргиллитоподобных, бурых, темно-коричневых, серых, плотных и песчаников светло-серых, зеленовато-серых, серых, темно-серых, коричневатого-серых, крепких. Весь керн без признаков УВ.

К-3 (инт. 3414–3420 м – 6,0 м – в/к – 100 %) – песчаники серые, темно-серые, коричневатого-серые, реже ржаво-бурые, мелко-, тонкозернистые, участками алевритовые с включениями и тонкими пропластками глин серо-зеленых, зеленых. Порода преимущественно средней крепости и плотности. Признаки УВ отсутствуют.

Верхнепротерозойские отложения – К-4 (инт. 3504–3510 м – 6,0 м – в/к – 95 %) – песчаники серые, светло-серые, зеленовато-серые, кварцевые и кварц-полевошпатовые, на глинистом цементе, разнозернистые, преимущественно средне-крупнозернистые, в отдельных интервалах грубозернистые до гравелитов (4,9–5,7 м), плохо сортированные, массивные и неясно слоистые. На глубине 2,5 м присутствует включение розового кварцита (0,14 м). По всему интервалу встречаются полуокатанные обломки розово-красных полевых шпатов и розовых кварцитов неправильной формы размером до нескольких сантиметров. Породы слабосцементированные, на глинистом цементе, слабой крепости. В пределах верхних 1,5 м и внизу интервала (нижние 0,7 м) наблюдаются слабые точечные выделения коричневой нефти, ощущается слабый запах УВ.

К-5 (инт. 3510–3516 м – 6 м – в/к – 100 %) – 4,80 м – песчаники серые, светло-серые, преимущественно кварцевые, реже кварц-полевошпатовые, средне-крупнозернистые, участками грубозернистые, с единичными прослоями толщиной до 0,1 м, состоящими из плохо сортированных зерен кварца, обломков и гальки полевых шпатов и розовых кварцитов овальной окатанной, полуокатанной и неправильной формы, размером до нескольких сантиметров. 1,20 м – конгломерат, состоящий из несортированных зерен кварца разного размера, окатанной гальки и полуокатанных обломков кварцитов и полевых шпатов. Породы всего интервала керна слабой крепости. По всему интервалу запах УВ на скеле, местами слабые точечные выделения коричневой нефти.

*По данным ГИС в открытом стволе:* в отложениях ланского горизонта породы-коллекторы не выявлены, в отложениях старооскольского горизонта выявлены нефтенасыщенные породы-коллекторы ( $H_{эф}$  – 25,6 м,  $K_{п}$  – 14,8 %) и водонасыщенные породы-коллекторы ( $H_{эф}$  – 17,1 м,  $K_{п}$  – 13,3 %), в верхнепротерозойских отложениях водонасыщенные породы-коллекторы ( $H_{эф}$  – 9,8 м,  $K_{п}$  – 15,1 %).

*По данным ИП в открытом стволе:* ланский горизонт (инт. 3255–3291 м) – приток не был получен, в пробоотборной свече фильтрат бурового раствора. Относительный компонентный состав характерен составу диффузионного газа. Признаков наличия пластовых рассолов не отмечено. Градиент пластового давления составил 0,761.

Совместное испытание ланского и старооскольского горизонтов (инт. 3255–3445 м) – дебит по КВД составил – 1,31 м<sup>3</sup>/сут, в пробоотборной свече фильтрат бурового раствора. Газ характерен составу газа нефтяных месторождений. Признаков наличия пластовых рассолов не отмечено.

Верхнепротерозойские отложения (инт. 3436–3516 м) – испытание на уровне опробования. Осложнено перетоком из затрубного пространства в связи с нарушением герметичности пакеровки. В герметичном пробоотборнике: 98 % – коричневая вязкая масса; 2 % – вода с нефтью. Признаков наличия пластовых рассолов не отмечено.

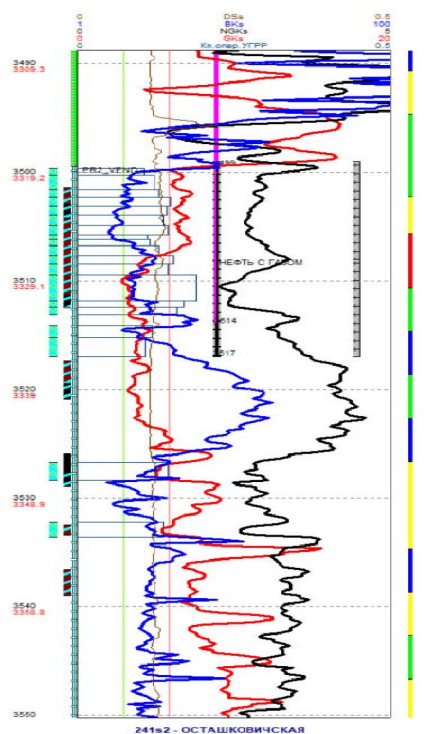


Рис. 2

По данным ГИС в колонне:

- **Заключение по ИННК:** в отложениях ланского горизонта породы-коллекторы не выявлены, в отложениях старооскольского горизонта выявлены нефтенасыщенные породы-коллекторы ( $H_{эф} - 25,4$  м,  $K_{п} - 14,8$  %) и водонасыщенные породы-коллекторы ( $H_{эф} - 17,0$  м,  $K_{п} - 13,3$  %), в верхнепротерозойских отложениях выявлены нефтенасыщенные породы-коллекторы ( $H_{эф} - 19,2$  м,  $K_{п} - 14,2$  %) и водонасыщенные породы-коллекторы ( $H_{эф} - 50$  м,  $K_{п} - 14,2$  %).

- **При освоении скважины 241s2 Осташковичской** выполнили перевод скважины на рабочую жидкость плотностью (техническая вода плотностью  $1,22$  г/см<sup>3</sup>), перфорировали интервал 3499–3517 м (PR2), после чего отмечался перелив нефти,  $P_{изб} = 0,8$  МПа. Заглушили скважину рабочей жидкостью с отмывом нефтегазовых пачек, спустили воронку с пусковыми муфтами Н – 3162 м, п. м. 3 мм – 1800 м, 2 мм – 1200 м, 1,5 мм – 800 м. Выполнили компрессирование, после отработки  $52,5$  м<sup>3</sup> жидкости скважину перевели на работу самоизливом на штуцере диаметром 6 мм, буферное давление стабилизировалось на уровне 4,6 МПа. После суммарной наработки  $89,5$  м<sup>3</sup> жидкости скважину остановили на КВД. Пластовое давление составило 39,33 МПа на глубине 3508 м, градиент – 1,133,  $K_{прод} = 6$  м<sup>3</sup>/(сут · МПа). В настоящее время скважина работает в нефтелинию фонтанным способом на штуцере диаметром 4 мм,  $P_{6/3} = 5,7/10$  МПа, дебит нефти составляет 49,9 у. е., продукция безводная.

#### Литература

1. Чоловский, И. П. Промыслово-геологический контроль разработки месторождений углеводородов / И. П. Чоловский, Ю. И. Брагин. – М. : Нефть и газ, 2002.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА МАКСИМАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ СЖАТИИ

О. А. Лапко

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Широкое распространение полимеров с особыми физико-механическими и функциональными свойствами приводит все к большему внедрению этих материалов в области машиностроения.

Целью данного исследования является изучение влияния процентного содержания компонентов композиционных материалов на основе эпоксидных смол на максимальное напряжение при сжатии.

Исследования прочностных свойств композиционного материала проводились в серии экспериментов при прикладывании сжимающей нагрузки. Испытания проводились на оборудовании INSTRON 5969 с предельной нагрузкой 50 кН [1]. Сжатие проводилось от нуля до определенной нагрузки, которую выдерживал образец.

Проведение исследования осуществлялось с применением ортогональных планов второго порядка [2]. В качестве варьируемых параметров принимались: содержание полиэфирной смолы; содержание наполнителя и его зернистость (табл. 1). В качестве критерия оптимизации использовалось максимальное напряжение образца при сжатии.

Центральный ортогональный план второго порядка составляли по известной методике полного факторного эксперимента типа  $k = 2^3$ , шести опытах в «звездных точках» и трех опытов в центре плана. Величина «звездного плеча» составила 1,215. Согласно плану эксперимента было проведено 17 опытов.

*Таблица 1*

### Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Полиэфирная смола	Зернистость	Карбид кремния черный
Обозначение	$x_1$	$x_2$	$x_3$
+1,215	32,72	271,5	16
+1,00	31	250	15
0,00	23	150	10
-1,00	15	50	5
1,215	13,28	28,5	4

В качестве математической модели было выбрано уравнение второго порядка следующего вида:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2.$$

Матрица планирования приведена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27
9	+1	+1,215	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73
10	+1	-1,215	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73
11	+1	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73
12	+1	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73
13	+1	0	0	+1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75
14	+1	0	0	-1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75
15	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73
16	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73
17	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73

По полученным значениям напряжений производились вычисления согласно известной методике [2], далее получили уравнение регрессии в кодированном виде:

$$Y = 89,66 - 4,338X_1 - 8,288X_2 - 6,611X_3 - 2,413X_1X_2 - 4,438X_1X_3 - \\ - 2,063X_2X_3 + 4,360X_3^2.$$

Проверку гипотезы об адекватности модели выполняли по критерию Фишера. В данном случае при  $k_1 = 15 - 3 - 1 = 11$ ;  $k_2 = 3 - 1 = 2 = 2$  и 95%-ном уровне значимости,  $F_T = 19,4$ . Расчетные значения критерия Фишера составили  $F = 15,909$ . Значит, полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс в пределах исследуемой области.

После проведения статистической обработки результатов эксперимента, преобразовав модель из кодированного вида, получили:

$$Y = 103,1 + 1,022x_1 + 0,03x_2 + 0,11x_3 - 0,003x_1x_2 - 0,11x_1x_3 - 0,004x_2x_3 + 0,174x_3^2.$$

Графические изображения для исследуемых факторов представлены на рис. 1.

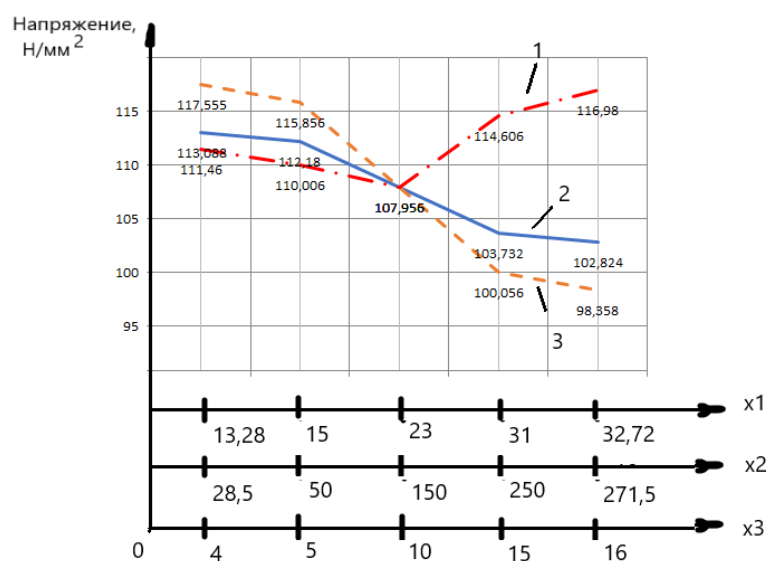


Рис. 1. График зависимости напряжения образца:  
1 – от содержания карбида кремния; 2 – содержания полиэфирной смолы; 3 – зернистости

Разработана методика анализа состава композиционного материала, модифицированного полиэфирной смолой с абразивным наполнителем, позволяющая оптимизировать составы композиционных материалов.

Установлено влияние содержания полиэфирной смолы, абразивного наполнителя и его зернистости на максимальное напряжение при сжимающей нагрузке.

#### Литература

1. Михайлов, М. И. Исследование свойств модифицированных эпоксидных композитов / М. И. Михайлов, О. А. Лапко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – С. 28–34.
2. Михайлов, М. И. Основы научных исследований и инновационной деятельности : учеб. пособие / М. И. Михайлов ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 399 с.

## МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Крупа

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Широкое применение листового проката в различных отраслях машиностроения требует постоянного совершенствования методов обработки. Одним из перспективных методов является магнитно-абразивная обработка (МАО). Существенное влияние на производительность и качество МАО оказывают физико-механические, химические свойства и форма порошков, выполняющих функцию режущего инструмента, а также режимы обработки и сила магнитного поля [1].

Цель работы – исследование магнитно-абразивного полирования листового проката из немагнитных материалов с целью повышения производительности.

Для этого необходимо выполнить следующие задачи: изучить особенности финишной MAO листового проката; провести исследования производительности магнитно-абразивного полирования; определить оптимальные параметры магнитно-абразивного образования листового проката.

Сущность MAO заключается в том, что порошковая ферромагнитная абразивная масса, уплотненная энергией магнитного поля, осуществляет абразивное воздействие на обрабатываемую деталь, благодаря чему порошок может приобретать условно связанное состояние под воздействием наведенного в зоне обработки магнитного поля, являющегося важнейшим моментом процесса обработки.

Основными параметрами, определяющими массу срезаемого слоя с заготовки, являются намагниченность частиц и плотность ферромагнитной составляющей при равных размерах частиц и условиях обработки, вследствие чего можно предположить, что при прочих равных условиях производительность MAO будет зависеть от формы, химического и структурного состава применяемого ферроабразива при постоянных условиях обработки. Поэтому для исследований был выбран порошок веретенообразной формы, изготовленный методом высокоскоростной закалки расплава из самофлюсующегося сплава на основе железа  $Fe_{93,7}B_{3,3}Si_{2,1}C_{0,9}$ . Сравнительные исследования режущей способности веретенообразного порошка проводились с молотым порошком  $Fe_{94,5}B_{4,5}$ . Размеры порошков были выбраны 315–630 мкм (рис. 1) [3].

Режущая способность порошков абразива оценивалась по массовому съему материала  $\Delta m$ , так как производительность определяется массой удаляемой стружки в единицу времени.

Исследования стойкости абразивных частиц веретенообразного порошка выполнялись для двух видов заготовок и проводились с периодической остановкой для измерений массы заготовки после каждого прохода. Для обработки был выбран листовой прокат, выполненный из немагнитных материалов, таких как алюминий АЛ5 и нержавеющая сталь X18Н10 с исходной шероховатостью поверхностей  $R_a$  (1,0–1,25) мкм.

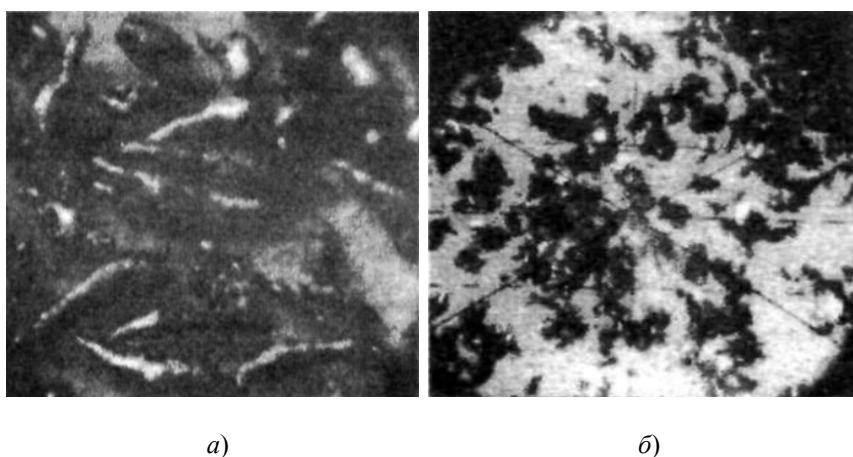


Рис. 1. Внешний вид порошка размером 315–630 мкм формы:  
а – веретенообразной, х300; б – молотового, х100

Исследования проводились на горизонтальном консольно-фрезерном станке модели 6Н82, на шпинделе которого смонтирована установка для MAO (рис. 2).

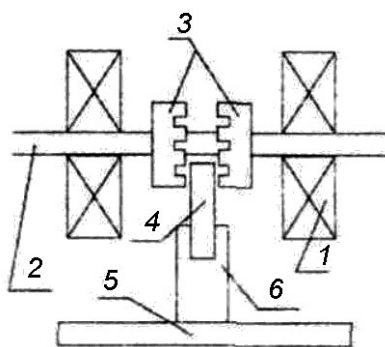


Рис. 2. Схема двухстороннего магнитно-абразивного полирования листового проката:  
 1 – электромагнит; 2 – шпиндель станка; 3 – концентраторы магнитного поля; 4 – обрабатываемая заготовка;  
 5 – стол станка; 6 – крепежное приспособление

Основными изменяемыми технологическими факторами МАО являются: частота вращения концентраторов  $n$  (об/мин); скорость перемещения заготовки  $S$  (мм/мин); сила тока  $I$  (А), создающая магнитное поле в обмотках.

Эксперимент выполнялся при следующих технологических параметрах: частота вращения шпинделя станка ( $n = 200\text{--}500$  об/мин); сила тока на обмотках электромагнита ( $I = 5\text{--}8$  А), скорость перемещения заготовки ( $S = 19\text{--}47,5$  мм/мин). Заготовка закреплялась в специальном приспособлении, изготовленном из немагнитного материала, которое, в свою очередь, устанавливалось на столе станка.

Полученные результаты экспериментов и математической модели процесса указывают на то, что масса снимаемого слоя металла зависит от всех исследованных технологических параметров, причем наибольшее влияние на массу съема оказывают вид абразивных частиц. В частности, с увеличением частоты вращения шпинделя масса съема плавно возрастает, при увеличении скорости перемещения заготовки съем металла снижается, с увеличением силы тока масса снимаемого металла увеличивается (рис. 3, 4).

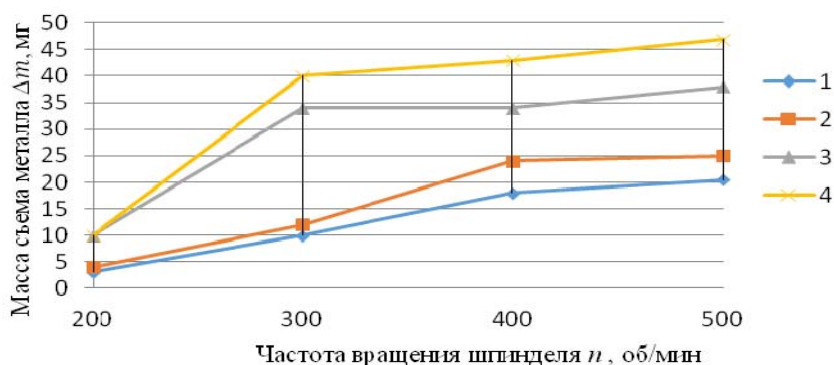


Рис. 3. Изменение массы съема металла в зависимости от частоты вращения шпинделя, обрабатываемого материала и вида абразива:

1 – обработка нержавеющей стали молотым порошком; 2 – обработка нержавеющей стали веретенообразным порошком; 3 – обработка алюминия молотым порошком; 4 – обработка алюминия веретенообразным порошком

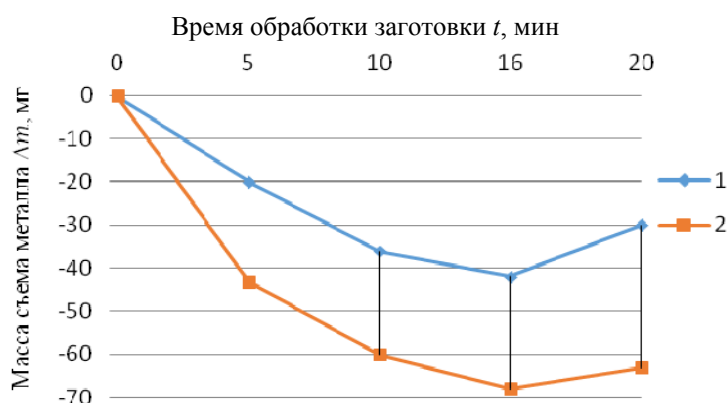


Рис. 4. Изменение массы заготовки в процессе МАО при обработке веретенообразным порошком:  
1 – заготовка из стали X18H10; 2 – алюминиевая заготовка

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение времени обработки заготовки более 16 мин не приводит к увеличению съема металла из-за полного износа абразивных частиц, которые приобретают сферическую и округлую форму, т. е. не имеют режущих элементов.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения при МАО порошка веретенообразной формы с аморфной и метастабильной структурой.

#### Литература

1. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.
2. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск : БИТУ, 2006. – 218 с.
3. Стасенко, Д. Л. Исследование особенностей получения дискретных волокон при диспергировании струи расплава газовым потоком / Д. Л. Стасенко, М. Н. Верещагин / Материалы, технологии, инструменты. – 2002. – Т. 7, № 2. – С. 77–81.

## РЕГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

О. К. Гурбан

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

Научный руководитель В. В. Пинчук

Вода играет большую роль в нашей жизни. Что бы делало человечество без воды даже трудно представить. По-видимому, оно просто бы не существовало. С водой на нашей планете связаны не только жизнь и климат, но и работа большинства отраслей народного хозяйства, особенно водного транспорта. Вода является богатейшим источником энергии – это гидроэнергия рек, энергия приливов, геотермальная и термоядерная энергия. Именно благодаря воде в природе возникают интереснейшие и самые разнообразные явления, такие как радуга, гало, сулой, венцы, «шепот звезд» и др. Некоторые люди связывают с ними различные суеверия и приметы. Но ученые разгадали и нашли объяснение этим загадочным явлениям природы. Причиной некоторых из них является вода, ее пары и лед.

Актуальность настоящей работы обусловлена тем, что на нашей планете стремительно иссякают топливные ресурсы. Изучению альтернативных источников энергии в наше время придается огромное значение.

Мировое потребление энергии растет. Хотя традиционные производства и сервисы становятся все более энергоэффективными, рост населения планеты и появление новых сервисов приводит к увеличению общего энергопотребления. В 2015 г. мировое энергопотребление составило 20,76 трлн кВт · ч, по данным Международного энергетического агентства, прогноз на 2030 г. – 33,4 трлн кВт · ч, а к 2050 г. – до 41,3 трлн кВт · ч.

Капельница Кельвина, являющаяся альтернативным источником энергии, позволяет преобразовывать потенциальную энергию падающих капель воды в электрическую. Капельница Кельвина является генератором электростатического напряжения. Хотя устройство Капельницы Кельвина было известно еще в 19 в., никто с тех пор не использовал Капельницу Кельвина как альтернативный источник энергии.

Капельница Кельвина – электростатический генератор, изобретенный Уильямом Томсоном (лордом Кельвином) в 1867 г. Простая конструкция позволяет тем не менее получить напряжения около 10 кВт. Устройство представляет собой пару металлических банок, каждая из которых связана с металлическим кольцом-индуктором, подвешенным над другой банкой. Через индукторы из верхнего сосуда в банки льются струйки воды, которые разделяются на капли рядом с индукторами.

Изначально вся установка электрически нейтральна и симметрична, поэтому заранее неизвестно, на какой из банок будет накапливаться заряд определенного знака. Из-за случайных внешних воздействий между левой и правой частью установки всегда может образоваться небольшая разность потенциалов, благодаря этому установка не требует никакой стартовой зарядки банок. В силу электростатической индукции металлические кольца наводят в резервуаре с водой в том месте, под которым они расположены, противоположные заряды. В результате количество электронов на противоположных краях резервуара становится разным. Упав, капли попадают в банку, соответствующую своему заряду, тем самым увеличивая ее заряд, что создает еще большее электрическое поле около колец, усиливая сепарацию статического заряда; таким образом капельница Кельвина накапливает статическое электричество.

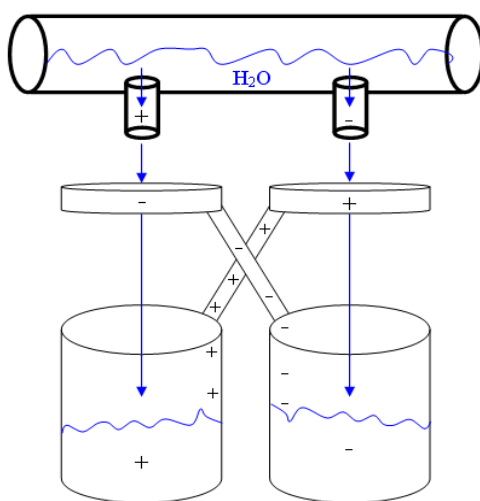


Рис. 1. Схема работы капельницы Кельвина

Для наилучшей работы устройства металлические кольца должны находиться на небольшом расстоянии друг от друга, образуя конденсатор. Это позволяет сосредоточить большую часть зарядов внутри металлических колец.

Установка остается работоспособной, пока банки не наполнятся, чтобы установка могла работать непрерывно, необходимо отводить воду из банок, не теряя заряда. Основным условием, которое должно соблюдаться при течении жидкости или газа, является непрерывность изменения параметров потока в зависимости от координат и времени, т. е. условие сплошности. Это значит, что жидкость должна двигаться в соответствующих каналах как сплошная среда, без разрывов.

Теоретические законы механики жидкости и газов базируются на законах гидромеханики и гидродинамики, которые устанавливают связь между действующими силами, скоростями движения и движением, выражающимся обычно в форме сложных дифференциальных уравнений. Совокупность теории, отражающей физическую сущность явления, и данных опытов и практики позволила глубоко разработать современные законы прикладной гидравлики.

Кавитация жидкостей при понижении давления в какой-либо точке потока жидкость вскипает, выделившиеся при этом пузырьки газа и пара увлекаются потоком и переносятся в область более высокого давления, в которой паровые пузырьки конденсируются, а газовые сжимаются. Так как процесс конденсации парового и сжатия газового пузырьков происходит мгновенно, частицы жидкости перемещаются к их центрам с большой скоростью (до нескольких сот метров в секунду), получают местные гидравлические микроудары. Это сопровождается повышением давления и температуры в центрах пузырьков (до 1000–1500 °С).

Рентгеноструктурный анализ жидкостей показал, что характер расположения частиц жидкости промежуточен между газом и твердым телом. В газах молекулы движутся хаотично, поэтому нет никакой закономерности в их взаимном расположении. Для твердых тел наблюдается так называемый дальний порядок в расположении частиц, т. е. их упорядоченное расположение, повторяющееся на больших расстояниях. В жидкостях имеет место так называемый ближний порядок в расположении частиц, т. е. их упорядоченное расположение, повторяющееся на расстояниях, сравнимых с межатомными. Теория жидкости до настоящего времени полностью не развита. Разработка ряда проблем в исследовании сложных свойств жидкости принадлежит Я. И. Френкелю (1894–1952).

Анализируя разработки ученых, которые представили новый метод получения электроэнергии из капель дождя, можно отметить, что им удалось добиться невероятной эффективности: энергии одной дождевой капли хватает, чтобы зажечь 100 светодиодных ламп. Описание приведено в журнале Nature.

Попытки получать энергию из падающих с неба дождевых капель предпринимались давно, но все они были безрезультатны, так как мощность генератора оказывалась слишком малой. В новом исследовании китайские инженеры в сотрудничестве с американскими коллегами предлагают новый интерфейс энергогенерирующей установки, при котором мощность генератора существенно увеличивается.

Капли дождя, падая на поверхность пластин генератора, создают водяной мост между алюминиевым электродом и электродом из оксида индия и олова. Образуется замкнутый контур, в котором может высвободиться энергия. Идея разработчиков заключалась в том, чтобы накрыть поверхность генератора пленкой из политетрафторэтилена, которая способна накапливать поверхностный заряд при непрерывном попадании капель воды, пока он не достигнет насыщения. В подобном устройстве капли действуют как резисторы, а поверхностное покрытие – как конденсатор.



В связи с нарастающей энергетической проблемой особый интерес представляет разработка способа использования энергии электростатического поля, созданного естественной электризацией материалов в условиях их эксплуатации. Самый надежный в мире возобновляемый источник энергии – не ветер и не солнечный свет, а вода. В 2019 г. мировые гидроэнергетические мощности достигли рекордных 1308 гигаватт. Гидроэлектроэнергия дешевая, легко хранится и отправляется, производится без сжигания топлива, следовательно, экологична.

#### Литература

1. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. Г. Кисилев. – М. : Стройиздат, 1975. – 323 с.
2. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика : учеб. для вузов / Д. В. Штеренлихт. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
3. Чугаев, Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. – Л. : Энергия, 1982. – 600 с.
4. Nature. – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-1985-6>. – Дата доступа: 18.03.2022.

### РАСЧЕТ ЗОЛОТНИКОВОГО ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Ю. И. Железнякова

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

В гидравлических системах мобильных и технологических машин для регулирования изменения скорости и направления потока рабочей жидкости применяют гидравлические распределители. Динамические процессы в гидроприводе обуславливаются сжимаемостью жидкости, колебаниями давления и характером преодолеваемой нагрузки. Внутренние динамические процессы в самом распределителе, колебания элементов управления распределительной аппаратуры могут оказывать существенное влияние на его динамику и гидросистему в целом.

Цель исследований – улучшение внутренних динамических характеристик работы гидрораспределителя с пневматическим управлением MR100.T2 за счет улучшения конструкции золотника.

Расчет внутренних динамических процессов распределителя проводится с целью выбора его параметров, обеспечивающих устойчивую работу, анализа возможных автоколебаний, оценки быстродействия и погрешности регулирования, а также качества переходного процесса.

На рис. 1 представлена модель распределителя с принципиальной гидравлической схемой [1]. Основные исходные данные, принятые при расчетах (базовый вариант):  $D_y = 22$  мм – условный диаметр внутренних каналов;  $d_3 = 25$  мм – диаметр запорно-регулирующего элемента;  $\Delta = 5$  мм – перекрытие;  $d_{\text{ш}} = 14$  мм – диаметр шейки золотника;  $h = 22$  мм – длина рабочего пояса золотника;  $L = 171$  мм – длина золотника;  $F_{\text{упр}} = 836$  Н – максимальное усилие управления;  $c = 17900$  Н/м – жесткость пружины;  $P_{\text{сл}} = 0,15$  МПа – давление на сливе;  $P = 16$  МПа – давление в системе;  $Q_{\text{max}} = 150$  л/мин – максимальный расход рабочей жидкости.

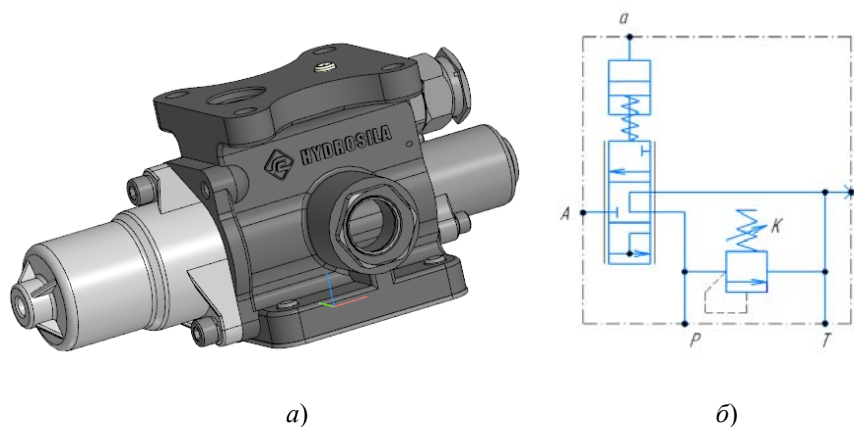


Рис. 1. Распределитель MR100.T2:  
 а – модель гидрораспределителя;  
 б – схема гидравлическая принципиальная

Согласно схеме и конструкции гидрораспределителя MR100.T2 на рис. 2 представлена расчетная схема запорно-регулирующего элемента.

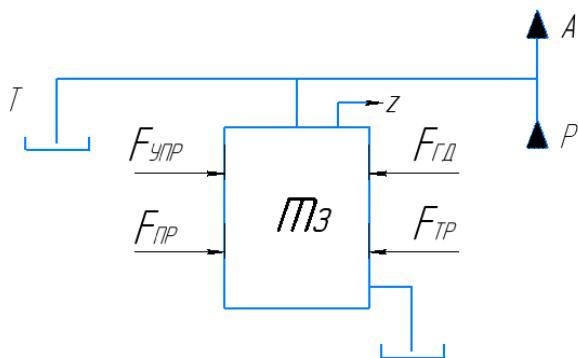


Рис. 2. Расчетная схема золотника распределителя

Дифференциальное уравнение движения золотника отражает его равновесие под действием приложенных сил:

$$m_3 \frac{d^2 z}{dt^2} = F_{упр} + F_{пр} - F_{тр} - F_{гд},$$

где  $m_3$  – приведенная масса золотника;  $z$  – перемещение золотника;  $F_{упр}$  – усилие управления;  $F_{пр}$  – усилие сжатия пружины, обеспечивающей принудительное возвращение золотника в нейтральное положение;  $F_{тр}$  – сила трения, действующая на золотник;  $F_{гд}$  – гидродинамическая сила, действующая в каждом из окон распределителя и стремящаяся вернуть золотник в нейтральное положение.

При решении полученное дифференциальное уравнение второго порядка преобразовывается к системе дифференциальных уравнений первого порядка, которая может решаться численным методом Рунге–Кутты [2].

В среде программирования MathCAD разработана программа и выполнены расчеты, позволившие продемонстрировать возможность регулирования характеристик переходного процесса и быстродействия при изменении конструкции запорно-регулирующего элемента гидрораспределителя.

Для достижения требуемых характеристик при расчетах изменяемыми параметрами являлись (усовершенствованный вариант):  $h = 11$  мм – длина рабочего пояса золотника;  $\Delta = 3$  мм – перекрытие;  $L = 120$  мм – длина золотника;  $F_{упр} = 200$  Н – максимальное усилие управления;  $c = 12500$  Н/м – жесткость пружины. Остальные параметры при расчетах остались неизменными.

На рис. 3 представлены результаты расчетов внутренних динамических процессов.

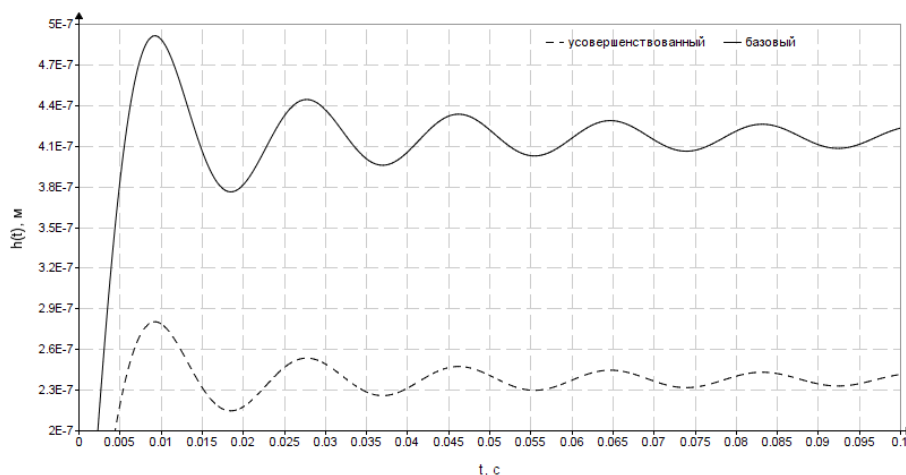


Рис. 3. Графики переходного процесса

При базовом варианте исходных данных переходной процесс имеет большую амплитуду колебаний и время их затухания. Снижение силы трения и массы запорно-регулирующего элемента гидрораспределителя позволяет скорректировать переходной процесс и практически устранить колебания золотника.

В ходе выполнения работы были проанализированы конструктивные особенности гидрораспределителя MR100.T2. Разработана математическая модель, позволяющая исследовать внутренние динамические процессы в распределителе.

Разработана программа решения системы дифференциальных уравнений численными методами в среде программирования MathCAD. Выполнены расчеты внутренних динамических характеристик работы гидрораспределителя. Проанализирована чувствительность динамической системы к изменению конструктивных параметров запорно-регулирующего элемента гидрораспределителя.

При проведении расчетных исследований полученные данные позволили определить, что расчетные динамические характеристики соответствуют ожидаемым физическим процессам, что позволяет сделать вывод об адекватности математической модели.

#### Литература

1. Каталог продукции «Гидросила»: Гидрораспределители. – Режим доступа: <http://www.hidrosila.com/files/catalog/en-catalog-11.pdf>. – Дата доступа: 10.03.2022.
2. Стасенко, Д. Л. Теоретические положения формирования проточной части гидроаппаратуры при форсировании по давлению / Д. Л. Стасенко, Д. В. Лаевский // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Минск, 2012. – Вып. 1. – С. 282–286.

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ НАПИСАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ С ПОМОЩЬЮ САМ-ПРИЛОЖЕНИЯ К КОМПАС-3D

И. Д. Мазейко

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

Научный руководитель Н. А. Старовойтов

Сегодня львиная доля всех управляющих программ (УП) написана с использованием САМ-систем. Это очень удобно для современных станков. Использование САМ-систем позволяет в разы уменьшить время написания управляющих программ как для сложных деталей, так и для относительно простых. Помимо скорости написания увеличивается и точность обработки. Внедрение САМ-систем позволило написать УП путем описания траектории движения инструмента автоматизированным способом с помощью программы CLDATA (CutterLocation DATA) и перекодируется в понятную для станка УП с помощью Постпроцессора.

УП – набор данных в заданном формате (на языке конкретного УЧПУ) для управления перемещением рабочих органов станка, а также другими установленными на нем устройствами.

Траектория – прямая или кривая движения программируемой точки инструмента, которую инженер-программист рассчитывает в САМ-системе. Траектория состоит из линейных участков и дуг. Набор данных о траектории движения называется CLDATA. Такая информация не понятна для станка.

Постпроцессор – это, как правило, файл и или несколько файлов, в которых заложена информация о конфигурации оборудования и системы ЧПУ, установленной на данное оборудование, наличии различных функций.

Основное назначение постпроцессора – это перекодирование информации из формата CLDATA непосредственно в УП станка. Таким образом, постпроцессор – это промежуточное звено между САМ, системой и станком. Именно большое многообразие станочного оборудования и систем ЧПУ потребовало от разработчиков САМ-систем применения такой схемы, когда пользователь рассчитывает как бы обобщенную программу движения, а далее использует нужный постпроцессор для ее адаптации под заданный станок.

Сам файл постпроцессора перекодированием не занимается. Для этого существует специальный модуль-обработчик, который может быть внешним или встроенным в систему.

**Способы передачи управляющих программ на станки с ЧПУ.** После того как управляющая программа сгенерирована в САМ-модуле, она должна быть передана на станок с ЧПУ.

Более современными способами передачи УП на станок являются использование USB флэш-памяти, прямая передача УП от компьютера по сетевым каналам связи и беспроводные каналы связи, такие как Wi-Fi, Bluetooth, которые обеспечивают работу как в режиме ввода, так и в режиме вывода информации.

Для разработки управляющих программ автоматизированным способом токарных станков с ЧПУ использован модуль ЧПУ «Токарная обработка», приложение к графическому редактору «КОМПАС-3D».

**Модуль ЧПУ «Токарная обработка»** – первое САМ-приложение, полностью интегрированное в систему трехмерного моделирования КОМПАС-3D. Приложение предназначено для автоматизации разработки управляющих программ для токарных станков с ЧПУ.

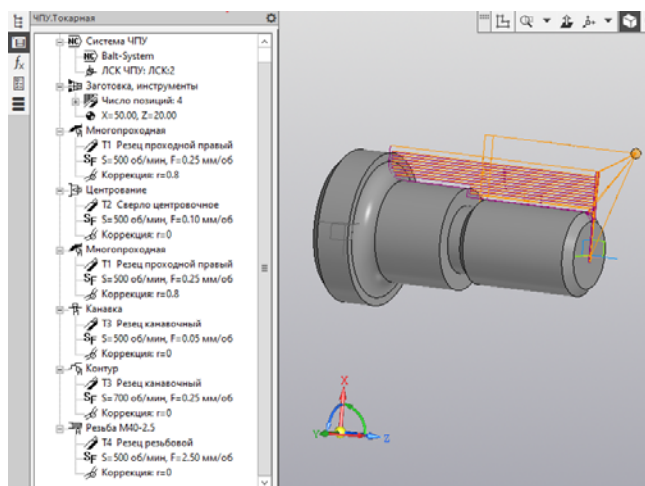


Рис. 1. Пример набора многопроходных, токарно-сверлильных и резьбонарезных операций при обработке деталей типа «тел вращения»

Основные возможности приложения:

- построение контуров обработки визуальным выбором поверхностей или эскизов непосредственно на трехмерной модели, созданной в системе КОМПАС-3D;
- автоматический расчет траекторий. Полученные траектории полностью ассоциативны с элементами 3D-модели;
- генерация управляющей программы в промежуточном коде на основе стандарта ISO;
- конвертация управляющей программы в коды конкретной системы ЧПУ с помощью постпроцессоров. В базовый пакет поставки входят постпроцессоры для следующих систем: CNC Balt-System, Маяк 600T, НЦ-31, FANUC Series MODEL D, SINUMERIK 802D, FAGOR CNC 8035T;
- визуализация обработки в окне системы КОМПАС-3D с имитацией удаления материала и контролем процесса обработки.

Приложение обладает большим набором многопроходных, токарно-сверлильных и резьбонарезных стратегий. Поддерживается создание следующих видов обработки:

- многопроходная – наружное точение, растачивание, подрезание, многопроходная канавка;
- контур – контурное точение (как правило, чистовое);
- канавка – простая канавка, параллельная координатным осям;
- сверление – одно- и многопроходное сверление, центрование, обработка отверстий осевым инструментом;
- нарезание резьбы резцом – многопроходное нарезание резьбы резцом (цилиндрических, конических, торцевых);
- нарезание резьбы плашкой/метчиком – нарезание резьбы плашкой или метчиком;
- отрезка – отрезка, в том числе с периодическим выводом резца.

## Литература

1. Руководство программиста (УЧПУ NC-110, NC-201, NC-201M, NC-202, NC-210, NC-220, NC-230), Балт-Систем. – СПб., 2008. – Режим доступа: [www.bsystem.ru](http://www.bsystem.ru).
2. Старовойтов, Н. А. Разработка управляющих программ для токарных станков с ЧПУ : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» днев. и заоч. форм обучения / Н. А. Старовойтов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 112 с.
3. Руководство оператора (УЧПУ NC-110, NC-201, NC-201M, NC-202, NC-210, NC-220, NC-230), Балт-Систем. – СПб., 2008. – Режим доступа: [www.bsystem.ru](http://www.bsystem.ru).
4. Старовойтов, Н. А. Эмулятор системы ЧПУ модели NC200 для разработки и отладки управляющих программ / Н. А. Старовойтов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 18 с.
5. САМ приложение «CNC Turn x64» к графическому редактору «Компас 3Dv19». – Режим доступа: <https://kompas.ru>.
6. Старовойтов, Н. А. Автоматизированное написания управляющих программ для токарных станков с ЧПУ : учеб.-метод. пособие / Н. А. Старовойтов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 42 с.

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССОВ РАССОЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ  
И ОСАЖДЕНИЯ ГАЛИТА В ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИНАХ  
ПО ГИДРОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

**С. Л. Порошина, В. А. Климович**

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

Научный руководитель В. Д. Порошин

Нефтяные месторождения Беларуси связаны с коллекторами, пустотное пространство которых частично заполнено галитом. При разработке открытых здесь залежей с использованием пресных или слабоминерализованных вод для вытеснения нефти происходит растворение данного минерала, что приводит к значительному изменению фильтрационно-емкостных свойств пород. Пластовые и значительная часть попутных вод этих месторождений представлены крепкими рассолами с предельной степенью насыщенности по хлоридам натрия. При изменении термобарических условий во время эксплуатации скважин из этих рассолов могут выпадать хлоридные соли и прежде всего галит. Поэтому для рациональной эксплуатации таких залежей необходимо учитывать происходящие процессы рассоления пород, приводящие к существенному изменению пористости и проницаемости продуктивных пластов при эксплуатации скважин, добывающих обводненную продукцию, а также проявляющиеся процессы солеотложения в стволах скважин и на оборудовании. Возможности оценки интенсивности проявления этих процессов по промысловым гидрохимическим данным рассмотрим на примере межсолевой залежи нефти Северо-Домановичского месторождения.

По поверхности межсолевых отложений Северо-Домановичская структура представлена моноклиналильным блоком с северо-восточным падением продуктивных пород, ограниченным с юго-запада региональным разрывным нарушением. Залежь нефти приурочена к межсолевым верхнедевонским отложениям и связана с карбонатными засолоненными коллекторами. Пластовые воды являются высокоминерализованными (340 г/л) рассолами хлоркальциевого типа. В пробную эксплуатацию залежь введена в 1997 г. скважиной 25, в промышленную разработку – в 2013 г. При разработке залежи с попутными водами выносятся значительное количество

растворенного в продуктивных пластах хлорида натрия. Пористость и проницаемость этих пластов постоянно меняется. На ряде добывающих скважин отмечены случаи хлоридного солеобразования, что затрудняет их эксплуатацию. Существенную помощь в изучении интенсивности рассоления коллекторов и прогноза солеотложения в скважинах рассматриваемой залежи могут оказать результаты гидрохимического мониторинга. Ранее проведенные в этом направлении исследования и обработка имеющихся в наличии гидрохимических данных по компьютерной программе Галит-1 [1] позволили получить конкретные выводы лишь по обводнению скважины 25, химический состав отобранных проб попутных вод которой практически не был искажен технологическими обработками [2].

Попутно добываемые с нефтью воды ряда других скважин, эксплуатирующих межсолевою залежь Северо-Домановичского месторождения, представляют собой смеси в разных пропорциях попутных или пластовых рассолов, обводняющих скважины с преимущественно пресными водами технологических обработок, которые используются для предупреждения и борьбы с хлоридными солеотложениями. Об этом свидетельствуют особенности изменения плотности попутных вод в процессе эксплуатации этих скважин. Так, после проведения технологических обработок скважин отмечается добыча совместно с нефтью слабоминерализованных вод с небольшим участием поступающих из продуктивных пластов в скважины высокоминерализованных рассолов. По мере увеличения отборов попутных вод их минерализация закономерно возрастает за счет увеличения доли рассолов, поступающих из призабойной зоны скважин (рис. 1). После проведения повторных технологических обработок отмеченная картина повторяется.

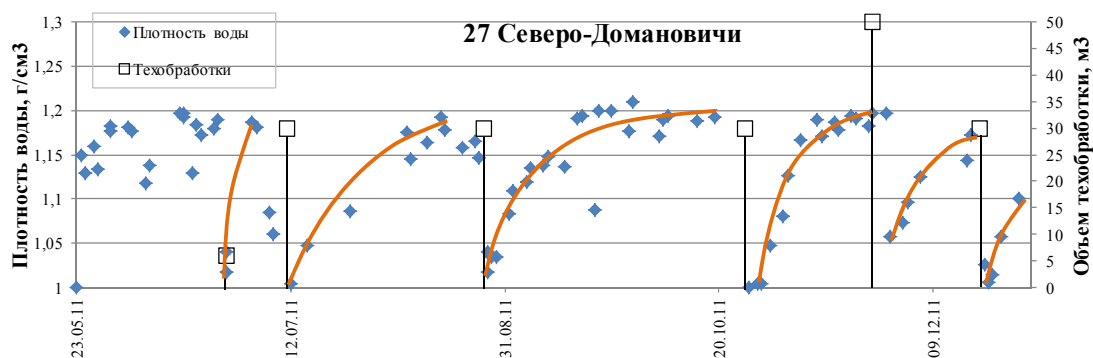


Рис. 1. Изменение плотности попутных вод в процессе эксплуатации скважины 27 Северо-Домановичского месторождения на различных этапах ОПР

Отсутствие на момент ранее проводимых по данной залежи гидрохимических исследований методических приемов корректной обработки данных о составе поступающих из продуктивных пластов попутных рассолов, существенно разбавленных пресными водами при проведении технологических обработок в других (кроме скв. 25) скважинах, не позволило сделать по ним каких-то определенных выводов.

В данной работе, используя специально разработанную для таких случаев методику Галит-1т (Порошина, 2020), авторы попытались определиться с теми процессами, которые происходят в призабойных зонах и в самих скважинах, попутно с нефтью в которых добываются смешанные природные и техногенные воды. Отличие метода Галит-1т от Галит-1 состоит в том, что для определения суммарного содер-

жания кальция и магния в обводняющих скважину попутных водах, необходимо построить график взаимосвязи плотности и концентрации Ca + Mg для вод, разбавленных при технологических обработках скважин. По этому графику, используя сведения о максимальной плотности попутных вод, можно определить искомую величину Ca + Mg, которую и вносят в расчетную формулу определения долевого участия закачиваемых вод в попутно добываемых по программе Галит-1. Аналогично, используя полученную величину, по графику взаимосвязи суммарных концентраций кальция и магния с концентрациями натрия и калия находится суммарная концентрация ионов Na + K в обводняющих скважины водах. Далее расчет ведется по методике Галит-1.

С целью решения поставленной задачи по всем представительным химическим анализам были рассчитаны величины коэффициента долевого участия закачиваемых вод в поступающих из продуктивных пластов совместно с нефтью попутных водах (X), а также величины избыточного содержания в них хлоридов натрия ( $\text{NaCl}_{\text{изб}}$ ) по способу Галит-1т. Результаты этих расчетов приведены в таблице.

**Результаты расчета гидрохимических показателей X,  $\text{NaCl}_{\text{изб}}$   
Северо-Домановичского месторождения**

Скважина	Дата отбора пробы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	X	Na + K	$\text{Na}_{\text{изб}}$ , мг/л	$\text{NaCl}_{\text{изб}}$ , г/л
скв. 27	29.03.11	1,205	0,65	103785	78907	200
скв. 27	31.01.13	1,197	0,37	90793	45962	117
скв. 31	19.07.05	1,180	0	62533	-8000	-20
скв. 31	20.07.05	1,185	0,02	61693	-8044	-20
скв. 31	16.11.15	1,200	0,18	78445	20295	52
скв. 51	19.10.05	1,184	0,10	74334	10354	26
скв. 58г	01.09.16	1,187	0,01	66980	-3063	-8
скв. 59г	16.08.16	1,216	0,28	84093	32716	83
скв. 59г	21.08.16	1,196	0,33	87108	39799	101
скв. 59г	04.10.16	1,213	0,07	78211	12212	31
скв. 59г	07.10.16	1,182	0,15	73445	13452	34
скв. 59г	22.02.17	1,038	0,45	101787	62832	159
скв. 59г	05.05.17	1,177	0,07	70752	4563	11
скв. 59г	09.05.17	1,184	0,16	75750	16092	41
скв. 59г	19.05.17	1,135	0,04	68801	1005	2
скв. 59г	16.05.18	1,224	-0,16	55258	-26906	-68
скв. 59г	21.09.18	1,180	0,06	67824	954	2
скв. 59г	29.03.19	1,190	-0,04	61910	-11391	-29
скв. 60п	20.06.13	1,210	-0,06	62179	-13107	-33
скв. 60п	24.10.13	1,204	0,02	64058	-5124	-13
скв. 61п	05.05.15	1,215	0,18	77817	19484	49
скв. 61п	02.11.15	1,150	0,17	77160	18121	46
скв. 63g	03.05.17	1,190	0,58	105115	75519	192



Окончание

Скважина	Дата отбора пробы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	X	Na + K	Na <sub>изб</sub> , мг/л	NaCl <sub>изб</sub> , г/л
скв. 63g	22.05.17	1,118	0,57	102672	72323	184
скв. 63g	21.06.17	1,201	0,55	100437	68353	174

Расчеты свидетельствуют о том, что в отдельные периоды работы скважин попутные воды выносили из продуктивных пластов и с забоев скважин разное количество растворенного в них галита (процесс рассоления коллектора), а в некоторых случаях из попутных вод галит выпадал в осадок (процесс солеотложения). Максимальная величина избыточных концентраций хлоридов натрия в водах, поступающих совместно с нефтью в отдельные периоды в скважину 27, 59 и 63 достигает 150–200 г/л.

При этом авторами установлена достаточно тесная связь между величиной избыточного содержания в попутных водах хлорида натрия и долевым участием закачиваемых вод в попутно добываемых (рис. 2). Эта зависимость может быть представлена уравнением следующего вида:

$$\text{NaCl}_{\text{изб}} = 347,86X - 13,573 \quad (R^2 = 0,9918).$$

Приведенные выше материалы позволяют разобраться с условиями, при которых происходит обогащение попутно добываемых с нефтью вод хлоридами натрия и когда проявляется процесс солеотложения в скважинах. Очевидно, что растворение галита, находящегося в продуктивных породах и выпавшего в скважине, происходит закачиваемыми для ППД и технологическими водами, а выпадение этого минерала в осадок связано с поступлением в скважину пластовых рассолов, либо высококонцентрированных попутных вод, обводняющих скважины и перенасыщенных по хлоридам натрия. При этом даже недонасыщенные по хлоридам натрия поступающие в скважину воды в отдельных случаях могут стать предельно насыщенными по галиту за счет растворения выпавшего на забое осадка.

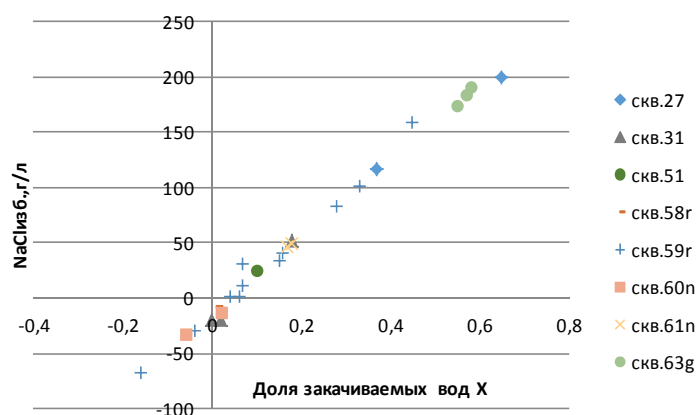


Рис. 2. Зависимость  $\text{NaCl}_{\text{изб}}$  от доли закачиваемых вод Северо-Домановичского месторождения нефти

Следует отметить, что, используя рис. 2, можно прогнозировать интенсивность проявления процессов растворения или осаждения галита в зависимости от величины коэффициента долевого участия закачиваемых вод в попутно добываемых. Полу-

ченные в процессе проведенных исследований результаты предлагается использовать при анализе, контроле и регулировании разработки не только межсолевой залежи нефти Северо-Домановичского месторождения, но и для всех нефтяных залежей, связанных с засоленными коллекторами, где одновременно проявляются процессы выпадения и растворения, выпавшего галита.

#### Литература

1. Порошина, С. Л. Новые подходы к оценке масштабов рассоления коллекторов нефтяных месторождений Беларуси по промысловым гидрохимическим данным / С. Л. Порошина // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 4. – С. 3–12.
2. Порошин, В. Д. Оценка масштабов рассоления продуктивных пород нефтяных месторождений Припятского прогиба по промысловым гидрохимическим данным (на примере Северо-Домановичского месторождения) / В. Д. Порошин, С. Л. Порошина // Літасфера. – 2020. – № 1 (52). – С. 148–160.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗОЛОТНИКОВЫХ ПАР СЕКЦИОННОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ТИПА РАМ С LS-УПРАВЛЕНИЕМ

К. В. Пупенко

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

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

При проектировании современных гидравлических систем с несколькими гидравлическими двигателями, работа которых жестко регламентируется требованиями безопасности, рекомендуют применять систему с LS-управлением. ОАО «Гомельское специальное конструкторско-техническое бюро гидропневмоавтоматики» производит секционные распределители типа РАМ с таким видом управления, однако для проектирования гидростанции плавучего крана необходимо произвести индивидуальный подбор геометрии дросселирующих канавок золотниковых пар, чтобы обеспечить равные перепады давления на каждой секции при прохождении к гидродвигателям разных расходов.

Площадь сечения проходных каналов золотника для его смещения из нейтрального положения и интенсивность нарастания расхода жидкости при изменении открытия дросселирующей щели зависит от конструктивного выполнения его рабочих поясков (рис. 1) [1], [2].

Выбор типа золотниковой пары зависит от максимального расхода и необходимого перепада давления. Для каждого вида профильной щели (рис. 1) площадь проходного сечения определяется по соответствующей формуле

$$f_a = \pi d s; \quad f_b = \pi(s - z)[d - (s - z)\sin\alpha \cdot \cos\alpha]\sin\alpha; \quad f_c = nb(s - z)\sin\alpha;$$

$$f_d = \frac{nb}{s}(s - z)^2 \sin\alpha; \quad f_e = nb\left[R - \sqrt{h^2 + (e + z)^2}\right],$$

где  $d, s, z, b, R, h, e$  – геометрические размеры профилей дросселирующих проточек на золотниках (рис. 1);  $n$  – количество проточек на золотнике, расположенных равномерно по окружности.

Треугольная форма дросселирующих пазов обеспечивает более плавную интенсивность нарастания расхода рабочей жидкости и более технологична.

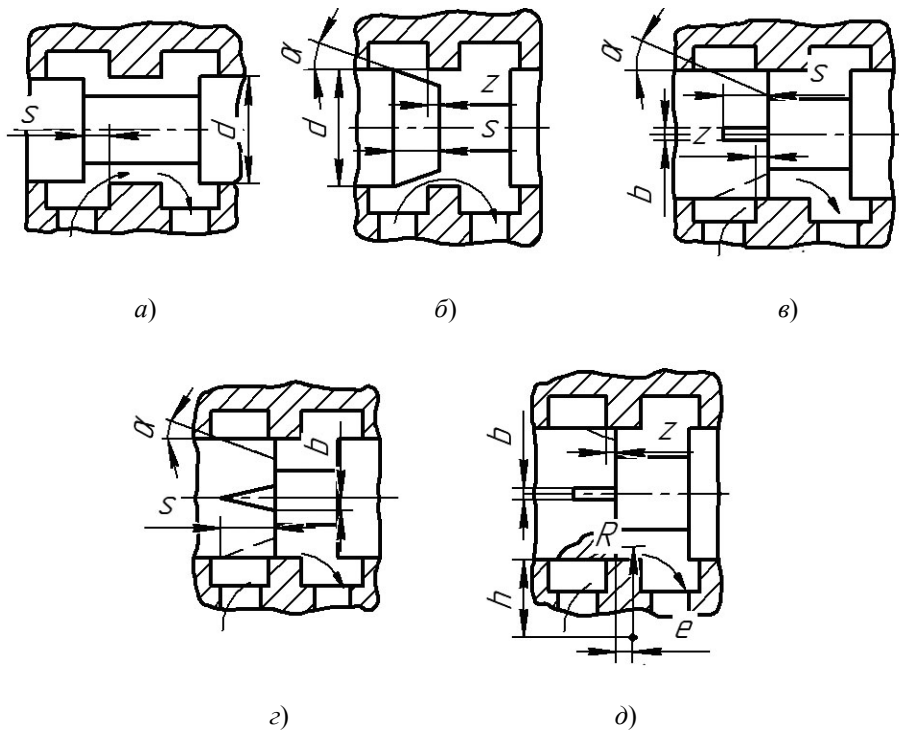


Рис. 1. Профили рабочих поясков золотниковых распределителей:  
 а – цилиндрический поясok и кольцевая проточка в гильзе с острой кромкой;  
 б – коническая часть золотника и кольцевая проточка в гильзе; в – кольцевая проточка в гильзе и шлицы на золотнике; з – кольцевая проточка в гильзе и треугольные прорезы в золотнике; д – кольцевая проточка в гильзе и параболические проточки на золотнике

Геометрия распределителя типа РАМ с выбранной треугольной формой дросселирующих щелей представлена на рис. 2, а.

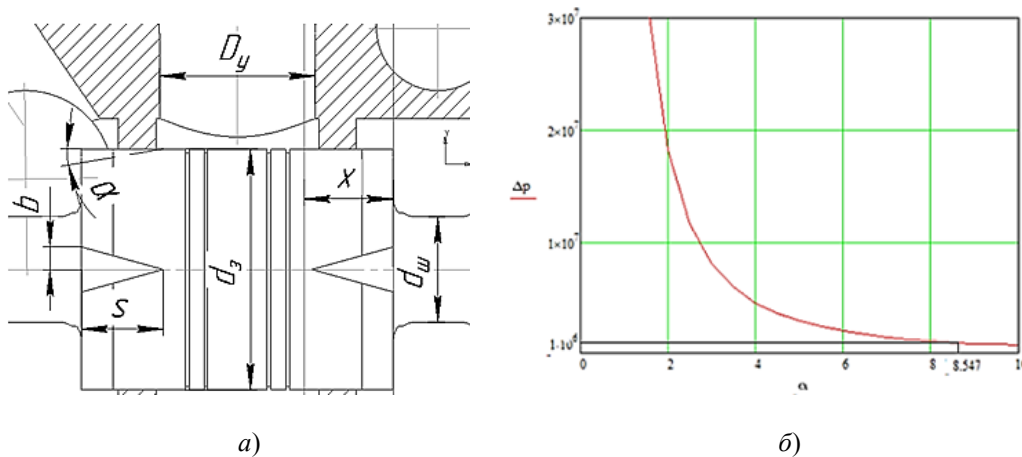


Рис. 2. Расчетная схема распределителя (а) и графическая зависимость перепада давления от угла наклона треугольной прорези на золотнике  $\Delta p = f(\alpha)$  (б)

Наибольшая площадь сечения дроссельной щели определяется из условия обеспечения минимального перепада давления по формуле

$$f_{\max} = \frac{Q}{10^3 \cdot \mu \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}},$$

где  $\mu = 0,65$  – коэффициент расхода [1];  $\rho = 877 \text{ кг/м}^3$  – плотность жидкости, применяемой в гидросистеме (масло промышленное И-46ПВ) [3].

Для дросселирующих проточек треугольной формы площадь поясков определяется по формуле

$$f_{\text{пояс}} = \frac{nb}{s}(s-z)\sin(\alpha),$$

где  $n = 3$  – число поясков;  $b = 6 \text{ мм}$  – половина ширины основания треугольника;  $s = 11 \text{ мм}$  – длина пояска;  $z = 1 \text{ мм}$  – перекрытие (в соответствии с конструкцией распределителя типа РАМ [4]).

Таким образом, перепад давления при треугольных дроссельных проточках определяется по формуле

$$\Delta p = \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{s}{(s-z)^2} \right) \left( \frac{Q}{nb \sin(\alpha)} \right)^2.$$

При данной геометрии золотниковой пары переменным параметром является угол наклона внутренней поверхности треугольной прорези  $\alpha$ , и для точного определения его значения при заданном перепаде давления  $\Delta p = 1 \text{ МПа}$  (исходя из параметров работы системы LS-управления гидроприводом плавучего крана) используем графическую зависимость перепада давления от угла  $\alpha$   $\Delta p = f(\alpha)$  (рис. 2, б).

Исходя из полученного графика (рис. 2, б), определяем величину угла  $\alpha = 8^\circ 33'$ .

Для гидросистемы плавучего крана применяется пятисекционный распределитель типа РАМ с LS-управлением, на выходе каждой секции поддерживаются разные расходы и давления, но перепад давления на кромках золотника должен быть одинаковым для всех секций. Таким образом, геометрические размеры дроссельных проточек в каждой секции будут различны и определяются по заданным расходам на выходе секций  $Q$ . Результаты расчетов золотниковых пар представлены в таблице.

#### Исходные данные и результаты расчета поясков распределителя

Секция распределителя	$Q$ , л/мин	$n$	$b$ , м	$\alpha$ , °	График $\Delta p = f(\alpha)$	Геометрические размеры дросселирующих канавок
Грузовая лебедка	250	3	0,003	8,547		

Окончание

Секция распределителя	$Q$ , л/мин	$n$	$b$ , м	$\alpha$ , °	График $\Delta p = f(\alpha)$	Геометрические размеры дросселирующих канавок
Изменение вылета стрелы	110	3	0,002	5,615		
Механизм поворота	150	3	0,003	5,112		
Раскладывание корневой секции	70	3	0,001	7,187		
Выдвижение стрелы	90	3	0,001	9,23		

Изучены геометрические особенности золотниковых пар дросселирующих распределителей. Выбрана геометрия золотниковых пар для распределителя типа РАМ с LS-управлением, которая учитывает технологичность изготовления и плавность изменения расхода при движении золотника. Полученная зависимость для определения перепада давления при треугольных проточках на золотнике и кольцевой проточке на гильзе позволяет путем подбора определить наиболее рациональную геометрию проточки для обеспечения заданного перепада давления.

## Литература

1. Башта, Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1972. – 320 с.
2. Абрамов, Е. И. Элементы гидропривода : справочник / Е. И. Абрамов, К. А. Колесниченко, В. Т. Маслов. – Киев : Техніка, 1969. – 319 с.
3. Каталог продукции ООО «Газпромнефть – СМ».
4. Каталог изделий Гомельского ОАО «ГСКТЬ ГА». – КР 44ХХ Х12-01/10.00. Распределители гидравлические секционные типа РАМ-12/3. – Гомель : ГСКТЬ ГА, 2010.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДИМОЙ ПРОДУКЦИИ И СНИЖЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА БРАКА

Е. А. Пикас

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

Научный руководитель С. В. Рогов

Важнейшим источником роста эффективности производства является постоянное повышение технического уровня и качества выпускаемой продукции. Для технических систем характерна жесткая функциональная интеграция всех элементов, поэтому в них нет второстепенных элементов, которые могут быть некачественно спроектированы и изготовлены. Таким образом, современный уровень развития НТП значительно ужесточил требования к техническому уровню и качеству изделий в целом и их отдельных элементов. Системный подход позволяет объективно выбирать масштабы и направления управления качеством, виды продукции, формы и методы производства, обеспечивающие наибольший эффект усилий и средств, затраченных на повышение качества продукции. Системный подход к улучшению качества выпускаемой продукции позволяет заложить научные основы промышленных предприятий, объединений, планирующих органов.

Основной задачей статистических методов контроля является обеспечение производства пригодной к употреблению продукции и оказание полезных услуг с наименьшими затратами.

Статистические методы контроля качества продукции дают значительные результаты по следующим показателям: 1) повышение качества закупаемого сырья; 2) экономия сырья и рабочей силы; 3) повышение качества производимой продукции; 4) снижение затрат на проведение контроля; 5) снижение количества брака; 6) улучшение взаимосвязи между производством и потребителем; 7) облегчение перехода производства с одного вида продукции на другой.

Главная задача – не просто увеличить качество продукции, а увеличить количество такой продукции, которая была бы пригодной к употреблению.

Основным методом контроля поступающих потребителю сырья, материалов и готовых изделий является статистический приемочный контроль качества продукции.

**Статистический приемочный контроль по альтернативному признаку.** Потребитель, как правило, не имеет возможности контролировать качество продукции в процессе ее изготовления. Тем не менее он должен быть уверен, что получаемая им от изготовителя продукция соответствует установленным требованиям, и, если это не подтвердится, он вправе потребовать от изготовителя замены брака или устранения дефектов.

Основным методом контроля поступающих потребителю сырья, материалов и готовых изделий является статистический приемочный контроль качества продукции.

*Статистический приемочный контроль качества продукции* – выборочный контроль качества продукции, основанный на применении методов математической статистики для проверки качества продукции установленным требованиям.

Если при этом объем выборки становится равным объему всей контролируемой совокупности, то такой контроль называют сплошным. *Сплошной контроль* возможен только в тех случаях, когда в процессе контроля качество продукции не ухудшается, в противном случае выборочный контроль, т. е. контроль определенной небольшой части совокупности продукции, становится вынужденным.

Сплошной контроль проводится, если к тому нет особых препятствий, в случае возможности наличия критического дефекта, т. е. дефекта, наличие которого полностью исключает использование продукции по назначению.

Можно проверить все изделия также и при следующих условиях:

- 1) партия изделий или материала невелика;
- 2) качество входного материала плохое или о нем ничего не известно.

Можно ограничиться проверкой части материала или изделий, если:

- 1) дефект не вызовет серьезной неисправности оборудования и не создает угрозу жизни;
- 2) изделия используются группами;
- 3) бракованные изделия можно обнаружить на более поздней стадии сборки.

В практике статистического контроля генеральная доля  $q$  неизвестна и ее следует оценить по результатам контроля случайной выборки объемом  $n$  изделий, из которых  $m$  дефектных.

Под планом статистического контроля понимают систему правил, указывающих методы отбора изделий для проверки, и условия, при которых партию следует принять, забраковать или продолжить контроль.

Задача правильного выбора плана статистического контроля состоит в том, чтобы сделать ошибки первого и второго рода маловероятными. Напомним, что ошибки первого рода связаны с возможностью ошибочно забраковать партию изделий; ошибки второго рода связаны с возможностью ошибочно пропустить бракованную партию.

**Стандарты статистического приемочного контроля.** Для успешного применения статистических методов контроля качества продукции большое значение имеет наличие соответствующих руководств и стандартов, которые должны быть доступны широкому кругу инженерно-технических работников. Стандарты на статистический приемочный контроль обеспечивают возможность объективно сравнивать уровни качества партий однотипной продукции как во времени, так и по различным предприятиям.

Остановимся на основных требованиях к стандартам по статистическому приемочному контролю.

Прежде всего, стандарт должен содержать достаточно большое число планов, имеющих различные оперативные характеристики. Это важно, так как позволит выбирать планы контроля с учетом особенностей производства и требований потребителя к качеству продукции. Желательно, чтобы в стандарте были указаны различные типы планов: одноступенчатые, двухступенчатые, многоступенчатые, планы последовательного контроля и т. д.

Основными элементами стандартов по приемочному контролю являются:

1. Таблицы планов выборочного контроля, применяемые в условиях нормального хода производства, а также планов для усиленного контроля в условиях разладок и для облегчения контроля при достижении высокого качества.
2. Правила выбора планов с учетом особенностей контроля.
3. Правила перехода с нормального контроля на усиленный или облегченный и обратного перехода при нормальном ходе производства.
4. Методы вычисления последующих оценок показателей качества контролируемого процесса.

**Контрольные карты.** Первоначально контрольные карты использовались для регистрации результатов измерений требуемых свойств продукции. Выход параметра за границы поля допуска свидетельствовал о необходимости остановки производ-

ства и проведении корректировки процесса в соответствии со знаниями специалиста, управляющего производством.

Это давало информацию о том, когда кто, на каком оборудовании получал брак в прошлом.

Однако в этом случае решение о корректировке принималось тогда, когда брак уже был получен. Поэтому важно было найти процедуру, которая бы накапливала информацию не только для ретроспективного исследования, но и для использования при принятии решений. Это предложение опубликовал американский статистик И. Пейдж в 1954 г. Карты, которые используются при принятии решений, называются кумулятивными.

Контрольная карта состоит из центральной линии, двух контрольных пределов (над и под центральной линией) и значений характеристики (показателя качества), нанесенных на карту для представления состояния процесса.

В определенные периоды времени отбирают (все подряд; выборочно; периодически из непрерывного потока и т. д.) *n* изготовленных изделий и измеряют контролируемый параметр.

Результаты измерений наносят на контрольную карту и в зависимости от этого значения принимают решение о корректировке процесса или о продолжении процесса без корректировок.

Все большее освоение новой для нашей страны экономической среды воспроизводства, т. е. рыночных отношений, диктует необходимость постоянного улучшения качества с использованием для этого всех возможностей, всех достижений прогресса в области техники и организации производства.

Наиболее полное и всестороннее оценивание качества обеспечивается, когда учтены все свойства анализируемого объекта, проявляющиеся на всех этапах его жизненного цикла: при изготовлении, транспортировке, хранении, применении, ремонте, техническом обслуживании.

Таким образом, производитель должен контролировать качество продукции и по результатам выборочного контроля судить о состоянии соответствующего технологического процесса. Благодаря этому он своевременно обнаруживает разладку процесса и корректирует его.

#### Литература

1. Гембрис, С. Управление качеством / С. Гембрис, Й. Геррманн. – Омега-Л СمارтБук, 2008.
2. Шевчук, Д. А. Контроль качества / Д. А. Шевчук. – М. : Гросс-Медиа, 2009.
3. Электронный учебник «Контроль качества».

### **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ОБЪЕМНОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ В СРЕДЕ «AMESIM»**

**Е. В. Хазеев**

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

В современных мобильных машинах применяются гидравлические системы с объемной адаптацией к нагрузке, при проектировании которых необходимо учитывать влияние динамических характеристик и изменение основных параметров рабо-



ты системы в период ее эксплуатации. С помощью имитационного моделирования можно решать задачи регулирования, управления, статики, динамики, энергетики гидравлических механизмов с единых методических позиций и объединять все исследования в одно ядро расчетного комплекса. Пакет «Amesim» представляет собой программное обеспечение для моделирования работы и управления системами гидропривода. С помощью данной программы можно конструировать схемы гидропривода и гидроавтоматики с ручным, электрическим и электронным управлением [1].

Целью работы является создание имитационной модели гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке на базе патента на изобретение RU (11) 2 276 237(13) C2, а также снятие значений основных параметров работы системы в различных условиях эксплуатации.

Объектом исследования является разработка имитационной модели гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке [2], предназначенной для подъема, опускания рабочих органов машины (рис. 1) и возможность применения программы «Amesim» для начальной оценки параметров системы.

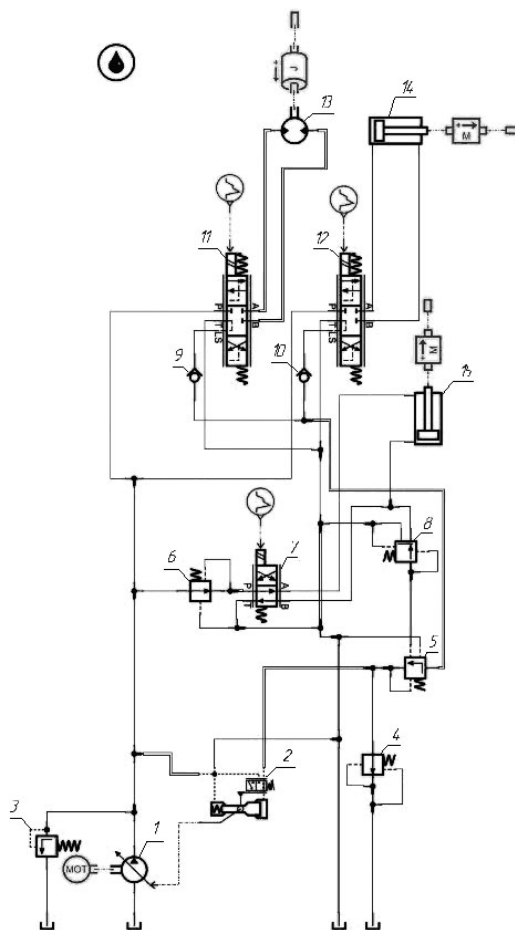


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке, построенной в программе «Amesim»:  
 1 – регулируемый насос; 2 – регулятор; 3 – предохранительный клапан;  
 4 – регулятор расхода; 5, 6 – редукционный клапан; 7, 11, 12 – распределитель;  
 8 – клапан управления уровнем давления; 9, 10 – обратный клапан;  
 13 – гидромотор; 14, 15 – цилиндр

Основными узлами исследуемой гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке являются: узел регулируемого насоса с чувствительным к нагрузке управляющим золотником; узел основных распределителей; узел потребителей; узел клапанной группы; узел вспомогательного блока; узел гидравлических линий [2]. Для данных узлов в среде «Amesim» построим диаграмму загрузки каждого узла гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке во время рабочего цикла (рис. 2).

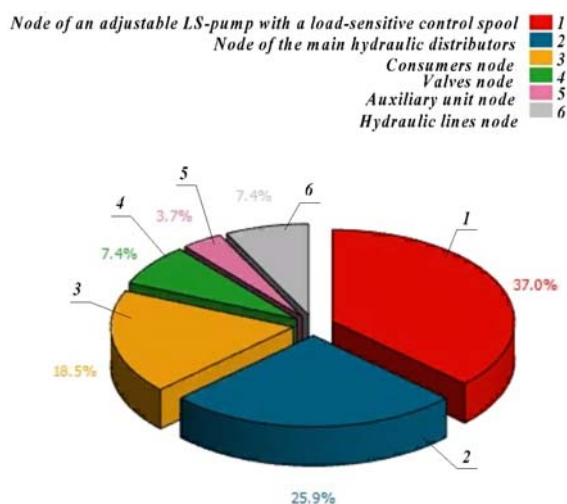


Рис. 2. Диаграмма загрузки узлов гидравлической системы объемной с адаптацией к нагрузке во время рабочего цикла:

1 – узел регулируемого насоса с чувствительным к нагрузке управляющим золотником; 2 – узел основных распределителей; 3 – узел потребителей; 4 – узел клапанной группы; 5 – узел вспомогательного блока; 6 – узел гидравлических линий

В режиме моделирования можно наблюдать работу гидравлической системы на основе созданной имитационной модели. Результатом создания модели в среде «Amesim» является график полученных зависимостей величин давления от времени основных элементов гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке (рис. 3).

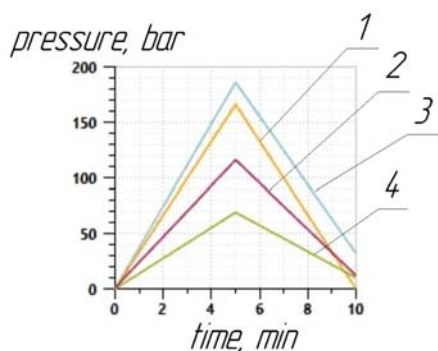


Рис. 3. График полученных зависимостей величин давления от времени основных элементов гидравлической системы с объемной с адаптацией к нагрузке:

1 – график зависимости основного цилиндра; 2 – график зависимости вспомогательного цилиндра; 3 – график зависимости регулируемого насоса; 4 – график зависимости гидромотора

Таким образом, для создания имитационной модели в среде «Amesim» в начале работы строим принципиальную схему исследуемой гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке (рис. 1). Затем задаем начальные параметры работы гидравлической системы и требуемую нагрузку на потребителях. После указания в программе всех требуемых значений и сбора принципиальной схемы исследуемой гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке начинаем симулировать работу системы в автоматическом режиме [3].

После завершения расчета и симуляции работы системы строим диаграмму загрузки каждого элемента системы во время рабочего цикла (рис. 2), а также замеряем полученные значения основных рабочих параметров в определенных условиях эксплуатации и в заданный момент времени (рис. 3).

В результате имитационного моделирования гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке в различных условиях эксплуатации удалось проанализировать работоспособность гидравлической системы при различных значениях основных параметров системы и при различных условиях нагружения, что, в свою очередь, позволяет свести к минимуму допущение негативных факторов при работе системы на ранних этапах проектирования.

#### Литература

1. Имитационное моделирование гидросистемы снегоочистителя «Амкодор 9531» в среде «FluidSim» / Е. В. Хазеев [и др.] // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2021. – С. 109–111.
2. Гидросистема мобильной машины : пат. RU 2276237 C2 / В. П. Баторшин, Е. С. Голоскин, А. М. Петров. – 2004. – 8 с.
3. Гимадиев, А. Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах : электрон. учеб. пособие / А. Г. Гимадиев, П. И. Грешняков, А. Ф. Синяков ; Электрон. текстовые. – Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2014. – 136 с.

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ АНАЛИЗА РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Д. В. Симогостицкий

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

Научный руководитель О. К. Абрамович

Теория разработки нефтяных и газовых месторождений в настоящее время располагает широким набором строгих, с позиций фундаментальных наук, аналитических способов решения множества основных задач проектирования и геолого-промыслового анализа разработки. На разных этапах освоения нефтяных и газовых месторождений используется моделирование с высокой степенью адекватности моделей. Высокоинтеллектуальные программные продукты позволяют повышать точность геологического прогноза с описанием природного резервуара, его параметров и строения в трехмерном варианте. Для создания 3D-моделей, например, эффективно используют продукты фирмы Landmark, такие как En-Rich, StratWorks и Z-map Plus. При предметном изучении залежей отмечаются индивидуальности их геологического строения и условий залегания нефти, а также особенности сложившихся систем разработки. Роль анализа разработки нефтяных месторождений сложно переоценить, в том числе и в оценке достоверности числящихся на балансе запасов. Основным смыслом геолого-

промышленного анализа разработки состоит в воспроизводстве корректного научно обоснованного представления об изменениях состояния залежей углеводородов во времени в результате извлечения из залежи нефти и газа [2].

Просматривая результаты анализа ряда месторождений как за рубежом, так и в Беларуси, можно констатировать некоторое отступление от классических законов с позиций фундаментальных наук и аналитических способов решения задач проектирования и разработки. Постановке такой проблемы посвящены представленные материалы. Проанализировав ряд графиков разработки нефтяных месторождений Западной Сибири и месторождений Припятского прогиба, установлены факты закачки избыточных объемов воды по отношению к объемам отобранной из залежей жидкости. Для сопоставления были задействованы данные по следующим месторождениям: Варьеганское, Возейское, Каменоложское, Северо-Варьеганское, Тарханское (см. таблицу).

#### Данные по дисбалансу «закачка–добыча» на месторождениях России

Месторождение	Закачка воды, м <sup>3</sup>	Добыча нефти, м <sup>3</sup>	Добыча воды, м <sup>3</sup>
Варьеганское	526 млн	136,82 млн	144 млн
Возейское	199 млн	51,76 млн	115,29 млн
Каменоложское	400 млн	200 млн	120 млн
Северо-Варьеганское	207,7 млн	58,82 млн	82,35 млн
Тарханское	443 тыс.	176,47 тыс.	223,53 тыс.

Подобные вопросы становятся еще более актуальными, когда факты пятикратного превышения объемов закачки воды против проектных уровней интерпретируются в качестве положительных технологических показателей разработки залежей.

Основная суть процессов заводнения нефтяных пластов состоит в том, чтобы обеспечить замещение объемов пластовой продукции, отбираемой из залежей, объемами закачиваемой воды. Поэтому учет объемов закачиваемой воды можно использовать в качестве метода контроля за разработкой залежей.

При оценке состояния разработки многих наиболее крупных залежей и месторождений Оренбургской области приведены соотношения объемов закачанной воды и отобранной жидкости по объектам (рис. 1), разрабатываемым с заводнением в большей части по внутриконтурным схемам, и эти соотношения по отдельным объектам представлены на рис. 1.

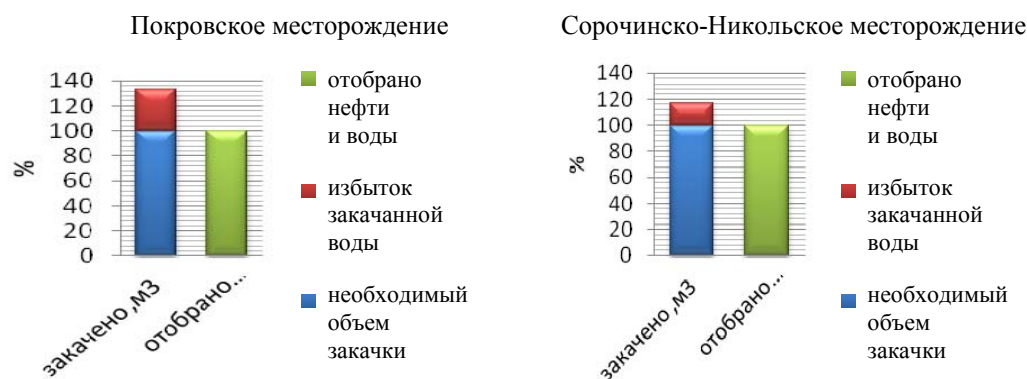


Рис. 1. Соотношения объемов закачанной воды и отобранной жидкости по объектам Оренбургской области

Принципиальное аналитическое выражение для составления баланса «закачка–отбор» на основе промышленной информации за любой период времени представляется в виде формулы

$$V_{\text{в}} - \frac{q_{\text{н}}\beta_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}} - \frac{q_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = \pm\Delta V,$$

где  $V_{\text{в}}$  – объем закачанной воды, м<sup>3</sup>;  $q_{\text{н}}$  – количество добытой нефти, т;  $\beta$  – объемный коэффициент нефти, ед.;  $\rho_{\text{н}}$  – плотность нефти, т/м<sup>3</sup>;  $q_{\text{в}}$  – количество добытой воды, т;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность добытой воды, т/м<sup>3</sup>;  $\Delta V$  – объем избытка (+) или недостатка (–) закачанной воды, м<sup>3</sup>.

Отрицательный результат решения уравнения свидетельствует о проявлении естественной энергии пластовой системы, а величина – о масштабах ее проявления.

Избыток закачки воды – положительный результат решения уравнения представляется как издержки производства или как положительный технологический показатель разработки. Однако это предположение не оправдывается ни теоретически, ни с практической точки зрения, что еще раз подчеркивает актуальность данной темы. Кроме того, при внутриконтурном заводнении залежи избыточная закачка воды неизбежно будет сопровождаться вытеснением части запасов нефти за пределы первоначального объема залежи, и чем больше численное значение результата решения, тем больше потерь запасов нефти следует ожидать. В случае, если результат решения уравнения близок к нулю, т. е. если объем закачанной воды равен объему отобранной из пласта жидкости, то следует констатировать, что выработка запасов из залежи происходит лишь за счет закачки воды [1].

Оценка с помощью уравнений материального баланса на упругом режиме показывает, что закачка воды в объеме всего одного процента от порового объема водонасыщенной породы должна привести к увеличению пластового давления на 15–20 МПа, а нефтенасыщенной породы, как минимум, на 5 МПа. А поскольку во многих случаях степень компенсации отбора закачкой не сопровождается закономерным и соответствующим ей поведением пластового давления в разрабатываемых залежах, то, возможно, происходит перераспределение пластовой энергии и перемещение пластовых жидкостей внутри всего нефтеводоносного резервуара в значительных масштабах, в этом случае подход к результатам анализа должен быть индивидуальным.

Однако есть месторождения, которые являются классическим примером согласованности степени компенсации отбора закачкой и поведения пластового давления. В качестве такого варианта можно рассмотреть фактические данные разработки семилукской залежи Речицкого месторождения Беларуси. Это – пластовая, сводовая, тектонически экранированная залежь нефти с карбонатным типом коллектора, разрабатываемая, в связи с полным отсутствием естественного влияния водоносной области, с поддержанием пластового давления путем закачки воды в законтурные скважины. На графике (рис. 2) представлена синхронизированная более чем 35-летняя история детального поведения технологических показателей разработки этой залежи: добычи нефти, воды, жидкости; закачки воды, разности объемов закачанной воды и дебитов жидкости и пластовых давлений в добывающих и нагнетательных скважинах. Четко вырисовывается видимая связь степени компенсации отбора жидкости закачкой воды в законтурные скважины с поведением пластового давления. Данное месторождение

является положительным примером использования метода материального баланса для качественной оценки достоверности информации об объемах закачиваемой в залежи воды. В качестве рекомендации при анализе графиков разработки залежей нефти следует обращать внимание на дисбаланс «закачка–отбор», чтобы найти правильное тому объяснение.

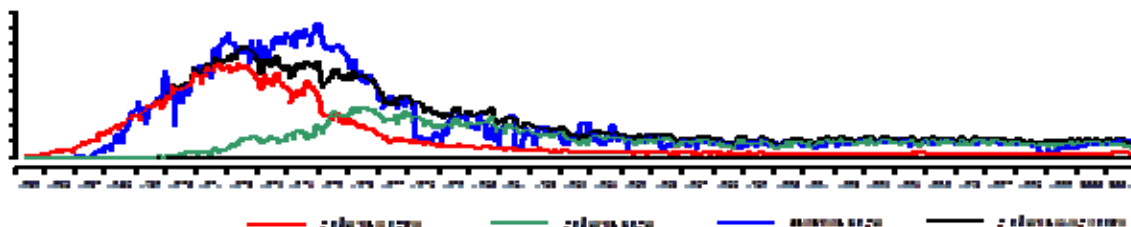


Рис. 2. Показатели разработки семилюкской залежи Речицкого месторождения

Таким образом, можно утверждать, что основные задачи геолого-промыслового анализа разработки нефтяных залежей должны находиться не в области формальной оценки состояния выработки числящихся балансовых запасов, а в плане оценки достоверности величины этих запасов, а также соответствия сложившихся системы разработки и механизма воздействия на пласты. Представления о величине реальных запасов формируются в процессе этого анализа.

#### Литература

1. Муляк, В. В. Практические последствия закачки избыточных объемов воды при заводнении нефтяных залежей / В. В. Муляк, В. М. Салажев, А. А. Бохан / XV Губкинские чтения. Нефтегазовая геологическая наука – XXI век : тез. докл. – М., 2004.
2. Чоловский, И. П. Промыслово-геологический контроль разработки месторождений углеводородов / И. П. Чоловский, Ю. И. Брагин. – М. : Нефть и газ, 2002.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ПРИРАБОТКИ

А. Д. Дещеня

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

Научный руководитель Г. С. Кульгейко

Реальные поверхности, полученные методами механической и физико-технической обработки, характеризуются чередой выступов и впадин разной высоты, расстояния и формы, образующих неровности поверхности. Совокупность микронеровностей с относительно малыми шаговыми параметрами рассматриваются и нормируются как шероховатость поверхности. Шероховатость является одной из основных геометрических характеристик поверхности, определяющих ее эксплуатационные показатели и играющих большую роль в соединениях деталей. В подвижных соединениях деталей шероховатость в значительной степени влияет на трение и износ сопрягаемых поверхностей [1].

При недостаточно гладких трущихся поверхностях, т. е. при большой шероховатости, соприкосновения между ними происходят в отдельных точках, что значительно увеличивает удельное давление. Вследствие этого смазка выдавливается

из зоны контакта, нарушается непрерывность масляной пленки и создаются условия для полусухого и даже сухого трения. А в условиях работы современных быстроходных и точных сопряжений деталей машин особенно важно обеспечить при малых зазорах жидкостное трение при тонких масляных пленках.

Слишком высокие требования к шероховатости поверхности, т. е. чрезмерное уменьшение параметров микронеровностей, кроме значительного увеличения затрат на обработку, могут привести к ухудшению эксплуатационных показателей работы сопряжения. Так, в узлах скольжения при слишком гладких сопрягаемых поверхностях может возникнуть явление «схватывания», при котором частицы металла отрываются от трущихся поверхностей, попадают в контактную зону и ускоряют износ. Оптимальная исходная шероховатость таких поверхностей должна быть близкой к получающейся в процессе приработки [2], [3].

В процессе эксплуатации состояние поверхностного слоя непрерывно меняется, что проявляется в изменении физико-механических свойств и микрогеометрии поверхности, ее шероховатости. В начальный период контакт поверхностей в паре трения происходит по вершинам неровностей. В местах контакта происходит интенсивное начальное изнашивание и в зависимости от условий трения происходит как уменьшение, так и увеличение шероховатости сопрягаемых поверхностей. Формируется некоторая оптимальная для конкретной пары трения шероховатость. Параметры такой эквивалентной шероховатости образуются на основании параметров шероховатости обеих поверхностей [3].

Один из элементов пары трения обычно по своим физико-механическим свойствам отличается от другого, их рабочие поверхности могут быть получены с применением различных методов механической и термической обработки. Так как поверхности имеют различные характеристики, то при контакте микронеровности более жесткого элемента будут внедряться в поверхность менее жесткого. Если в начальный период приработки наблюдаются пластические деформации, то постепенно пластические деформации трансформируются в упругие. В результате заданная технологическая шероховатость преобразуется в установившуюся эксплуатационную шероховатость поверхностей, т. е. формируется новая микрогеометрия трущихся деталей сопряжения. При одинаковых условиях изнашивания (материалы, режимы работы, смазка и др.) после приработки устанавливается примерно одинаковая, оптимальная с точки зрения износа шероховатость, не зависящая от первоначально полученной при механической обработке.

При назначении параметров первоначальной шероховатости поверхностей учитывается возможность их достижения рациональными методами обработки. С технологической и экономической точки зрения отделочную обработку отверстия выполнить труднее, чем вала. Поэтому это часто принимается во внимание при назначении шероховатости: первоначальная шероховатость у отверстия несколько больше, чем шероховатость поверхности вала [4].

В стандартах ЕСКД рекомендуемые посадки с зазором при размерах от 1 до 500 мм для точных и высокоточных (прецизионных) сопряжений предусматривают точность отверстий (5–9 квалитет), на одну ступень грубее вала (4–8 квалитет). Объясняется это возможностью получения экономически достижимых допусков при соответствующих методах обработки внутренних и наружных поверхностей вращения. Соответственно, при определении шероховатости большие ее значения назначаются для отверстий, меньшие – для валов. Аналогичные соотношения значений шероховатости отмечаются, например, в [1], [4] и другой справочной литературе в примерах нормирования микронеровностей для различных соединений в зависимости от характеристики поверхности.

Рекомендуемые значения параметров шероховатости могут быть рассчитаны по теоретическим или эмпирическим уравнениям связи показателей эксплуатационных свойств деталей машин с характеристиками качества поверхностей. Технологическое обеспечение шероховатости базируется в основном на эксплуатационном изучении таких связей. Чем ближе технологическая шероховатость к микронеровностям, образующимся после приработки, тем выше износостойкость и меньше период приработки трущихся поверхностей [2], [3], [5]. Часто рекомендуется назначать значения параметров шероховатости несколько выше, чем оптимальные (рис. 1). Это способствует уменьшению затрат на обработку при незначительном увеличении начального износа и времени приработки.

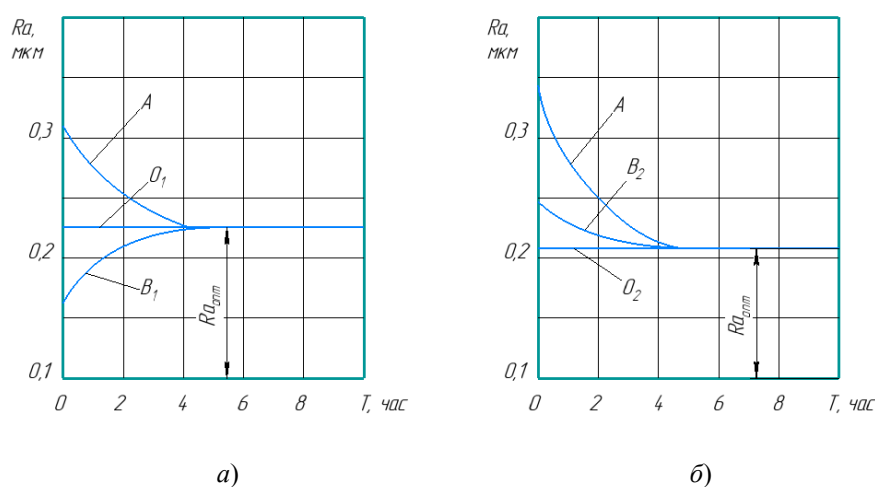


Рис. 1. Изменение шероховатости трущихся пар при различной исходной шероховатости:

$A$  – шероховатость больше оптимальной (отверстие);  
 $B_1$  – шероховатость меньше оптимальной (вал);  $B_2$  – шероховатость больше оптимальной (вал);  $O_1$  и  $O_2$  – оптимальная шероховатость

На рис. 1 показано изменение шероховатости поверхности в процессе приработки. Исходная технологическая шероховатость  $A_1$ ,  $B_1$  и  $B_2$  трансформируется в эксплуатационную  $O_1$  и  $O_2$ . Процесс приработки, в основе которого лежат сложные механические, физические и химические процессы, во многом определяет общую износостойкость деталей. К концу этого процесса основные эксплуатационные характеристики поверхности, в том числе шероховатость, приобретают оптимальные значения, соответствующие конкретным условиям работы. Такие характеристики поверхности в период нормального износа самоподдерживаются, т. е. воспроизводятся до начала ускоренного износа [6]. Экспериментальные исследования указанной работы показали, что грубые исходные поверхности прирабатываются быстрее, т. е. интенсивно уменьшают шероховатость в первые часы работы, а более гладкие поверхности – медленнее.

О существовании оптимума шероховатости поверхности, обеспечивающего минимальное изнашивание и максимальную долговечность деталей, свидетельствуют экспериментальные данные работы [6]. Исследовалось влияние микрогеометрии деталей подшипников качения на их долговечность. Снижение шероховатости поверхности желобов колец шарикоподшипников в пределах от  $Ra\ 0,32$  до  $Ra\ 0,04$  приводит к повышению долговечности подшипников почти в 2 раза. Оптимальная долговечность обеспе-



чивается при Ra 0,08. Дальнейшее уменьшение шероховатости почти не влияет на изменение долговечности. Долговечность роликоподшипников повышается более чем в 3 раза при уменьшении шероховатости деталей с Ra 0,63 до Ra 0,32. Однако после достижения шероховатости Ra 0,16 долговечность почти не возрастает.

По данным работы [6], если оптимальную для данных условий трения высоту микронеровностей получается создать в процессе механической обработки (технологическая шероховатость), то в процессе износа она не изменяется (эксплуатационная шероховатость). При этом время приработки и износ оказываются наименьшими. Величина установившейся эксплуатационной шероховатости будет соответствовать минимальным значениям силы трения. Принимая во внимание равновесную шероховатость, соответствующую минимальной величине сил трения и интенсивности изнашивания, можно создать такую шероховатость, при которой практически исключается приработка поверхностей на микроуровне. Обеспечение таких условий может в несколько раз повысить износостойкость и долговечность типовых узлов трения [3].

Таким образом, при выборе значений параметров шероховатости необходимо учитывать как технологический, так и эксплуатационный аспект обеспечения микрогеометрии поверхности. Это позволит существенно уменьшить период приработки узлов трения, повысить их долговечность и снизить затраты на изготовление прецизионных деталей машин.

#### Литература

1. Палей, М. А. Допуски и посадки : справочник / М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский. – СПб. : Политехника, 2011. – 530 с.
2. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Крагельский, И. В. Узлы трения машин : справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
4. Гжиров, Р. И. Краткий справочник конструктора : справочник / Р. И. Гжиров. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 464 с.
5. Блюменштейн, В. Ю. Научные основы технологии машиностроения / В. Ю. Блюменштейн. – Кемерово : КузГТУ, 2011.
6. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Наука, 1977. – 256 с.

## ИННОВАЦИИ В РАСЧЕТЕ ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА

Г. Г. Кудренко

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

Научный руководитель В. Б. Попов

Подъемно-навесное устройство (механизм навески) служит для присоединения к трактору навесных, полунавесных и прицепных сельскохозяйственных машин, регулировки рабочего положения, подъема в транспортное и опускание в рабочее положение навесных и полунавесных машин (рис. 1). При использовании трехточечной системы механизма навески к трем точкам – двум шарнирам нижних тяг и шарниру верхней тяги – обычно присоединяется автоматическая сцепка, которая затем сцепляется с замком на машине или непосредственно к шарнирам тяг механизма навески – для сельскохозяйственных машин, которые не оборудованы замком.

Данный вид навески имеет широкое применение среди сельскохозяйственных тракторов для агрегатирования с большинством почвообрабатывающих машин сплошной обработки почвы, с посевными, посадочными, некоторыми уборочными машинами.

Цель работы – проанализировать методы расчета усилий подъема плуга.

Расчет усилий обычно ведется путем графоаналитического анализа.

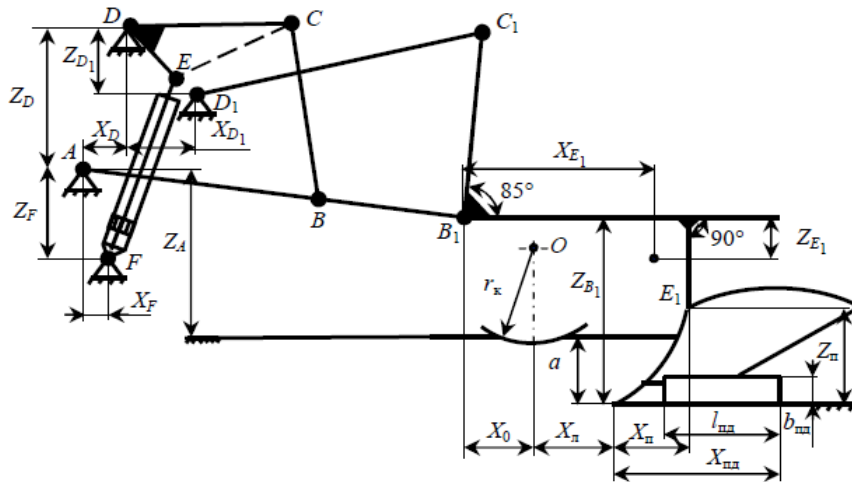


Рис. 1. Схема механизма навески плуга в рабочем положении с указанием размеров звеньев и координат точек

Расчет усилий производят по схеме навесной машины в рабочем положении (рис. 2).

Расчет усилий обычно производят при помощи моментов сил. Данный метод позволяет определять усилия в точках без использования углов, которые определяют расположение звеньев относительно друг друга [1].

Следовательно, данный метод менее точный, поскольку не учитывает углы между звеньями.

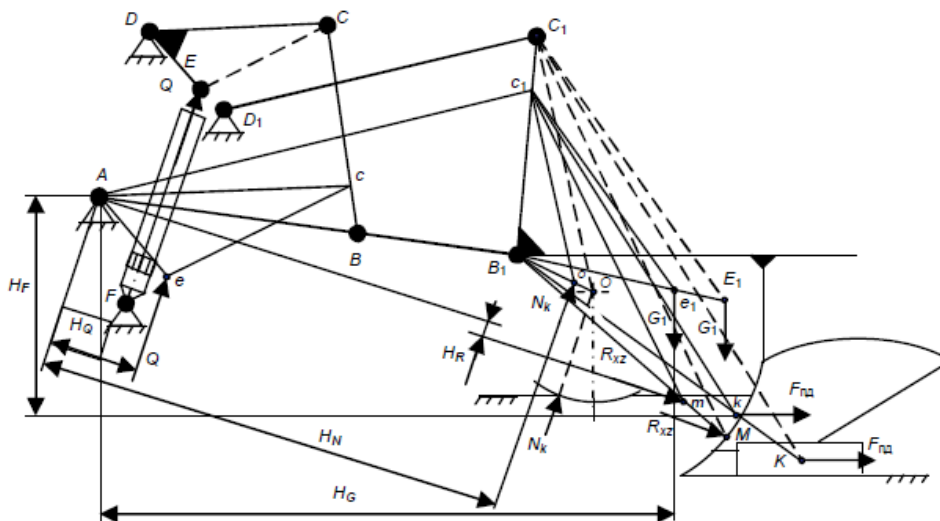


Рис. 2. Схема к определению усилия подъема навесного плуга (рабочее положение)

В графоаналитическом методе, который применяется в БГАТУ, используется схема расположения точек приложения сил в звеньях подъемно-навесного устройства [2].

Так, более современным подходом для расчета усилий является аналитический метод расчета, который основан на определении передаточных отношений, передаточных чисел, грузоподъемность и др.

Более точным является расчет усилий методом определения передаточных отношений между звеньями, так как данный способ учитывает не только расстояние между фиксированной точкой и точкой приложения усилия, но и отношения двух звеньев относительно друг друга [3]:

$$U_{BCDC}(S) = \frac{L_{DC} \cdot \sin(\psi 5(S) - \psi 34(S))}{L_{BC} \cdot \sin(\psi 4(S) - \psi 5(S))},$$

$$U_{AB_1DE}(S) = \frac{L_{DC} \cdot \sin(\psi 34(S) - \psi 4(S))}{L_{AB_1} \cdot \sin(\psi 5(S) - \psi 4(S))},$$

$$U_{AB_1B_1C_1}(S) = \frac{L_{BB_1} \cdot \sin(\psi 7(S) - \psi 5(S))}{L_{B_1C_1} \cdot \sin(\psi 6(S) - \psi 7(S))},$$

$$U_{D_1C_1B_1C_1}(S) = \frac{L_{BB_1} \cdot \sin(\psi 5(S) - \psi 6(S))}{L_{D_1C_1} \cdot \sin(\psi 7(S) - \psi 6(S))}.$$

Формулы определения передаточных чисел:

– на оси подвеса:  $Im(S) = \psi'5(S)L_{AB_1B_1C_1} \cdot \cos(\psi 5(S))$ .

– основное передаточное число:  $IS(S) = Im(S) + \psi'6(S) \cdot LS6 \cdot \cos(\psi 6(S) + \psi 6(S))$ .

Формулы определения грузоподъемности:

$$GS(S) = P_c \eta \frac{SS}{IS(S)}, \quad Gm(S) = P_c \eta \frac{SS}{Im(S)},$$

где  $P_c$  – давление в гидросистеме;  $\eta$  – КПД подъемно-навесного устройства;  $SS$  – площадь поршня гидроцилиндра со стороны нагнетающей магистрали:

$$SS = \pi D_c^2 \cdot 0,25,$$

где  $D_c$  – диаметр поршня.

Таким образом, расчет усилий аналитическим методом при помощи определения передаточных отношений, передаточных чисел и грузоподъемностей более оптимален и современен, поскольку позволяет наиболее точно определить усилия навесной машины.

#### Литература

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М. : Наука, 1988. – 590 с.

2. Машины и оборудование в растениеводстве: Практикум : учеб.-метод. пособие : в 3 ч. / В. П. Чеботарев [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2021. – Ч. 1. – 284 с.
3. 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.

## **ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ЦЕЛЯХ ПО МЕЖСОЛЕВОЙ ЗАЛЕЖИ НЕФТИ III БЛОКА БЕРЕЗИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**П. В. Асвинова**

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

Научный руководитель В. Д. Порошин

Березинское месторождение открыто в 1975 г. скважиной 3. В апреле 1977 г. оно введено в пробную эксплуатацию, а в мае 1981 г. – в промышленную разработку. По кровле межсолевых отложений Березинская структура представляет собой пликативную структуру, разбитую тектоническими нарушениями на ряд блоков, в I-м, II-м, III-м и IV-м которых открыты залежи нефти. Основные запасы нефти (более 80 %) приурочены к залежи третьего блока, связанной с засоленными карбонатными коллекторами. Залежь массивная, сводовая, тектонически-ограниченная. Она находится на четвертой стадии разработки, характеризующейся постепенным снижением добычи нефти при продолжающемся увеличении обводненности продукции. Пластовое давление в залежи третьего блока поддерживается посредством закачки в продуктивные пласты пресных вод.

Особенности засоления межсолевых отложений Березинской площади установлены В. Л. Тюменцевым и А. И. Коротаевым в результате детального исследования керна. Эти исследования свидетельствуют о том, что наиболее интенсивное засоление коллекторов отмечено вблизи разрывных нарушения и на ВНК [1]. Способность галита растворяться в пресных водах, которые закачиваются в продуктивные пласты для ППД, приводит к расширению объема фильтрационных каналов в процессе разработки залежи, увеличению пористости и проницаемости продуктивных пород [2]. Отмеченные особенности оказывают существенное влияние на характер разработки залежи и должны учитываться при создании и корректировке гидродинамической модели залежи и подготовке новых проектных документов дальнейшей ее разработки. Однако до настоящего времени мониторинг процесса рассоления и изменения объема сети фильтрационных каналов по данной залежи не проводился. Вместе с этим даже простое сравнение химического состава пластовых и попутных вод указывает на заметное снижение в последних – концентраций кальция и магния (результат разбавления пластовых рассолов закачиваемыми водами) и существенное увеличение концентраций натрия и калия (обогащение хлоридами натрия за счет растворения галита продуктивных пластов).

Проведенный анализ сложившегося состояния дел свидетельствует о том, что решение обозначенной выше и ряда других нефтепромысловых задач может проводиться на основе гидрохимических методов контроля эксплуатации нефтяных месторождений, разработанных в последние годы в ГГТУ им. П.О. Сухого [3], [4].

Анализ особенностей изменения химического состава попутных вод проводился нами путем построения графиков изменения их плотности в процессе эксплуатации всех добывающих скважин. Рассматривая эти графики (рис. 1) отмечено, что для

каждой из скважин характерен свой характер изменения данного показателя. Как правило, закономерное колебание плотности попутно добываемых с нефтью вод связано с особенностями эксплуатации скважин и разработки данного участка залежи. Обработка и интерпретация химических анализов попутных вод, согласующихся по плотности, предложено вести по методике Галит-1 [3]. Однако на этих графиках выделяются и выпадающие точки, связанные с влиянием технологических обработок скважин путем подлива в них пресных вод, что нужно учитывать при обработке гидрхимических данных по разработанной С. Л. Порошиной методике Галит-1т [4].

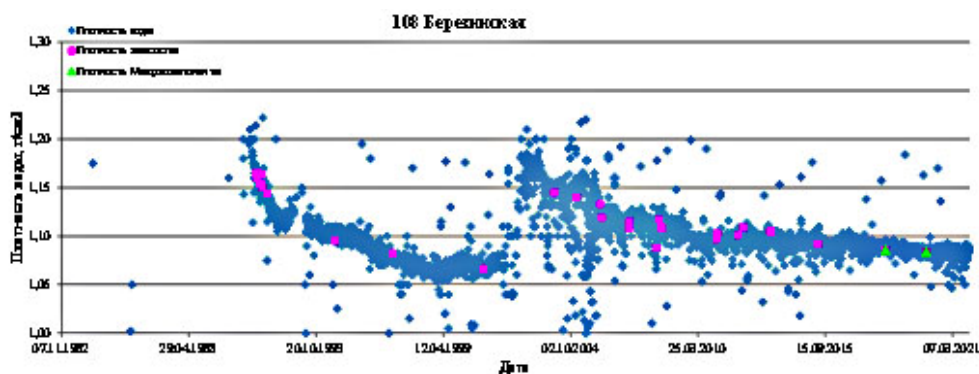


Рис. 1. График изменения плотностей попутных вод скважины 108 Березинского месторождения в процессе ее эксплуатации

Результаты расчетов по указанным методикам позволили оценить доленое участие пластовых рассолов и закачиваемых вод в попутно добываемых с нефтью водах, а также избыточное содержание в них хлорида натрия, сформированное за счет рассоления коллекторов, что важно знать при анализе и контроле разработки залежи. Обработка этих данных позволяет говорить о растущей роли закачиваемых вод в поддержании энергетики залежи (снижение средней величины 1-X) и снижении влияния законтурной области (рис. 2). Широкий разброс точек на приводимом графике, казалось бы, свидетельствует только об отмечаемой тенденции этих изменений, однако более детальный анализ говорит о том, что установленный характер изменений присущ подавляющему большинству скважин.

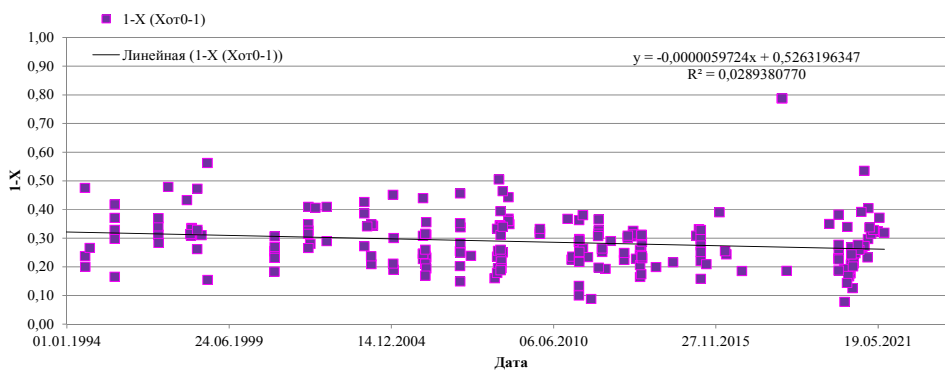


Рис. 2. Изменение величины долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах Березинского месторождения

Общую картину долевого участия пластовых рассолов и закачиваемых вод в системе поддержания пластового давления в залежи и вытеснении нефти к забоям добывающих скважин можно получить из схематической карты долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах (рис. 3). Анализируя представленную карту, следует отметить, что наибольшее влияние законтурной области на энергетику продуктивных пластов и вытеснение нефти к забоям добывающих скважин отмечается в центральной части залежи. На остальной ее части вытеснении нефти практически полностью осуществляется закачиваемыми в продуктивные пласты пресными водами, что должно учитываться при построении и корректировке существующей гидродинамической модели рассматриваемой залежи нефти.

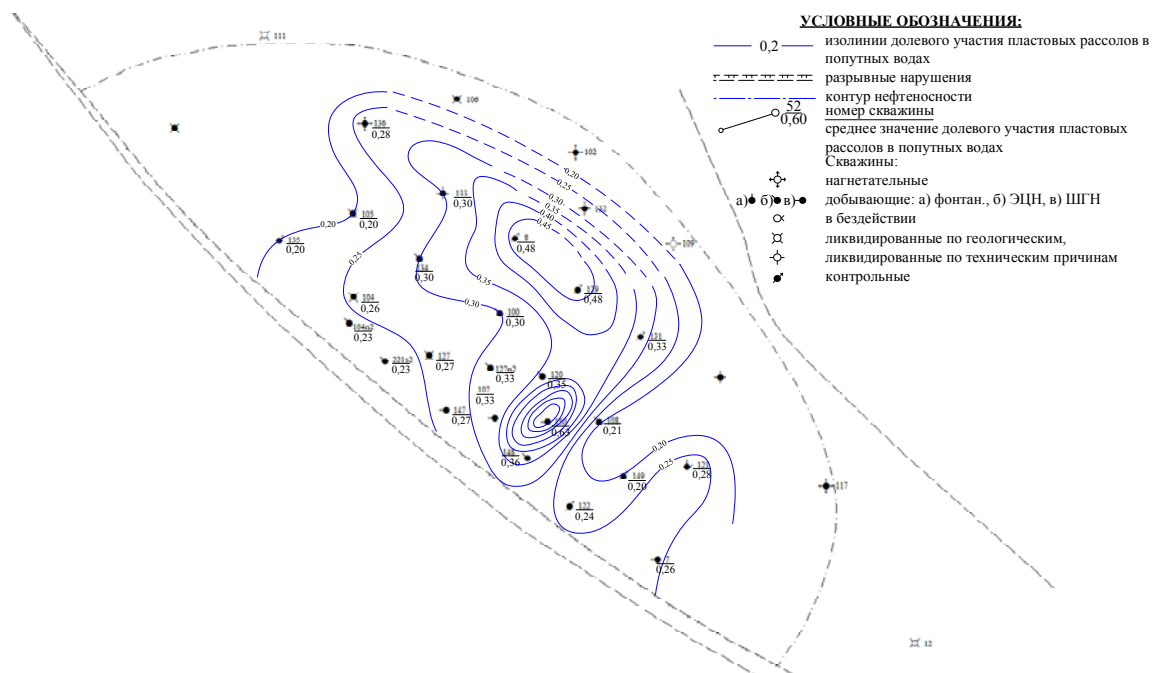


Рис. 3. Залежь III блока Березинского месторождения. Схематическая карта долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах (составила С. Л. Порошина)

Полученные результаты наших исследований позволяют говорить о целесообразности уточнения существующих представлений об истории и текущему состоянию разработки нефтяной залежи III блока Березинского месторождения по материалам детальных гидрохимических исследований. Отдельные, наиболее важные выводы проведенных гидрохимических исследований по анализу разработки рассмотренной залежи, могут быть использованы для корректировки существующей гидродинамической модели этой залежи и при подготовке нового проектного документа дальнейшей ее разработки.

#### Литература

1. Порошин, В. Д. Методы обработки и интерпретации гидрохимических данных при контроле разработки нефтяных месторождений / В. Д. Порошин, В. В. Муляк. – М. : Недра, 2004. – 220 с.
2. Тюменцев, В. Л. Особенности засоления межсоловых отложений Березинской площади / В. Л. Тюменцев, А. И. Каротаев // Докл. АН БССР. – 1980. – Т. XXIV, № 9. – С. 480–483.

3. Порошина, С. Л. Новые подходы к оценке масштабов рассоления коллекторов нефтяных месторождений Беларуси по промысловым гидрохимическим данным / С. Л. Порошина // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 4. – С. 3–12.
4. Порошина, С. Л. К вопросу представительности данных о химическом составе попутных вод нефтяных месторождений Беларуси и методических приемах их обработки (интерпретации) / С. Л. Порошина // Літасфера. – 2021. – № 1 (54). – С. 58–70.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ЧПУ

Е. С. Глазенкова

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Процесс фрезерования всегда сопровождается вибрациями, которые передаются на шпиндельный узел. Точность обработки и качество обработанной поверхности зависит от виброустойчивости шпиндельного узла. Исследованию вибраций при фрезеровании посвящено большое количество работ [1], [2].

Цель работы – анализ виброустойчивости шпиндельного узла станка с ЧПУ.

Исследования выполнялись на примере шпиндельного узла консольного вертикально-фрезерного станка ГФ2171 (рис. 1).

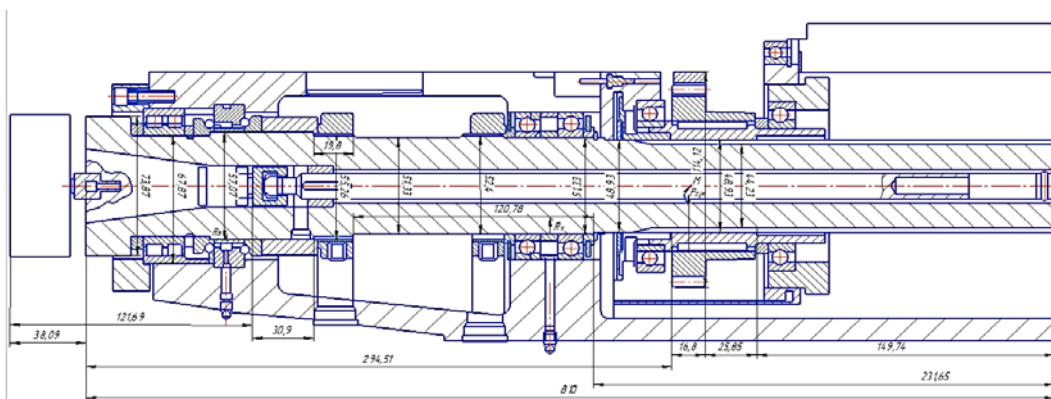


Рис. 1. Шпиндельный узел

Расчет режимов резания производился по методике [3].

Исходные данные: режущий инструмент – торцевая фреза диаметром 125 мм, с числом зубьев – 12, материал обрабатываемой заготовки – ст. 45, подача на зуб – 0,3, глубина резания –  $t = 3$ .

Окружная сила при фрезеровании:  $P_z = 11253$  Н;  $P_y = 7502$  Н.

Суммарное усилие резания:  $P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} = \sqrt{11253,65^2 + 7502,43^2} = 15105,42$  Н.

Усилие в зацеплении зубчатых колес: тангенциальная сила  $P_t = 195$  Н; радиальная сила  $P_r = 71$  Н; суммарная сила в зацеплении  $R = \sqrt{P_t^2 + P_r^2} = \sqrt{195,38^2 + 70,97^2} = 207,56$  Н.

Для определения критической частоты вращения шпинделя  $\omega_{кр}$  необходимо знать перемещение каждой его точки. Для этого составляем дифференциальное уравнение упругой линии полученной балки:

$$\begin{aligned} \frac{1}{EJ_0} \frac{d^2y}{dx^2} = & P_{yz}x + Q_1(K-1)(x-a) - M_1(K_1-1)(x-a)^0 - R_{\epsilon}^A K_1(x-b) + \\ & + R_{\epsilon}^B K_2(x-c) - Q_2(K_1-K_2)(x-d) + M_2(K_1-K_2)(x-d)^0 - \\ & - Q_3(K_2-K_3)(x-f) + M_3(K_2-K_3)(x-f)^0 - P_{\epsilon} K_3(x-h) - \\ & - Q_4(K_3-K_4)(x-1) + M_4(K_3-K_4)(x-1)^0. \end{aligned}$$

Выбираем радиально-упорный подшипник на передней опоре 1036918:  $d = 90$  мм;  $D = 125$  мм;  $b = 18$  мм;  $T = 18$ ;  $r = 2$ ;  $r_1 = 1$  мм;  $r_{s\min} = 1,1$  мм;  $r_{i\min} = 0,6$  мм;  $m = 0,599$  кг.

Два роликовых радиальных подшипников 1032920 – на задней опоре по ГОСТ 8328–75:  $d = 100$  мм;  $D = 140$  мм;  $B = 20$  мм. Определив коэффициенты жесткости опор, формировали окончательное выражение для уравнения перемещений.

Подставив в полученное уравнение численные координаты участков шпиндельного узла, рассчитывали перемещения и углы поворота (рис. 2, 3).

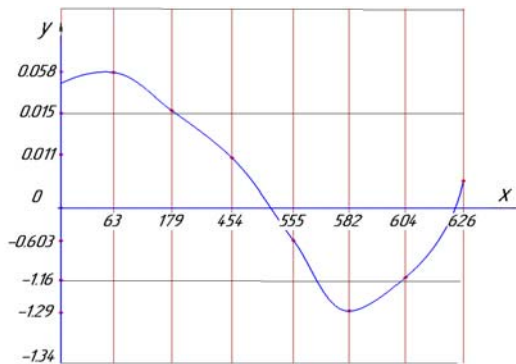


Рис. 2. График перемещения шпинделя

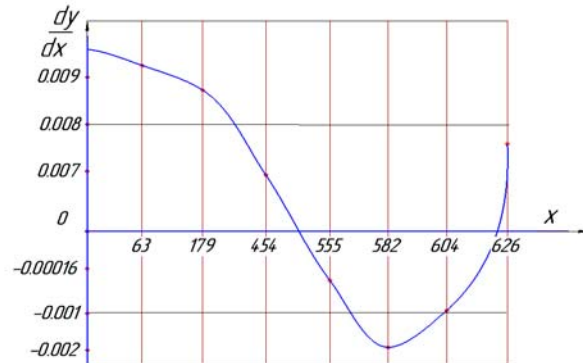


Рис. 3. График углов поворота шпинделя

Виброустойчивость оценивали по критической частоте вращения:

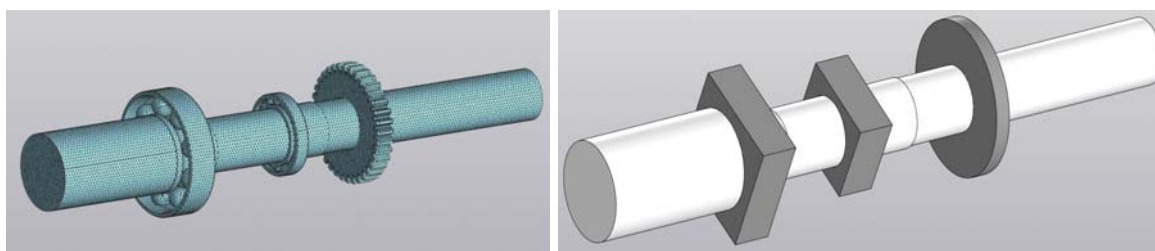
$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g \sum m_i y_i}{\sum m_1 y_i^2}} = 79,44 \text{ с}^{-1},$$

где  $m_i$ ,  $y_i$  – соответственно массы и перемещения участков шпинделя.

Для рассматриваемого шпинделя критическая частота  $n_{кр} = \frac{\omega_{кр} \cdot 30}{\pi} = 2006$  об/мин.

Для более детального определения напряженно-деформированного состояния была построена 3D-модель узла (рис. 4).



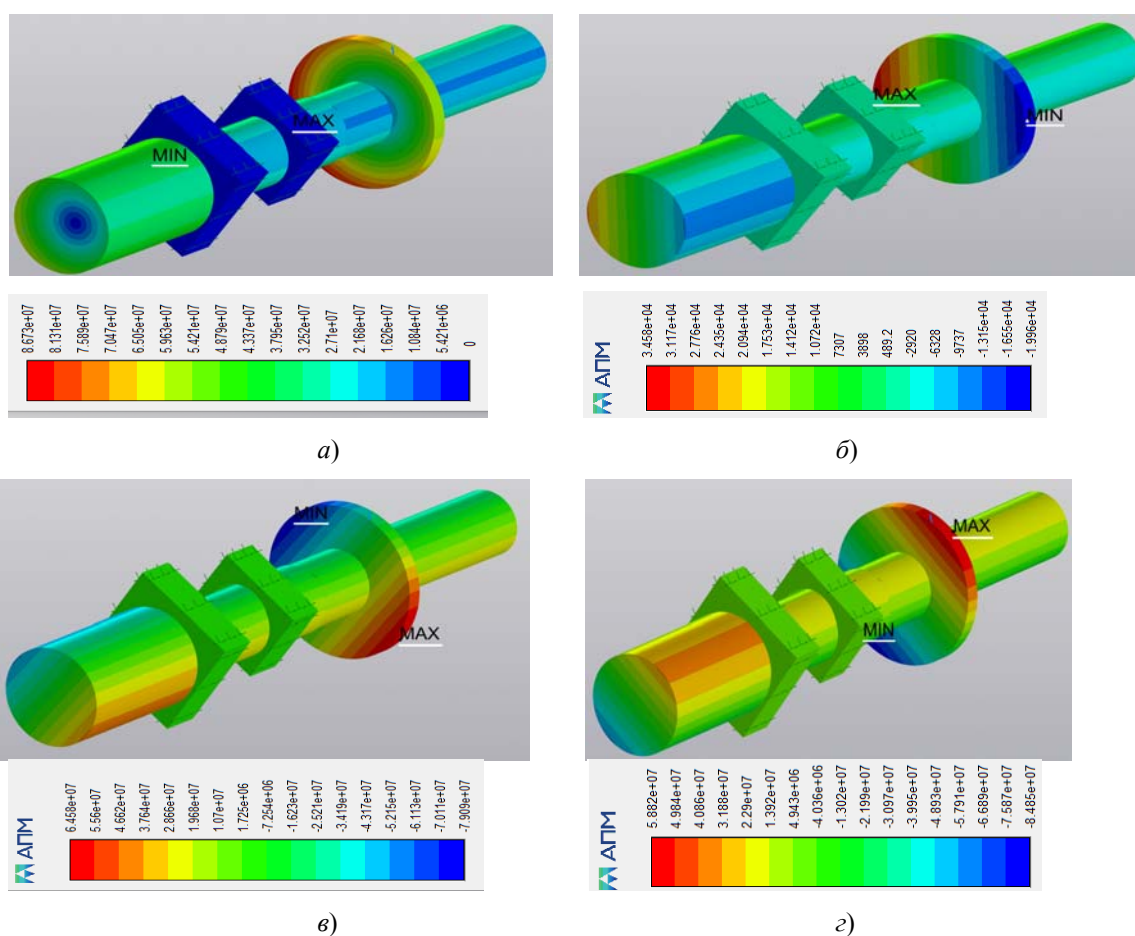


а)

б)

Рис. 4. 3D-модель шпиндельного узла (а) и ее упрощенный вариант (б)

Результаты расчетов приведены на рис. 5.



а)

б)

в)

г)

Рис. 5. Картины распределений перемещений в шпиндельном узле:  
а – эквивалентные; б – по оси  $OX$ ; в – по оси  $OY$ ; г – по оси  $OZ$

Полученные результаты позволяют установить оптимальные режимы резания и использовать их при конструировании шпиндельных узлов.

#### Литература

1. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плещачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с. : ил.

- Новиков, О. А. Достижение заданной точности торцового фрезерования с максимальной производительностью : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / О. А. Новиков ; Ин-т нефтехим. и газовой пром-сти. – М., 1982. – 24 с.
- Хаец, Г. Л. Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хаец. – М. : Машиностроение, 1989. – 89 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ БАЗИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ БЛОКОВ НА ИХ СТАТИЧЕСКУЮ И ДИНАМИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ

В. С. Акулич

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Процесс резания всегда сопровождается вибрациями, которые передаются на инструментальный блок. Точность обработки и качество обработанной поверхности зависит от виброустойчивости инструментального блока. Исследованию статической и динамической точности при растачивании посвящено большое количество работ [1], [2].

Цель работы – установление влияния условий базирования инструментальных блоков на их статическую и динамическую точность.

Статический расчет и расчет собственных частот различных конструктивных вариантов базирования оправок на станках ЧПУ выполнялся на виртуальных моделях.

В качестве модели для расчетов будет использована оправка расточного резца, закрепленная в шпинделе.

Первым конструктивным вариантом является базирование оправки в шпинделе станка без применения дополнительных элементов.

Вторым конструктивным вариантом является дополнительное базирование торца оправки на полимерную прокладку на основе эпоксидной смолы. Третьим конструктивным вариантом является дополнительное базирование торца оправки на пакеты тарельчатых пружин.

Все расчеты произведены в программе Компас-3D v20 с применением приложения АРМ FEM.

Таблица 1

**Результаты расчета первого и второго вариантов**

Показатели	Первый вариант	Второй вариант
Эквивалентное перемещение	<p>0.08519 0.08824 0.08329 0.07734 0.0714 0.06545 0.0595 0.05355 0.0476 0.04165 0.0357 0.02975 0.0238 0.01785 0.0119 0.00595 0</p>	<p>0.09424 0.08973 0.08522 0.08071 0.762 0.7169 0.6718 0.6267 0.5816 0.5365 0.4912 0.4459 0.4008 0.3557 0.3106 0.2655 0.2204 0.1753 0.1302 0.0851 0.0401 0</p>

Окончание табл. 1

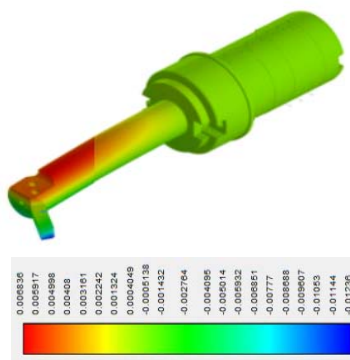
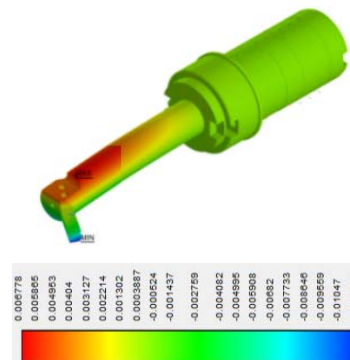
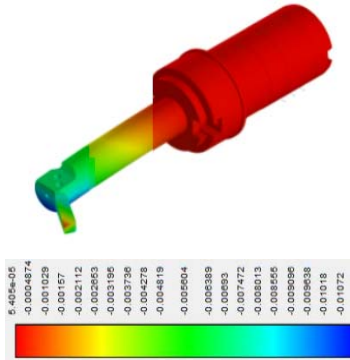
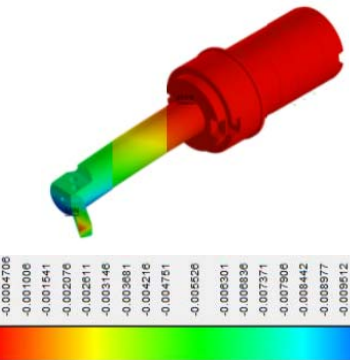
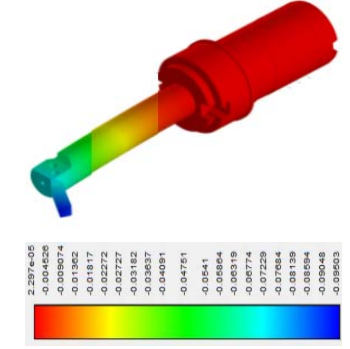
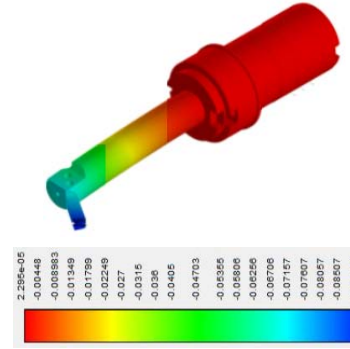
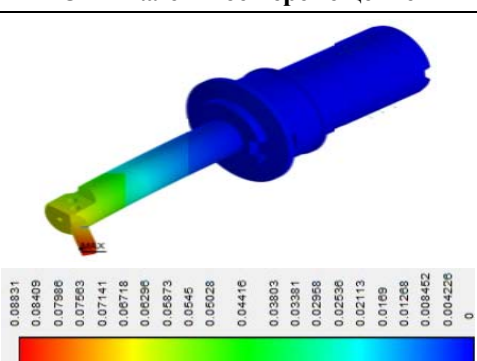
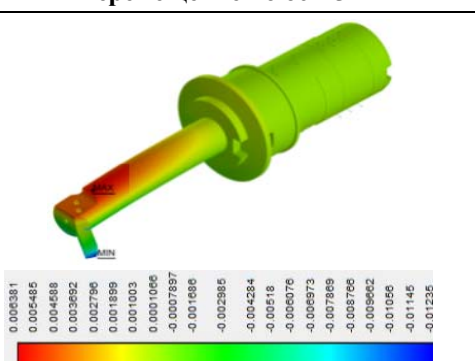
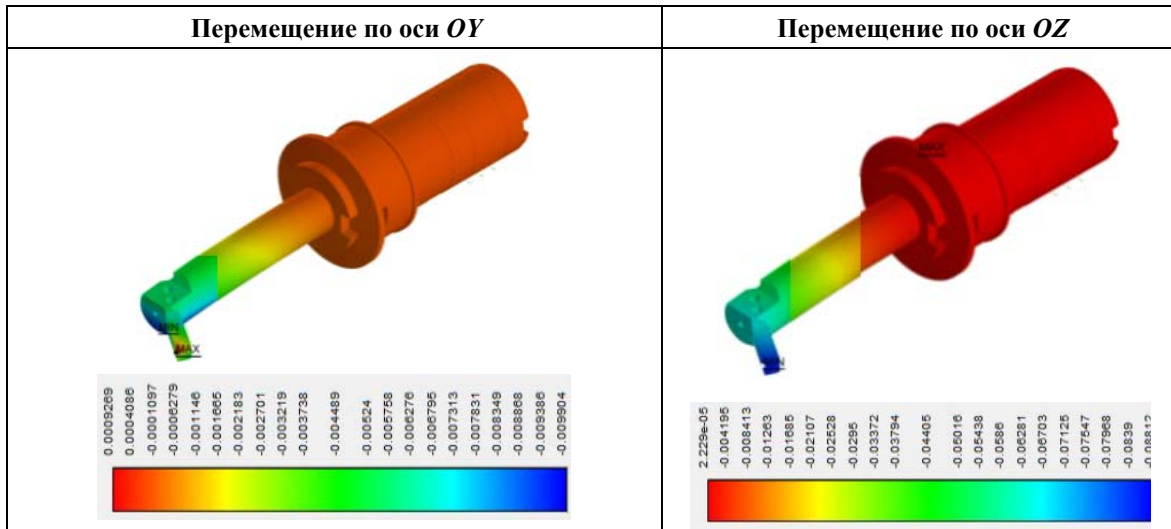
Показатели	Первый вариант	Второй вариант
Перемещение по оси $Ox$		
Перемещение по оси $Oy$		
Перемещение по оси $Oz$		

Таблица 2

Результаты расчета третьего варианта

Эквивалентное перемещение	Перемещение по оси $Ox$
	



Анализ результатов расчетов (табл. 2, 3) позволяет заключить, что эквивалентные перемещения во втором конструктивном варианте на 1 мкм меньше, чем в первом. Перемещения в вершины расточного резца третьего варианта относительно перемещений первого варианта, уменьшились на 7 мкм.

В результате расчета было определено, что суммарные перемещения уменьшились относительно первого варианта на 1 % для второго варианта и на 7,23 % для третьего варианта, также собственные частоты колебаний увеличились относительно первого варианта на 0,85 % для второго варианта и на 6 % для третьего варианта. Таким образом, оптимальным будет являться третий конструктивный вариант.

#### Литература

1. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.
2. Маслов, А. Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента / А. Ф. Маслов. – М. : ИТО, 2006. – 169 с.
3. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.

### ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ВИНТОВЫХ ЗУБЬЕВ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ НА ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Е. С. Глазенкова

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Концевые фрезы являются широко используемыми в машиностроении металлорежущими инструментами, предназначенными для обработки уступов, пазов и плоскостей небольшой ширины на вертикально-фрезерных станках.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) определяет прочность и надежность режущих инструментов [1]–[4]. Таким образом, исследование влияния

геометрии концевых фрез на их НДС при резании стали является актуальным. Кроме этого форма и геометрические параметры концевых фрез влияют на их стойкость, качество обработанной поверхности и эффективность производства [3]–[7].

Цель исследования заключается в определении влияния параметров концевых фрез на их напряженно-деформированное состояние.

Для проведения исследований были разработаны 3D-модели концевых фрез с исходными данными:  $d = 20$  мм с шагом винтовых канавок 60 и углом наклона режущей кромки  $46,29^\circ$ ;  $d = 30$  мм с шагом 65 и углом наклона режущей кромки  $55,39^\circ$ ;  $d = 40$  мм с шагом 70 и углом наклона режущей кромки  $60,87^\circ$ .

Для определения напряжений и перемещений использовалась программа «Компас 3D».

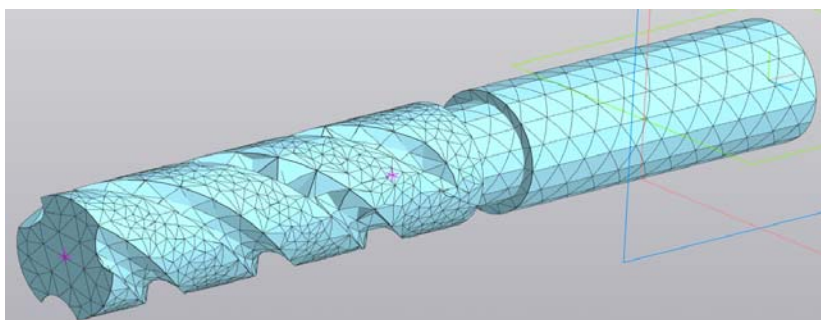


Рис. 1. Конечно-элементная сетка

Таблица 1

### Результаты расчетов внутренних напряжений

Исходные данные	Эквивалентное напряжение	Напряжение по оси $OX$	Напряжение по оси $OY$	Напряжение по оси $OZ$
$d = 20$				
	MAX MIN 184,4 90,48 86,78 10,19 71,25 61,26 49,4 42,1 38,7 34,8 30,9 27,04 23,18 19,32 15,46 11,6 7,74 3,88 0,02	MAX MIN 36,93 29,86 23,79 17,73 11,67 5,61 0,4776 -6,545 -12,61 -18,68 -24,75 -30,82 -36,89 -42,96 -49,02 -55,09 -61,16 -67,23	MAX MIN 64,488 48,366 32,244 16,122 0,000 -16,122 -32,244 -48,366 -64,488	MAX MIN 50,31 45 39,69 34,38 29,07 23,76 18,45 13,14 7,83 2,52 -2,79 -8,1 -13,41 -18,72 -24,03 -29,34 -34,65
$d = 30$				
	MAX MIN 367,1 300,5 233,9 167,3 100,7 34,1 -32,5 -99,1 -165,7 -232,3 -298,9 -365,5 -432,1 -498,7 -565,3 -631,9 -698,5 -765,1 -831,7	MAX MIN 392,3 321,6 251,0 180,4 109,7 39,1 -39,4 -108,8 -178,2 -247,6 -317,0 -386,4 -455,8 -525,2 -594,6 -664,0 -733,4 -802,8 -872,2	MAX MIN 91,2 80,43 69,66 58,89 48,12 37,35 26,58 15,81 5,04 -3,73 -12,5 -21,27 -30,04 -38,81 -47,58 -56,35 -65,12 -73,89 -82,66	MAX MIN 102,1 90,38 77,84 65,3 52,76 40,22 27,68 15,14 2,6 -10,14 -20,88 -31,62 -42,36 -53,1 -63,84 -74,58 -85,32 -96,06 -106,8

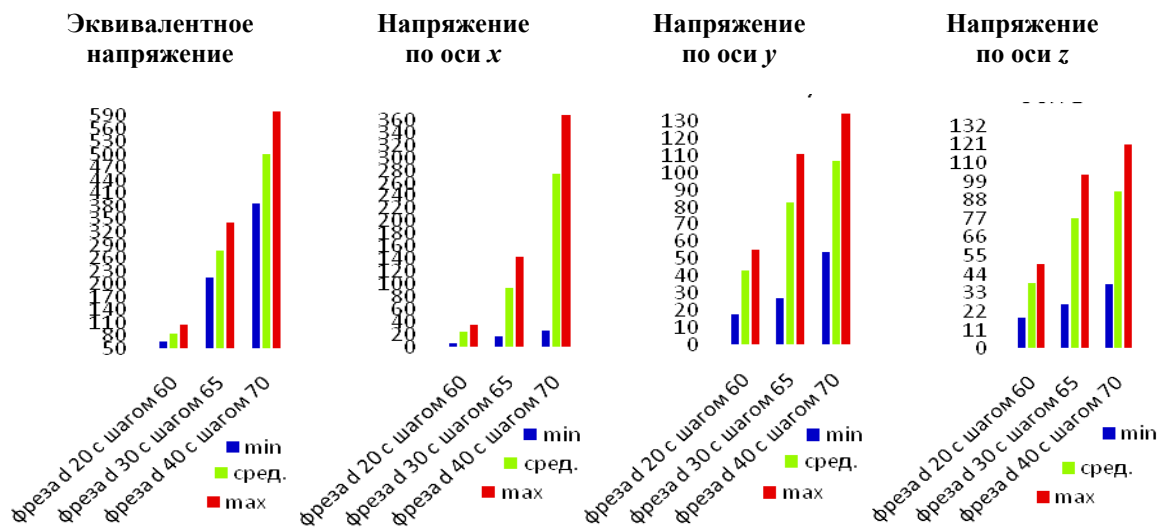


Рис. 2. Диаграммы влияния параметров фрез на внутренние напряжения

Анализ табл. 1 и рис. 2 позволяет заключить, что с увеличением угла наклона зубьев фрезы в отношении 1 : 1,19 : 1,3, максимальные значения эквивалентных напряжений увеличились соответственно в соотношении 1 : 3,18 : 5,36, а напряжения по оси  $OX$  – 1 : 3,5 : 8,6, по оси  $OY$  – 1 : 2,2 : 2,6, по оси  $OZ$  – 1 : 2,25 : 2,75.

Таблица 2

### Результаты расчетов перемещений

Исходные данные	Эквивалентное перемещение	Перемещение по оси $OX$	Перемещение по оси $OY$	Перемещение по оси $OZ$
$d = 20$				
$d = 30$				

Анализ табл. 2 и рис. 3 позволяет заключить, что с увеличением угла наклона зубьев фрезы в отношении 1 : 1,19 : 1,3, максимальные значения эквивалентных перемещений уменьшились соответственно в соотношении 1:1,42:8,5, а перемещения по оси  $OX$  – 1 : 1,34 : 1,67, по оси  $OY$  – 1 : 5,2 : 9,6, по оси  $OZ$  – 1 : 1,25 : 2,05.

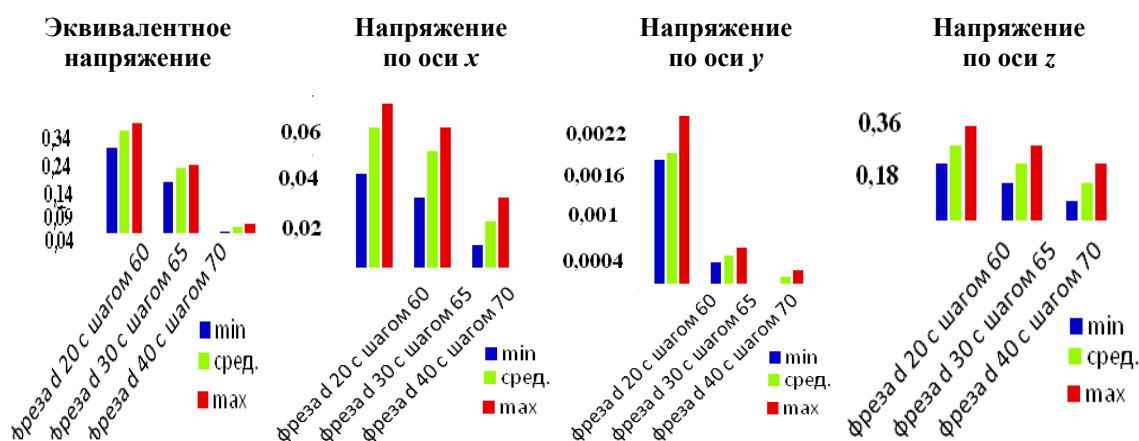


Рис. 3. Диаграммы влияния параметров фрез на перемещения

Таким образом, установлено влияние параметров концевых фрез на напряженно-деформированное состояние, которое необходимо учитывать при проектировании инструмента.

#### Литература

1. Хаев, Г. Л. Прочность режущего инструмента / Г. Л. Хаев. – М. : Машиностроение, 1975. – 164 с.
2. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плещачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.
3. Маслов, А. Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента / А. Ф. Маслов. – М. : ИТО, 2006. – 169 с.
4. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
5. Новые инструменты – дополнение к каталогам 12.2. – Sandvik Coromant 2012. – С. E1–E85.
6. Сандвик – 2010. Руководство по металлообработке. Sandvic Coromant, 2010.
7. Гречишников, В. А. Исследование деформированного состояния сборного режущего элемента методом конечных элементов / В. А. Гречишников, С. В. Лукина, А. И. Веселов // Конструкторско-технологическая информатика 2000 : материалы IV Междунар. конгр., Москва, 2000 г. / Моск. гос. технол. ун-т. – М., 2000. – Т. 1. – С. 158–160.

## ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА RA 605

М. В. Анопреенко

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Использование роботов на ряде машиностроительных предприятий сдерживается до конца не решенным вопросом о точности позиционирования захватных устройств, которая во многом определяется кинематической точностью промышленного робота, в частности, ошибками основного его модуля – руки с захватным устройством. Вследствие этого представляется целесообразным вначале рассмотреть вопрос об определении линейных и угловых погрешностей захватных устройств промышленных роботов [1].

Погрешности чаще всего возникают за счет ошибок обработки приводами манипулятора программных значений обобщенных координат, соответствующих заданному положению захватного устройства. При этом под программными значениями обобщенных координат манипулятора обычно понимают их значения, найденные для заданного положения захватного устройства [2]. Эти значения могут быть определены путем решения обратных задач о положениях манипулятора при анализе кинематики рабочих органов промышленного робота.

Пусть действительные значения обобщенных координат манипулятора робота отличаются от программных на величину  $\Delta q_i$ . Если с захватным устройством связать систему координат, то ее заданное (программное) положение  $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$  будет отличаться от действительного ее положения  $O_{\text{д}}X_{\text{д}}Y_{\text{д}}Z_{\text{д}}$  на величину  $\Delta r$  (рис. 1).

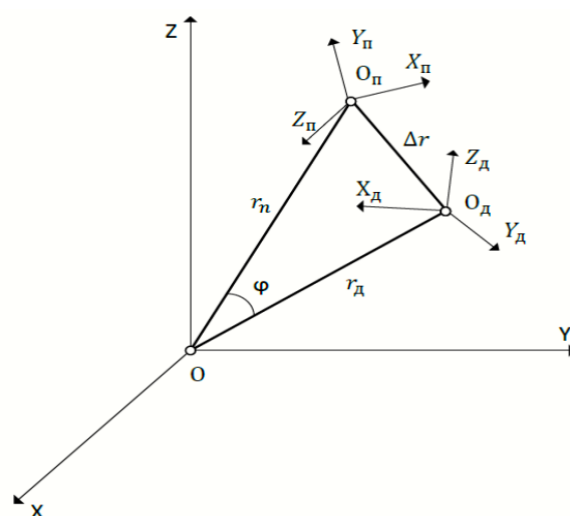


Рис. 1. Схема связей систем координат положения захватного устройства для определения ошибки позиционирования робота

Величину  $\Delta r = r_{\text{д}} - r_{\Pi}$  называют линейной ошибкой манипулятора, а угол поворота  $\varphi$ , на который следует повернуть систему  $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ , чтобы сделать ее оси параллельными соответствующим осям системы  $O_{\text{д}}X_{\text{д}}Y_{\text{д}}Z_{\text{д}}$ , называют угловой ошибкой положения манипулятора. Такой поворот всегда возможен на основе известной теоремы Эйлера–Даламбера [3]. Радиус-вектор  $r$  произвольной точки захватного устройства промышленного робота можно записать в виде:

$$r = r(q_i), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $n$  – число степеней подвижности манипулятора.

Продифференцировав выражение (1) по обобщенным координатам  $q_i$ , получаем функцию:

$$dr = \sum_{i=1}^n \frac{\partial r}{\partial q_i} dq_i. \quad (2)$$



Если заменить дифференциалы в функции (2) конечными приращениями, то можно найти линейную ошибку манипулятора  $\Delta r$ :

$$\Delta r = \sum_{i=1}^n \frac{\partial r}{\partial q_i} \Delta q_i, \quad (3)$$

где  $\Delta q_i$  – ошибки обобщенных координат.

Угловая ошибка положения твердого тела может быть определена матрицей ошибок [3], представляющей собой матрицу перехода от системы  $O_D X_D Y_D Z_D$  к системе  $O_{II} X_{II} Y_{II} Z_{II}$  посредством поворота на три угла Эйлера, которые считаются малыми. Так как такая матрица содержит значения трех углов Эйлера, то она не позволяет выразить угловую ошибку одной величиной. Вследствие этого необходимо найти векторную формулу для угловой ошибки захватного устройства манипулятора промышленного робота. Пусть линейная и угловая ошибки захватного устройства малы. Тогда на основании известного правила сложения малых поворотов твердого тела [3] можно записать выражение

$$\Delta \varphi = \sum_{i=1}^s \Delta q_i = \sum_{j=1}^p \Delta q_j e_j, \quad (4)$$

где  $\Delta q_j$  – ошибки обобщенной координаты во вращательной пары  $j$ ;  $e_j$  – орт оси шарнира  $j$ ; индекс  $j$  принимает значения номеров вращательных пар.

Формула (4) позволяет одной величиной  $\Delta \varphi$  определять угловую ошибку захватного устройства манипулятора. Так как векторы  $\Delta q_j$  и  $e_j$  заданы в системе звена  $j$ , то формуле (4) можно придать следующую форму:

$$\Delta \varphi = \sum_{j=1}^p L_{ij} \Delta q_i e_j, \quad (5)$$

где  $L_{ij}$  – матрица поворота третьего порядка, совмещающая по повороту систему  $OXYZ$  с системой  $O_j X_j Y_j Z_j$  звена  $j$ .

Цель работы – экспериментальное исследование точности позиционирования промышленного робота RA 605.

В ходе исследования точности позиционирования промышленного робота были проведены измерения (рис. 2). Полученные результаты измерений обрабатывались по стандартной методике [4]. По этой методике получили среднее значение, гистограмму распределения, полигон, дисперсию для каждого параметра.

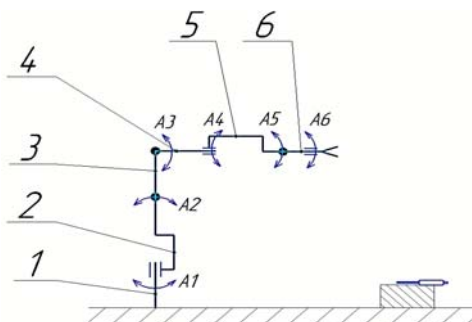
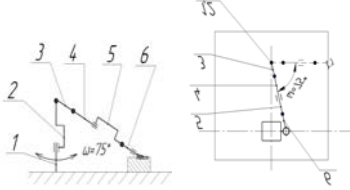
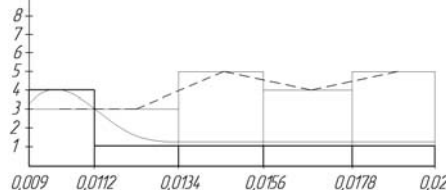
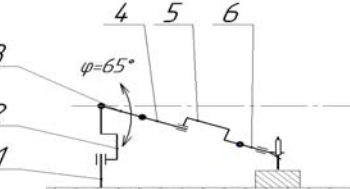
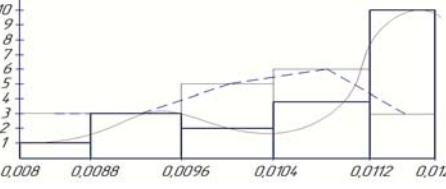
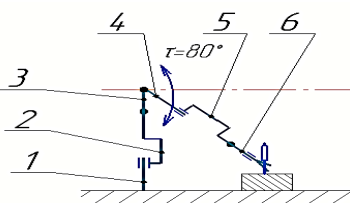
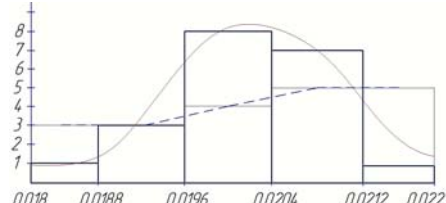
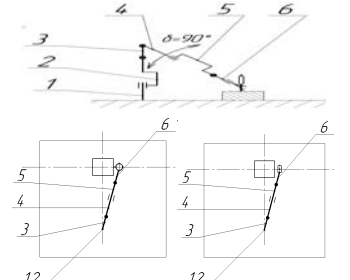
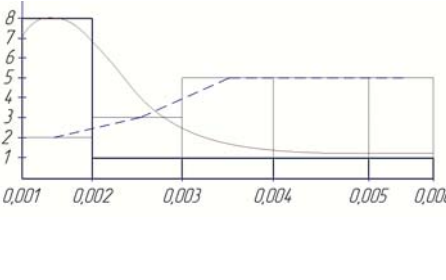
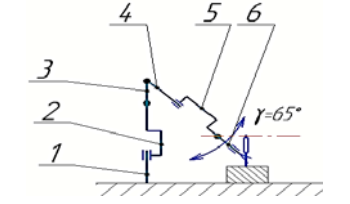
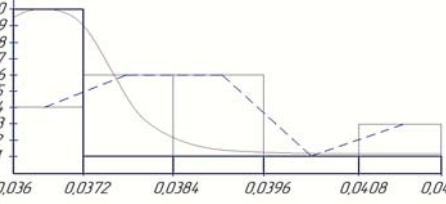
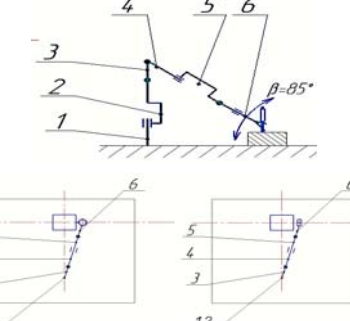
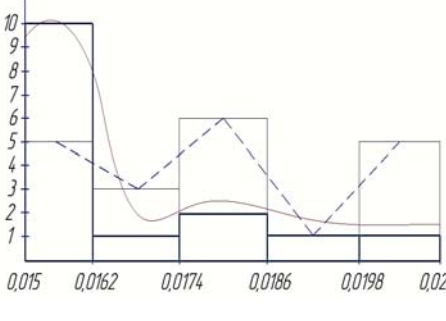


Рис. 2. Исходное положение робота:  
1–6 – номер сочленения; A1–A6 – обобщенные координаты

Схемы измерений и результаты представлены в таблице.

### Результаты измерений

Номер сочленения	Среднее значение	Схема измерения	Полученный результат
1	0,027		
2	0,1015		
3	0,2024		
4	0,039		
5	0,034		
6	0,1788		

## Литература

1. Воробьев, Е. И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа / Е. И. Воробьев, Ю. Г. Козырев, В. И. Царенко. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : Физматгиз, 1971. – 632 с.
3. Гернет, М. М. Курс теоретической механики : учеб. для вузов / М. М. Гернет. – М. : Высш. шк., 1987. – 344 с.
4. Михайлов, М. И. Основы научных исследований и инновационной деятельности / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 399.

**РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ В УСЛОВИЯХ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА****А. В. Шевченко***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. И. Михайлов

В настоящее время на производстве широко применяются робототехнические комплексы (РТК), содержащие многостепенные манипуляторы (ММ). В производственном процессе такие комплексы способны выполнять основные и вспомогательные технологические операции. К основным технологическим операциям относятся операции непосредственного выполнения формообразования, изменения линейных размеров заготовки и др. К вспомогательным технологическим операциям относятся транспортные операции, в том числе операции по загрузке и выгрузке технологического оборудования.

Среди самых распространенных действий, выполняемых промышленными роботами, можно назвать следующие: загрузка, разгрузка, манипулирование деталями (укладка, сортировка, ориентация), перемещение, сварка швов, точечная сварка, покраска и выполнение операций резания, шлифовки с движением по сложной траектории.

Совершая такие операции, при помощи ММ можно исключить влияние человеческого фактора на конвейерных производствах, а также при проведении монотонных работ, требующих высокой точности. При использовании роботов происходит интенсификация рабочего процесса, повышение производительности труда, стабилизация ее в течение смены, увеличение коэффициента сменности основного технологического оборудования, что улучшает технико-экономические показатели производства. Повышается качество продукции. Снижаются потери от брака, связанного с ошибками оператора. Возможна также экономия материалов. С применением роботов создаются принципиально новые производства и технологические процессы, максимально уменьшающие неблагоприятные воздействия на человека.

Для качественного выполнения данных операций необходимо точно управлять ММ, т. е. контролировать отклонение от заданной траектории и поддерживать заданную скорость, чтобы они находились в заданных пределах. В большинстве случаев желательно двигаться по гладким траекториям, которые можно сформировать различными способами, с заданной скоростью [1], [2].

Цель работы – решение обратной задачи кинематики для траектории робота с учетом особенностей РТК.

Был сформирован РТК для обработки дисковых деталей. В него входили робот, токарный станок с ЧПУ, фрезерный станок с ЧПУ и накопители заготовок и деталей (рис. 1).

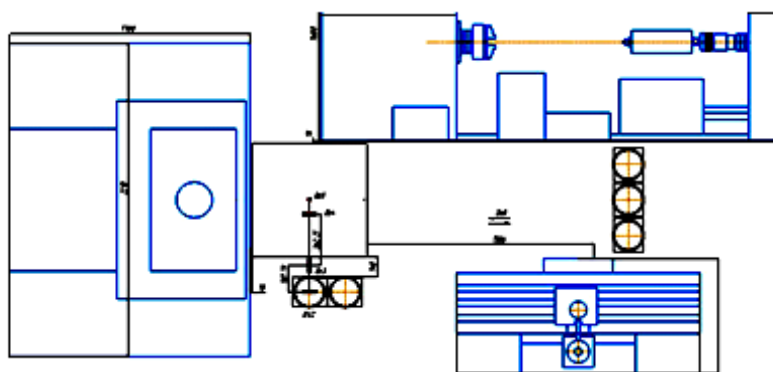


Рис. 1. Планировка робототехнического комплекса

Для построения траекторий были разработаны схемы предельных положений схвата робота (рис. 2).

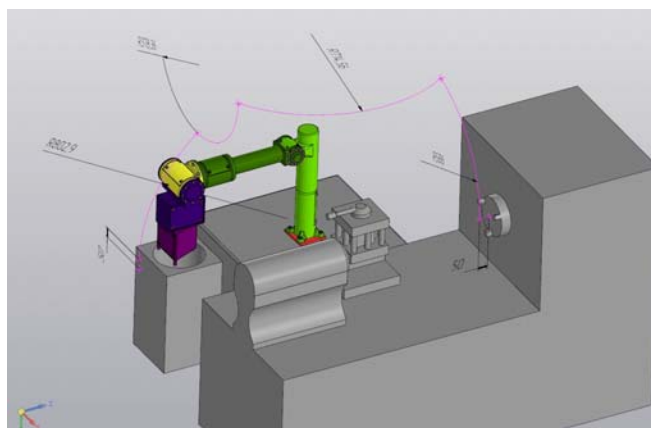


Рис. 2. Траектория движений схвата робота

По известным координатам расположения схвата робота относительно системы координат, а также углам расположения схвата относительно базовой системы координат определяли значения параметров, характеризующих обобщенные координаты.

В разработанном РТК мобильный робот выполняет функцию рабочего, а именно установка заготовки в рабочую зону станка и перемещение заготовки между несколькими станками. Для примера возьмем одно положение робота относительно станка ГФ2171 и, исходя из планировки, составляем кинематическую схему робота.

На рис. 2 изображена кинематическая схема, для которой решалась прямая задача кинематики:

$$[A_{3,0}] = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & -z_3 \sin q_1 \\ \sin q_1 & 0 & \cos q_1 & z_3 \cos q_1 \\ 0 & 0 & 0 & z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \gamma_i = q_1 \\ \alpha_i = q_2; \\ z_i = q_3 \end{matrix}; \quad [V_{3,1}] = \begin{bmatrix} -\sin q_1 & 0 & \cos q_1 & +C_3 \cos q_1 \\ \cos q_1 & 0 & -\sin q_1 & C_3 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[V_{3,2}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [V_{3,3}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\sin q_1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Так как в этой системе шесть неизвестных, то из этой общей матрицы формируем шесть уравнений и из каждого уравнения определяем одну переменную.

Затем из сформированной траектории определяем координаты схвата и подставляем их в эти уравнения.

Далее составляем систему уравнений, отражающую положение и расположение схвата в зоне обслуживания:

$$[A_x] := [A_{0,7}]_{1,4} + [U_1]_{1,4}(q_{1k} - g_1) + [U_2]_{1,4}(q_{2k} - g_2) + [U_3]_{1,4}(q_{3k} - g_3) + \\ + [U_4]_{1,4}(q_{4k} - g_4) + [U_5]_{1,4}(q_{5k} - g_5) + [U_6]_{1,4}(q_{6k} - g_6);$$

$$[A_y] := [A_{0,7}]_{2,4} + [U_1]_{2,4}(q_{1k} - g_1) + [U_2]_{2,4}(q_{2k} - g_2) + [U_3]_{2,4}(q_{3k} - g_3) + \\ + [U_4]_{2,4}(q_{4k} - g_4) + [U_5]_{2,4}(q_{5k} - g_5) + [U_6]_{2,4}(q_{6k} - g_6);$$

$$[A_z] := [A_{0,7}]_{3,4} + [U_1]_{3,4}(q_{1k} - g_1) + [U_2]_{3,4}(q_{2k} - g_2) + [U_3]_{3,4}(q_{3k} - g_3) + \\ + [U_4]_{3,4}(q_{4k} - g_4) + [U_5]_{3,4}(q_{5k} - g_5) + [U_6]_{3,4}(q_{6k} - g_6);$$

$$[A_a] = [A_{0,7}]_{1,2} + [U_1]_{1,2}(q_{1k} - g_1) + [U_2]_{1,2}(q_{2k} - g_2) + \\ + [U_4]_{1,2}(q_{4k} - g_4) + [U_5]_{1,2}(q_{5k} - g_5) + [U_6]_{1,2}(q_{6k} - g_6);$$

$$[A_b] = [A_{0,7}]_{1,3} + [U_1]_{1,3}(q_{1k} - g_1) + [U_2]_{1,3}(q_{2k} - g_2) + [U_3]_{1,3}(q_{3k} - g_3) + \\ + [U_4]_{1,3}(q_{4k} - g_4) + [U_5]_{1,3}(q_{5k} - g_5) + [U_6]_{1,3}(q_{6k} - g_6);$$

$$[A_7] = [A_{0,7}]_{2,3} + [U_1]_{2,3}(q_{1k} - g_1) + [U_2]_{2,3}(q_{2k} - g_2) + [U_3]_{1,3}(q_{3k} - g_3) + \\ + [U_4]_{2,3}(q_{4k} - g_4) + [U_5]_{2,3}(q_{5k} - g_5) + [U_6]_{2,3}(q_{6k} - g_6).$$

Затем значения  $q$  для первого цикла расчета принимаем равными нулю и подставляем в уравнения. В результате решения системы уравнений получим координаты сочленений. Далее полученные координаты снова подставляем в систему уравнений. Если полученные координаты сходятся с предыдущими, то обратная задача решена. В противном случае полученные значения снова подставляем в уравнения и цикл расчетов повторяем.

Результаты расчет приведены в таблице.

## Углы поворота манипулятора в каждом из сочленений

Номер позиции схвата	1°	2°	3°	4°	5°	6°
Поз. 0	0	0	-20,94	0	0	0
Поз. 1	90	11,38	19,56	0	59,06	0
Поз. 2	90	26,011	-3,556	0	67,545	0
Поз. 3	90	115,521	-43,643	0	-71,878	0
Поз. 4	90	113,573	-45,249	0	-68,324	0
Поз. 5	90	115,521	-43,643	0	-71,878	0
Поз. 6	-65,547	63,064	-64,13	0	91,066	0
Поз. 7	-65,547	62,709	-58,304	0	85,595	0
Поз. 8	0	97,724	-38,153	0	-59,571	0
Поз. 9	-65,547	97,724	-38,153	0	-59,571	0
Поз. 10	-65,547	83,503	-24,307	0	-59,196	0
Поз. 11	-65,547	101,655	-64,661	0	-36,994	0
Поз. 12	90	11,38	19,56	0	59,06	0
Поз. 13	90	26,011	-3,556	0	67,545	0
Поз. 14	90	73,793	-13,234	90	-90	90
Поз. 15	81,149	71,03	-8,201	90	-81,149	90
Поз. 16	75,293	95,085	-39,357	90	-75,292	90
Поз. 17	-136,343	100,149	-119,594	0	109,445	0
Поз. 18	-136,343	101,365	-103,238	0	91,873	0
Поз. 19	-61,074	73,851	-10,122	90	-118,926	0
Поз. 20	-70,731	80,798	-21,205	90	-109,269	0
Поз. 21	-70,731	98,358	-60,036	90	-109,27	0,00

## Литература

1. Lebedev, A. V. Synthesis of Desirable Trajectories of Dynamic Objects Spatial Movement // Proc. of The 6th IASTED International Conf. Intelligent Systems and Control. Honolulu, Hawaii, USA, 2004. – P. 36–39.
2. Фу, К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М. : Мир, 1989. – 624 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

С. В. Рогов

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

В условиях эксплуатации машин и механизмов между контактирующими поверхностями деталей возникает износ. Это приводит к их быстрому выходу из строя. Чтобы продлить долговечность, необходимо увеличить твердость, тем самым – износостойкость. Одним из перспективных упрочняюще-восстанавливающих способов повышения износостойкости поверхностей является магнитно-электрический метод упрочнения или восстановления деталей машин. Суть метода состоит в том, что при комбинированном воздействии электрических и магнитных полей микрочастицы ферромагнитного порошка ориентируются, распределяются и переносятся, при расплаве на упрочняемую поверхность.

Суть наиболее перспективной и производительной разновидности данного способа заключается в следующем (рис. 1).

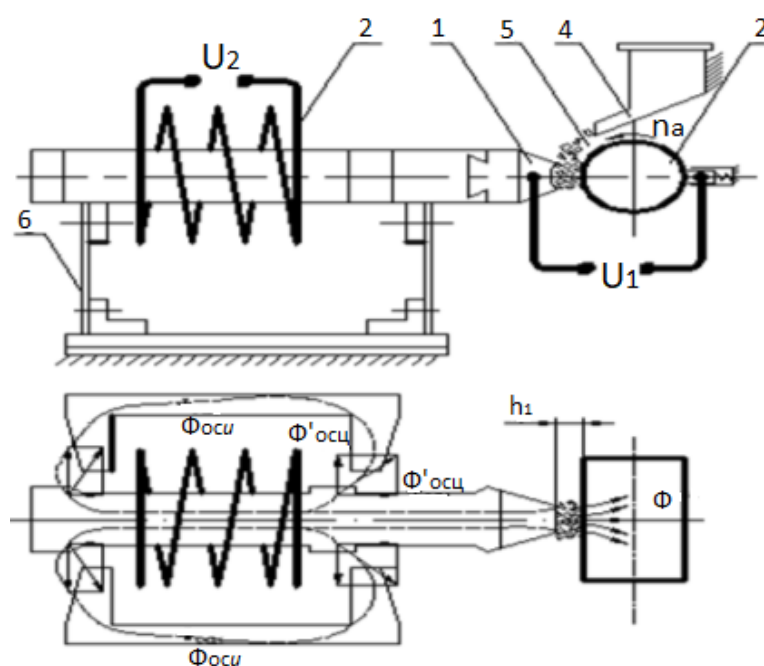


Рис. 1. Схема магнитно-электрического упрочнения с осцилляцией полюсного наконечника

В рабочий зазор  $h_1$  между полюсным наконечником 1 электромагнита 2 и упрочняемой деталью 3 подается из дозирующего устройства 4 порошок 5 электропроводящего ферромагнитного материала (ферробор, феррохромбор, порошкообразное железо и др.). Наконечник и деталь электрически соединены с полюсами источника технологического тока. Зерна порошка (микроэлектроды) удерживаются в зазоре магнитным полем. При подаче импульсов напряжения  $U_1$  на наконечник и деталь происходит пробой окисных пленок с образованием канала проводимости и по цепочкам микроэлектродов начинает течь ток. В точках контакта микроэлектродов

с упрочняемой поверхностью за счет выделяющего тепла осуществляется наплавка микрообъемов материала порошка на поверхность детали. По мере появления в точках контакта жидких перемычек металла, электродинамические силы разрывают цепочки-мостики из микроэлектродов с образованием кратковременных микродуговых разрядов (электрический взрыв). При этом часть микроэлектродов и капля расплава выбрасывается из рабочего зазора. Убыль микроэлектродов вследствие наплавки и выброса восполняется непрерывным поступлением в рабочий зазор порошка из дозатора.

При подаче на катушку электромагнита импульсного напряжения  $U_2$  определенной скважности полюсный наконечник приводится в возвратно-поступательное (осциллирующее) движение на упругой подвеске (комплект плоских пружин 5) перпендикулярно упрочняемой поверхности с ударом по ней в конце каждого поступательного хода. При поступательном ходе наконечник прижимает микроэлектроды к детали, повышая надежность электрического контакта и ограничивая микродуговые процессы.

Конечный технологический эффект магнитно-электрического упрочнения с силовым активированием процесса обусловлен воздействием на микроэлектроды и расплав трех основных факторов: электрического тока (электрический фактор), осциллирующего движения полюсного наконечника (механический фактор), магнитного потока в рабочем зазоре (магнитный фактор). Все эти факторы носят циклический характер и смещены во времени относительно друг друга. Комплексные исследования позволили определить оптимальные параметры фазового сдвига между электрическим и механическим факторами; установить зависимость технологических режимов от фазового сдвига.

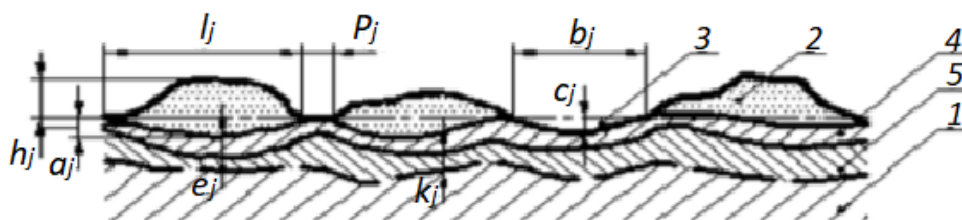


Рис. 2. Микрорельеф и микроструктура упрочненного слоя

Формообразование упрочненного слоя детали происходит дискретно, в результате одновременного протекания двух процессов: наплавки и контактной приварки микроэлектродов к упрочняемой поверхности и ее электрической эрозии под воздействием микродуговых разрядов. Упрочненная поверхность (рис. 2) представляет собой множественное сочетание наплавленных на металл подложки 1 куполообразных выступов 2 высотой 0,1–0,15 мм (максимально до 0,3 мм), состоящих из материала микроэлектродов.

Между выступов могут располагаться относительно небольшие незаплавленные участки  $P_i$ , а также электроэрозионные микрократеры 3 глубиной  $C_i$  до 0,05–0,1 мм. Под слоем наплавленных выступов имеется переходной диффузионный слой 4 толщиной 0,03–0,07 мм. Еще ниже находится зона термического влияния 5 со средней толщиной  $K_i = 0,15–0,2$  мм. Образуется расплав трех основных факторов: электрического тока (электрический фактор), осциллирующего движения полюсного наконечника (механический фактор), магнитного потока в рабочем зазоре (магнитный фактор). Все эти факторы носят циклический характер и смещены во времени отно-



сительно друг друга. Комплексные исследования позволили определить оптимальные параметры фазового сдвига между электрическим и механическим факторами, а также установить зависимость технологических режимов от фазового сдвига.

По мере увеличения сплошности слоя, процесс переноса материала микроэлектродов на материал подложки затухает, «слой на слой» не ложится.

Исследованиями микропрофиля и путем построения кривых опорной поверхности установлено, что сплошность нанесенного слоя на исходном, номинальном уровне не превышает 85–95 % даже после электроконтактного сглаживания упрочненной поверхности.

Возможности МЭУ при восстановлении посадки подшипника в корпус были исследованы при восстановлении работоспособности центробежного насоса ЦНТ-60. Для восстановления посадки на наружное кольцо подшипника диаметром 100 мм способом МЭУ был нанесен слой ферробора.

В результате проведения экспериментов с использованием различных экспериментальных установок был исследован ряд параметров: твердость, шероховатость, микрорельеф и микроструктура сформировавшейся поверхности с помощью магнитно-электрического упрочнения. Закономерности изменения содержания дисперсных включений боридов и карбиборидных соединений типа В4С, В56С по глубине упрочненной зоны в зависимости от химического состава ферромагнитных порошков и основы металла. Проведены исследования основных параметров микротеплографии поверхности и твердости поверхности (сталь 45, сталь 40Х) после магнитно-электрического упрочнения ферропорошками ФБ-17 и ФХБ-1.

#### Литература

1. Способ наплавки порошкообразных ферромагнитных материалов : а. с. 696699 (Россия), МКИ В24В31/10 / Б. П. Борисов, В. П. Рябчун. – № 2594594.
2. Установка для нанесения покрытий ферромагнитными порошками : а. с. 742119 (Россия), МКИ В24В31/10 / Б. П. Борисов, В. П. Рябчун, И. Ф. Марченко. – № 2585488.
3. Борисов, Б. П. Исследование и разработка процесса магнитоэлектрического упрочнения деталей машин в условиях фазового сдвига активирующих факторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Б. П. Борисов. – Минск, 1983. – 19 с.
4. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 19 с.
5. Хейфец, М. Л. Электромеханика импульсных процессов наплавки покрытий ферромагнитными порошками / М. Л. Хейфец, Н. Л. Грецкий, Л. М. Кожуро // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 3. – С. 51–56.
6. Инновации в науке и образовании – 2008 : VI Юбилейн. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию пребывания КГТУ на Калинингр. земле : труды / КГТУ. – Калининград, 2008. – Ч. 2. – С. 235–238.

## **СЕКЦИЯ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

---

### **МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕОЛИТОВ В КАЧЕСТВЕ ДИСПЕРСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**А. А. Гайниев**

*Казанский национальный исследовательский технологический  
университет, Республика Татарстан, Российская Федерация*

Научный руководитель А. А. Хубатхузин

В настоящее время существует широкий спектр изделий производственно-технического назначения, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с твердым дисперсным наполнителем. Имеется множество способов получения и технологических приемов, учитывающих размеры и назначение изделий, объемы производства и условия эксплуатации, конфигурацию изделия, квалификацию и оснащенность производителя и т. д. В качестве способа получения ПКМ был выбран метод смешения наполнителя с полимером, находящимся в вязкотекучем состоянии, так как является самым простым по аппаратурно-технологическому оформлению. Способ получения ПКМ с твердым дисперсным наполнителем методом смешения наполнителя с полимером, находящимся в вязкотекучем состоянии, применяется для изготовления крупногабаритных малонагруженных деталей сложной конфигурации, что является актуальным сегодня на рынке.

На сегодняшний день производится примерно 150 видов полимерных композиционных материалов. Смеси разных полимеров представляют 30 % от этого числа. Практика последних десятилетий показала, что сформировался рынок полимеров крупнотоннажного производства. В связи с этим возникает проблема переработки отходов полимерных материалов, и она обретает актуальное значение не только с позиций охраны окружающей среды, но и с экономической точки зрения. Одним из направлений использования полимерных отходов является создание композиционных материалов с использованием различных наполнителей, в том числе и техногенных отходов (зола уноса ТЭС и шлак металлургических предприятий).

Стоит отметить, что в настоящее время большинство полимерных композиционных материалов подвергаются различным способам модификации поверхности для того, чтобы еще больше улучшить физико-механические свойства данных ПКМ и быть более востребованными на рынке.

В качестве модификации поверхности полученного полимерного композиционного материала с твердым дисперсным наполнителем является использование вакуумной низкотемпературной плазмы. Данный метод является современным и перспективным для модификации структуры материалов. Воздействие неравновесной низкотемпературной плазмы (ННТП) позволяет существенно изменять свойства поверхности полимерных материалов. Достоинство данного метода модификации обусловливается тем, что метод обработки материалов ННТП экологически безопасен. Еще одним плюсом плазмохимической обработки является изменение поверхностных свойств полимеров сопровождением очистки поверхности материала от различ-

ного рода загрязнений, образованием или перераспределением полярных групп различной химической природы, обеспечивающих определенные свойства. Модифицированные поверхности существенно изменяют энергетические свойства. Обработка полимерных композиционных материалов вакуумной низкотемпературной плазмой обеспечивает высокую воспроизводимость результатов, сохранение свойств обработанной поверхности в течение длительного промежутка времени при высокой равномерности обработки, возможность обработки термолабильных материалов.

В данной работе модификация проводится с применением ННТП. Этот метод обработки материалов имеет ряд достоинств: возможность регулирования химической активности среды в зоне воздействия источника плазмы и в вакуумной разрядной камере, возможность корректировки давления, возможность ионизации инертных и реагирующих газов с целью направленной модификации поверхностных слоев.

Данная работа направлена на решение актуальной проблемы – получение улучшенных физико-механических, поверхностных и эксплуатационных свойств полимерных композиционных материалов с дисперсным наполнителем за счет обработки ННТП.

Объектом исследования является полимерный композиционный материал с твердым дисперсным наполнителем. В качестве дисперсной фазы используется цеолит. Полимерный композиционный материал, выполненный методом смешения наполнителя с полимером, находящимся в вязкотекучем состоянии. В качестве полимерного связующего был применен полиэтилен (ПЭ).

Размеры частиц цеолита и структуру полимерного композиционного материала с твердым дисперсным наполнителем определяли методом светлого поля в отраженном свете на микроскопе Olympus GX51.

Изготавливались образцы на лабораторных вальцах. Смешением на нагретых вальцах цеолита с концентратом полиэтилена в пропорциях, обеспечивающих получение композиции состава. Полученные образцы прессовали для того, чтобы изготовить тонкие полимерные композиционные пленки (0,005–0,02 мм). Прессование проходило на гидравлическом прессе, образцы зажимались между двух ровных гладких металлических пластин и антиадгезионных пленок. При прессовании использовали полимерные антиадгезионные пленки и металлические пластины.

Полученные пленки, изготовленные из ПЭ с наполненным цеолитом, располагают между предметным и покровным стеклами для микроскопии. Стекла предварительно хорошо очищают тканью и спиртом для того, чтобы удалить возможные загрязнения с поверхности стекол. Затем на хорошо очищенное предметное стекло наносят маленькую каплю иммерсионной жидкости. От полученной композиционной пленки при помощи пинцета и ножниц отрезают кусочек в качестве объекта исследования и помещают его на капле иммерсионной жидкости на стекле. На пленку наносят маленькую каплю иммерсионной жидкости, после чего ее покрывают чистым покровным стеклом, которое аккуратно прижимают пинцетом к предметному стеклу. Пленка должна быть плотно зажата между стеклами, а иммерсионная жидкость должна ровным слоем растечься между стеклами.

Препарированные таким образом образцы помещают на предметный стол микроскопа, настраивают микроскоп и просматривают в проходящем свете при стократном увеличении. Если при стократном увеличении недостаточно четко видно различие при распределении цеолита в полимерном связующем, то производят настройку при увеличении в 200 или 600 раз. Качество распределения цеолита оценивают путем сравнения картины, наблюдаемой в микроскоп, с тремя стандартными типами распределения, представленными в ГОСТ 16338–85.

В дальнейшем готовый полимерный композиционный материал подвергался плазменной обработке в ННТП.

Для плазменной модификации ПКМ с твердым дисперсным наполнителем ФГБОУ ВПО «КНИТУ» разработана плазменная установка высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда пониженного давления опытно-промышленного назначения.

Прежде чем начать загрузку образцов в камеру, необходимо тщательно ее очистить от загрязнений, образовавшихся при технологическом процессе. Очистку камеры проводят раз в смену. После тщательной очистки камеры, загружаем образцы в вакуумную камеру. После всех подготовительных работ начинаем обработку образцов в ВЧЕ плазменной установке.

В данной работе было изучение влияния высокодисперсного наполнителя на механические свойства полиэтилена. За исходные материалы были взяты: полиэтилен низкого давления (ПЭНД) марки 273-79, белая сажа (аморфный оксид кремния) марки БС-50 или БС-100, термостабилизатор Ирганокс 1010 (или Фенозан-23).

Таблица 1

#### Полимерные композиции согласно рецептурной карте

Компонент	Рецептура 1, мас. %	Рецептура 2, мас. %	Рецептура 3, мас. %
ПЭНД 273-79	99,8	84,8	69,8
БС-50	0	15	30
Ирганокс 1010	0,2	0,2	0,2

Берутся навески компонентов из расчета, что каждой композиции необходимо получить по 20 г.

Технологические параметры смешения на вальцах: температура валков  $160 \pm 5$  °С, навеска материала – 20 г, время смешения – 5–6 мин.

Из композиций методом прессования изготавливают пластины толщиной 1 мм и размером  $100 \times 100$  мм. Технологические параметры процесса прессования: температура плит  $180 \pm 5$  °С, время прогрева при давлении 0,1–0,4 МПа 10 мин, время выдержки под давлением 5 мин, удельное давление прессования  $9 \pm 2$  МПа, время охлаждения 2 мин.

Из каждой пластины при помощи ножа и крутильного пресса вырубают по пять образцов в виде двухсторонней лопатки.

Полученные лопатки испытывают при растяжении. Определяют начальный модуль упругости при растяжении ( $E$ ), предел текучести при растяжении ( $\sigma_T$ ), разрушающее напряжение при разрыве ( $\sigma_p$ ), относительное удлинение при разрыве ( $\epsilon$ ) по известным методикам. Скорость перемещения подвижного захвата разрывной машины 100 мм/мин.

Таблица 2

#### Результаты испытаний образцов материалов на растяжение

Номер рецептуры	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$E$ , МПа
Образец № 6	23,9	20,9	280
Композиционный материал с мелом	22,1	18,7	238

Как видно из представленных результатов, по всем свойствам идет превышение на 17 %, поэтому разработанный композиционный материал имеет высокие шансы на использование в промышленности, так как физико-механические свойства превышают аналоги, а стоимость материалов и изготовления ниже.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ю. И. Марущак, К. А. Ленъко

*Учреждение образования «Витебский государственный  
технологический университет», Республика Беларусь*

Научные руководители: Н. Н. Ясинская, И. А. Петюль

При оценке качества материалов и изготавливаемых из них изделий отдельное место отводится показателям художественно-эстетических свойств материалов, таких как туше или гриф. Туше – впечатление, возникающее от осязания материала. В настоящее время отсутствуют объективные методы оценки туше текстильных полотен, но большинство исследователей считают, что для описания туше необходимо учитывать поведение текстильного изделия при трении [1].

И. В. Крагельский и А. Б. Пакшвер относят трение волокнистых материалов к трению сухих твердых тел. Трением сухих тел называется такое, при котором между трущимися телами отсутствует слой смазки [2].

В текстильном материаловедении под трением понимают сопротивление, возникающее при относительном перемещении в плоскости касания двух соприкасающихся тел, находящихся под действием нормальной нагрузки [3]. Благодаря наличию на поверхности текстильных полотен грубых неровностей при относительном перемещении двух соприкасающихся текстильных поверхностей даже в случае нулевой нормальной нагрузки возникает сопротивление, характеризующееся силой цепкости  $T_c$  [4].

Для текстильных материалов свойственно одновременное проявление трения и цепкости. Сопротивление, возникающее при совместном проявлении трения и цепкости, называется тангенциальным сопротивлением [2].

Основной характеристикой, определяющей тангенциальное сопротивление при сухом трении, является коэффициент тангенциального сопротивления, представляющий отношение силы тангенциального сопротивления к нормальному давлению [2]. Различают статический и кинетический коэффициент тангенциального сопротивления. Статический или начальный КТС ( $f_{ст}$ ) связан с измеренной силой, необходимой для начала движения одной поверхности по другой. Кинетический КТС или коэффициент трения скольжения ( $f_k$ ) связан с силой, необходимой для поддержания такого движения [5].

На сегодняшний день данный показатель не нормируется, но важен для конфекционирования материалов. Коэффициент тангенциального сопротивления также может быть применен для оценки степени гладкости поверхности текстильных материалов после специальной заключительной отделки.

Методы определения тангенциального сопротивления и КТС текстильных изделий весьма разнообразны [6], однако в настоящее время не существует стандартизированной методики, которая бы распространялась на текстильные материалы. Акту-

альной является задача разработки такой методики, которая позволила бы уловить разность между КТС различных тканей и на основе этого предоставить рекомендации по выбору тканей, исходя из предполагаемого использования.

Профессор И. В. Крагельский писал, что при трении по мере притирания поверхностей происходит падение коэффициента тангенциального сопротивления, причем процесс носит затухающий характер [2].

Таким образом, целью данной работы является выбор минимально возможного объема испытаний, чтобы, с одной стороны, обеспечить необходимую достоверность, а с другой – экономичность.

В качестве объекта для исследований выбрана отбеленная хлопчатобумажная ткань производства ОАО «БПХО» (Республика Беларусь) постельного назначения поверхностной плотностью  $134 \text{ г/м}^2$ , которую подвергали умягчению традиционным способом с применением силиконовой эмульсии при концентрациях 10, 50, 100 г/л. Образцы испытывали на приборе ФРТ-Ф1 на скорости  $v = 150 \text{ мм/мин}$ .

Статический коэффициент тангенциального сопротивления рассчитывали по формуле

$$f_{\text{ст}} = \frac{F_{\text{ст}}}{m_{\text{к}}g},$$

где  $F_{\text{ст}}$  – сила, соответствующая началу движения, Н;  $m_{\text{к}}$  – масса колодки, г;  $g$  – гравитационное ускорение, принимаемое равным  $9,80665 \text{ м/с}^2$ .

Кинетический коэффициент тангенциального сопротивления рассчитывали по формуле

$$f_{\text{к}} = \frac{F_{\text{к}}}{m_{\text{к}}g},$$

где  $F_{\text{к}}$  – среднее значение силы, соответствующее равномерному скольжению поверхностей относительно друг друга, Н [5].

В соответствии с методикой проведения испытаний были получены результаты измерений статического и кинетического коэффициентов тангенциального сопротивления хлопчатобумажной ткани, обработанной при различных концентрациях препарата. На рис. 1 и 2 представлена зависимость статического и кинетического КТС от числа повторных испытаний.

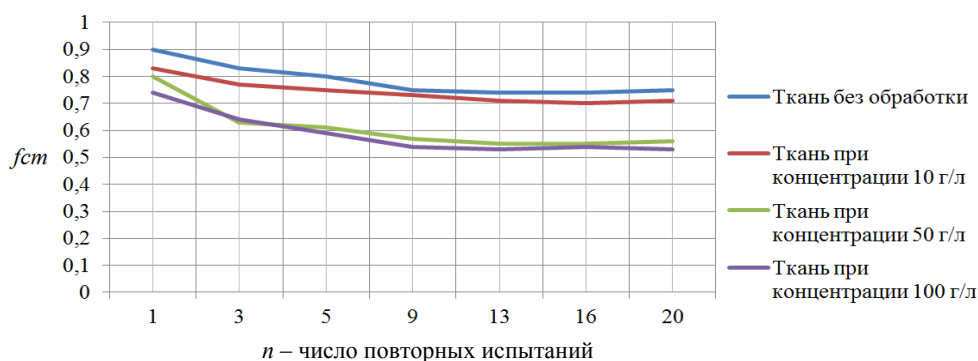


Рис. 1. Зависимость статического КТС от числа повторных испытаний

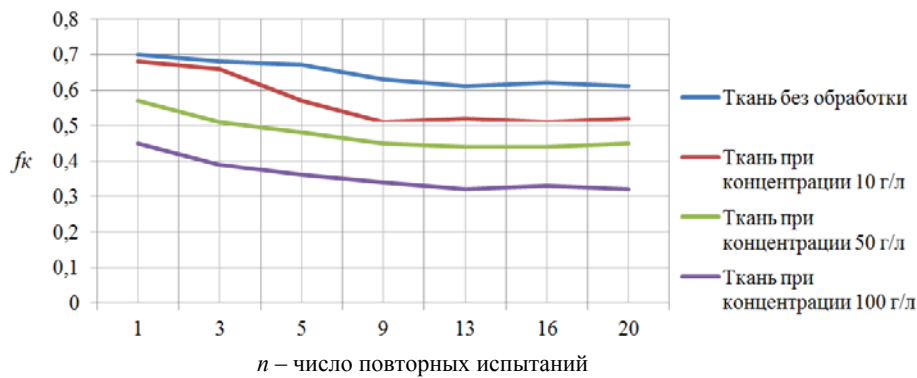


Рис. 2. Зависимость кинетического КТС от числа повторных испытаний

Результаты 20 последовательных определений статического и кинетического коэффициентов тангенциального сопротивления показали, что, начиная с 10-го измерения, для разных образцов снижение КТС незначительно: последующие измерения имеют отклонения, не превышающие 5 % от 10-го измерения КТС.

Таким образом, можно сделать вывод, что при определении коэффициента тангенциального сопротивления полотен первые 10 измерений следует не учитывать, так как из-за притирания поверхностей силы трения меняются. За конечный результат измерения следует принимать среднее значение по результатам последних трех замеров, так как данное количество обеспечит требуемую достоверность.

#### Л и т е р а т у р а

1. Стельмашенко, В. И. Материалы для одежды и конфекционирование : учеб. для акад. бакалавриата / В. И. Стельмашенко, Т. В. Розаренова. – М. : Юрайт, 2019.
2. Текстильное материаловедение (волокна и нити) : учеб. для вузов / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, А. И. Кобляков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Легпромбытиздат, 1989. – 352 с. : ил.
3. Шустов, Ю. С. Основы текстильного материаловедения / Ю. С. Шустов. – М. : МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2007. – 302 с.
4. Макарова, Т. А. Текстильное материаловедение / Т. А. Макарова, Л. Б. Потапова. – М. : МТИ, 1986, –173 с.
5. Материалы электроизоляционные полимерные пленочные и листовые. Метод определения коэффициентов трения : ГОСТ 27492–87. – Введ. 1989–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 12 с.
6. Адаптация метода наклонной плоскости для определения тангенциального сопротивления тканей после умягчающей отделки : тезисы / К. А. Ленько [и др.]. – Херсон, 2021.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Е. Д. Кузьменко

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

Поверхностная обработка металлических поверхностей играет огромную роль в продлении срока службы металлов, например, в автомобильных кузовах и строительных материалах, часто встречающимся применением является очистка корпусов из нержавеющей стали для окон и т. д. В каких отраслях промышленности использу-

ется обработка поверхности металла? Почти каждая отрасль промышленности будет нуждаться в оборудовании для обработки металлических поверхностей. К числу отраслей промышленности, которые сегодня используют обработку металлических поверхностей, относятся следующие: автомобильная промышленность, строительная промышленность, контейнерная промышленность, электротехническая промышленность, медицинская промышленность, промышленное оборудование, отрасли, использующие лабораторное оборудование, аэрокосмическая промышленность и ряд других отраслей [1].

Поверхностная обработка позволяет достичь материалам заданных свойств, требуемых для эксплуатации машин и механизмов, а также обеспечить надежность процесса их эксплуатации. Основным свойством материала, улучшаемым при поверхностной обработке, является твердость. Существует ряд способов увеличения твердости поверхности, среди них выделяется химико-термическая обработка, термическая обработка и наплавка. Целью работы является проведение сравнительного анализа перечисленных способов обработки поверхностей металлов и сплавов при увеличении твердости поверхности на примере сталей.

Рассмотрим раздел упрочнения поверхности методом термической обработки на примере закалки стали ТВЧ. Закалка токами высокой частоты (закалка ТВЧ) является технологией поверхностного упрочнения деталей из углеродистых сталей и чугунов и широко применяется в машиностроении. Основные характеристики процесса: получаемая твердость изделия 58–62 HRC. Температура процесса 800–1100 °С. Частота тока 0,5–100 КГц. Время закалки ТВЧ 10 секунд [2].

Рассмотрим конструкционную низколегированную сталь 27 ГС. Выполним закалку ТВЧ образца из заданной стали. Проведем микроанализ полученного образца и измерим твердость закаленного, незакаленного и переходного слоя (рис. 1).

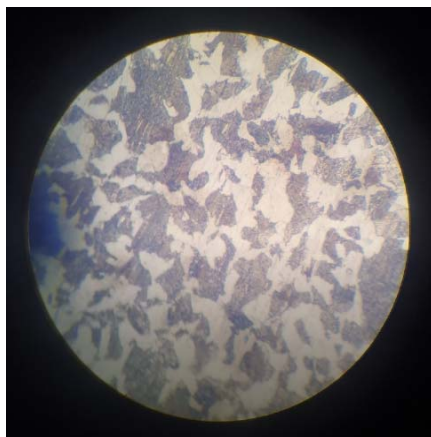


Рис. 1. Структура внутренней части при увеличении  $\times 1000$

Внутренняя часть не подвергалась закалке ТВЧ. Микроструктура: светлые зерна феррита и темные участки перлита. Структура дисперсная. Промежуточная зона, закаленная частично. Микроструктура: светлые участки аустенита и темные участки мартенсита. Структура дисперсная. Верхняя зона, подвергшаяся закалке ТВЧ. Микроструктура: светлые участки аустенита и темные участки мартенсита. Дисперсность структуры снижается. Толщина обработанного слоя составила 3,75 мм.



Измерим твердость по методу Роквелла. Для необработанного слоя твердость составила 19,5 HRC. Для зоны термического влияния твердость составила 34 HRC. Для закаленного слоя твердость составила 53 HRC. Таким образом, твердость поверхности детали увеличилась в 2,7 раза.

Рассмотрим раздел упрочнения поверхности методом химико-термической обработки на примере цементации стали. Основной целью этого цементации является обогащение верхнего слоя деталей и элементов машин необходимым количеством углерода, процентное содержание которого в этом случае может составлять 0,8–1,1 %. В целом науглероживание стали используется для формирования высокого процента твердости поверхности обрабатываемой детали, а также для достижения высокой износостойкости, которая создается за счет использования термической обработки после указанного процесса [3].

Рассмотрим конструкционную углеродистую качественную сталь 20. Изучим микроструктуру и измерим твердость образца из данной стали после проведения операции цементации (рис. 2).

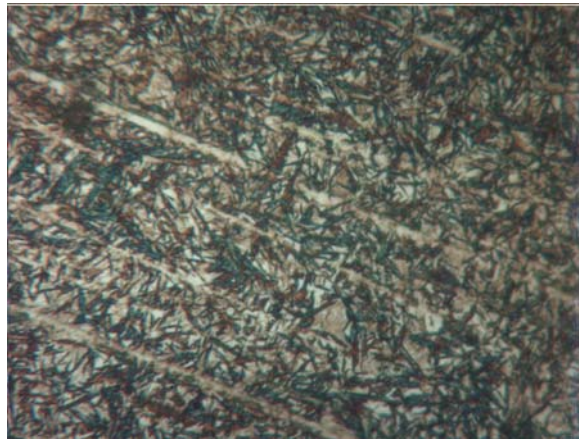


Рис. 2. Структура обработанной части при увеличении  $\times 1000$

Внутренняя часть не подвергалась цементации. Микроструктура: перлитная, светлых ферритных зерен мало. Структура дисперсная, изделие испытывало высокую скорость охлаждения. Поверхность образца цементирована. Микроструктура: преобладание игольчатого мартенсита с вкраплениями остаточного аустенита. Структура дисперсная. Толщина обработанного слоя составила 2 мм.

Измерим твердость по методу Роквелла. Для необработанного слоя твердость составила 35 HRC. Для зоны переходного слоя твердость составила 41 HRC. Для цементированного слоя твердость составила 56 HRC. Таким образом, твердость поверхности детали увеличилась в 1,6 раз.

Рассмотрим наплавку как способ упрочнения поверхности. Наплавка – это процесс нанесения металла на детали, которые были изношены или подвержены износу, коррозии или другим повреждениям, чтобы помочь продлить срок службы инструмента. Этот вид сварки выполняется не для создания швов или соединения металла, а для наращивания и укладки защитного слоя или валика поверх уязвимых деталей и деталей, подверженных износу, таких как ковши экскаваторов или наконечники плугов сельскохозяйственной техники. При наплавке металл наносится поверх дру-

гой поверхности, чтобы увеличить твердость поверхности и сделать ее устойчивой к истиранию, ударам, эрозии и истиранию [4].

Рассмотрим сталь 3. В качестве наплавляемого сплава на деталь из рассматриваемой стали возьмем быстрорежущую сталь Р6М5. Изучим микроструктуру и измерим твердость образца из данной стали после проведения наплавки (рис. 3).

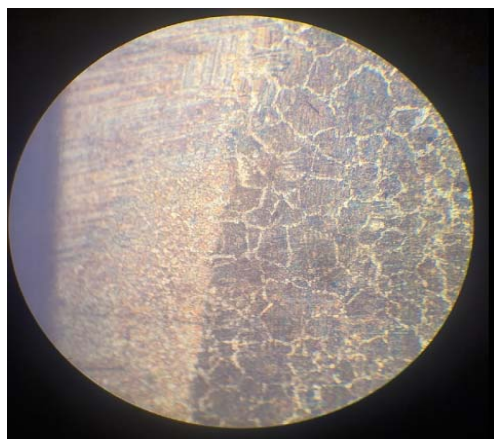


Рис. 3. Структура переходной зоны x125

Внутренняя часть не подвергалась электронно-лучевой наплавке. Микроструктура: темные зерна перлита со светлыми включениями цементита. Промежуточная зона начинает испытывать термическое влияние, поэтому ближе к границе с наплавленным слоем происходит увеличение размера зерна. Микроструктура: темные зерна перлита со светлыми включениями цементита. Зона наплавки характеризуется мелкими зернами мартенсита со светлыми включениями цементита. Структура основного металла-подложки остается прежней, сохраняется увеличение размера зерен при приближении к границе. Толщина обработанного слоя составила 0,2 см. При этом диаметр детали 1 см.

Измерим твердость по методу Роквелла. Для необработанного слоя твердость составила 21 HRC. Для наплавленного слоя твердость составила 35 HRC. Таким образом, твердость поверхности детали увеличилась в 1,7 раза.

По полученным данным следует отметить, что наибольшее увеличение твердости для рассматриваемых образцов было достигнуто при применении термической обработки – закалки токами высокой частоты.

#### Список литературы

1. Surface treatment of metals. – Режим доступа: <https://tantec.com/surface-treatment-of-metals/>. – Дата доступа: 07.04.2022.
2. Edwards, J. Coating and surface treatment systems for metals: a comprehensive guide to selection, 1997.
3. Гурьев, А. М. Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, О. А. Власова // Фундамент. исслед. – 2008. – № 8. – С. 10.
4. Формирование композиционной структуры износостойкого наплавленного металла с боридным упрочнением / А. А. Артемьев [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Порошковая металлургия и функцион. покрытия. – 2011. – № 2. – С. 44–48.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПЛАСТИКА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ****А. А. Михальченко***Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель*

Научный руководитель А. Б. Невзорова

Использование 3D-принтеров на промышленных предприятиях позволяет получить высокую гибкость производства, а также снизить затраты на производство и транспортировку деталей [1], [2]. С развитием, доступностью и невысокой стоимостью данной технологии число примеров внедрения 3D-принтеров на предприятиях с каждым годом стремительно растёт.

В настоящее время одними из наиболее распространенных методов 3D-печати термопластичных материалов являются:

- послойное наплавление детали снизу вверх (FDM-печать);
- селективное лазерное спекание (SLS-печать).

Выбор конкретного метода печати для производства деталей обуславливается набором параметров, таких как свойства исходного материала и конечного изделия, его конфигурация и требуемая производительность процесса. Например, изделия, полученные FDM-методом, зачастую требуют дополнительной механической обработки из-за высокой шероховатости поверхности и необходимости печати не входящих в конструкцию детали поддерживающих элементов. Кроме того, филамент для FDM-печати производится на экструзионных линиях с высокими допусками по диаметру, что требует существенных расходов на его получение из гранулированного или порошкообразного сырья [3].

Наряду с этим при SLS-печати предъявляются достаточно высокие требования к качеству полимерных материалов, так что печать из обычных полимерных порошков, представленных на рынке, далеко не всегда возможна [4].

Цель исследований – изучить влияние различных параметров 3D-печати на точность и качество получаемых изделий.

**Методика работы.** Тестовые образцы деталей были запроектированы и распечатаны на 3D-принтере Flashforge Finder для дальнейших экспериментальных исследований. Была проведена оценка точности геометрических параметров деталей. По результатам проведенных измерений обнаружены ограничения на возможность создания мелких геометрических элементов деталей. Установлены факторы, влияющие на точность получаемых изделий, по параметрам программного обеспечения 3D-принтера, как: выбор режима качества печати; настройка степени заполнения при печати; выбор коэффициента экструдирования. Поэтому при использовании технологии FDM-печати накладываются ограничения на форму и параметры элементов детали.

Установлено, что на отклонения формы и размеров изделий значительное влияние оказывают технологические режимы работы экструзионных головок 3D-принтера, которые задаются через настройки специализированного программного обеспечения, осуществляющего генерацию управляющего G-кода. Важной задачей является определение оптимальных значений настроек, обеспечивающих получение максимально точных по размерам изделий, а также создание прикладных приложений, выполняющих предварительный анализ геометрии 3D-модели и позволяющих автоматизировать выбор оптимальных настроек печати [5]–[7].

Для подготовки 3D-модели к печати и выбора параметров печати использовалось специальное программное обеспечение, разработанное производителем принтера.

Оценка размерной точности и качества печати производилась для 3D-модели, которая была построена при помощи программы Autodesk Inventor 2019.

При подготовке моделей и проведении пробных экспериментов были отобраны следующие параметры, которые могут оказывать влияние на качество и точность деталей:

- степень заполнения (Fill Density), которая выражается процентом заполнения структурами поддержки внутренней полости модели в ходе печати;

- коэффициент экструдирования (Extrusion Ratio), позволяющий управлять интенсивностью подачи материала в печатающую головку принтера. Этот параметр задает отношение реального количества материала, расходуемого на один слой, к номинальному. Данный параметр задается в процентах и составляет от 80 до 125 %;

- различные настройки, определяющие толщину (высоту) и количество укладываемых слоев при печати изделия;

- число проходов при построении оболочки (т. е. число проходов при построении внешнего контура изделия на каждом слое). Данный параметр влияет на толщину оболочки изделия – чем он выше, тем больше толщина оболочки;

- стандартные наборы настроек качества печати (Resolution), определенные производителем принтера. Пользователю доступны четыре предопределенных режима качества печати: низкое; стандартное; высокое; наилучшее. При выборе одного из режимов автоматически включается соответствующий набор параметров (толщина и количество слоев, скорость движения печатающей головки во время рабочих и холостых перемещений) [2].

В таблице приведены параметры исследуемых образцов, полученные экспериментально.

**Параметры исследуемых образцов**

Модель принтера	Flashforge Finder		
	Послойное наплавление (FDM-печать)		
Технология печати	Послойное наплавление (FDM-печать)		
Рабочий материал	PLA	ABS	PETG
Геометрические размеры	20 × 10 × 5		
Толщина слоя, мм	0,06–03	0,1–05	0,3–0,5
Количество печатающих головок	1	1	1
Заявленная точность печати, мкм	100	100	100
Степень заполнения, %	15	15	15
Коэффициент экструдирования, %	109	109	109
Твердость (по Роквеллу)	R70	R105	R106
Масса, г	1,110	0810	1,101
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,23	1,1	1,3
Температура плавления, °С	174	178	224
Температура размягчения, °С	50	100	80
Усадка при изготовлении	Нет	До 0,8 %	Нет
Химическая формула	(C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O) <sub>n</sub>	(C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> · C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> · C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N) <sub>n</sub>	(C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>
Прочность на изгиб, МПа	54	40	74,5
Прочность на разрыв, МПа	57	22	35,1

**Результаты исследований.** Проведено сравнение параметров образцов, полученных из различных видов пластика. Установлено, что при одинаковых коэффициентах экструдирования и степени заполнения, наибольшую твердость имеет образец, выполненный из PETG пластика (R106), который также обладает наибольшей температурой плавления (224 °С), температура размягчения 80 °С. У изделий из данного пластика отсутствует усадка при изготовлении, обладает самой высокой прочностью на изгиб (74,5 МПа) среди прочих материалов, использованных при исследовании, и средней прочностью на разрыв (35,1 МПа). Образцы из пластика ABS также обладают высокой твердостью (R105), температурой плавления 178 °С, более высокой температурой размягчения (100 °С), по сравнению с образцами из PETG и PLA пластиков. Однако наряду с этим присутствует усадка при изготовлении до 0,8 %. Обладают средними прочностью на изгиб и разрыв (40 и 22 МПа соответственно). Образцы, выполненные из PLA пластика, обладают самой низкой температурой размягчения (50 °С), относительно низкой твердостью (R70), при этом отсутствует усадка, а прочность на изгиб и разрыв составляют 54 и 57 МПа соответственно. Также стоит отметить, что PLA пластик является биоразлагаемым (получают из сахарного тростника и кукурузы).

Таким образом, основываясь на результатах исследования качества деталей из различных видов пластика, изготовленных методом FDM-печати, можно дать следующие рекомендации по способам их применения:

– PLA – 3D-печать крупногабаритных изделий, 3D-печать изделий с точными размерами, 3D-печать декоративных элементов мебели и др.;

– ABS – возможно использование для производства механических изделий, мелкосерийной печати корпусов и комплектующих, для печати изделий, рассчитанных на долгий срок службы.

– PETG – подходит для печати не сильно нагруженных кинематических пар, печати изделий, эксплуатирующихся в уличных условиях [8].

#### Литература

1. Технологии 3D-печати. – Режим доступа: [http://www.ixbt.com/printer/3d/3d\\_tech.shtml](http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml). – Дата доступа: 20.03.2022.
2. Зачем нужны 3D-принтеры. – Режим доступа: <http://pechat-3d.ru/3dprinter/primenenie/3d-printer-primenenie.html>. – Дата доступа: 20.03.2022.
3. Flashforge Finder 3D-Printer. UserGuide. – Режим доступа: <http://static.creativetools.se/misc/doc/flashforge/finder/Finder-User-Guide.pdf>. – Дата доступа: 14.03.2022.
4. Flashforge Dreamer. – Режим доступа: <https://www.3dhubs.com/3dprinters/flashforge-dreamer>. – Дата доступа: 11.03.2022.
5. The Latest Flashforge Software, Firmware, and User Manual Download. – Режим доступа: <http://www.flashforge.com.hk/downloads.html>. – Дата доступа: 20.03.2022.
6. Garrett, W. Melenka, Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D-desktop printer, Rapid Prototyping Journal. – 2015. – № 21.
7. Farzadi, A. Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D-Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering, PLOS. – 2014. – № 9.
8. Библиотека анализа моделей для 3D-печати. – Режим доступа: [http://edu.ascon.ru/main/competition/gallery/items/?bm\\_id=65174](http://edu.ascon.ru/main/competition/gallery/items/?bm_id=65174). – Дата доступа: 20.02.2022.

**ВЫБОР ПЛАСТИФИКАТОРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ЛЕНТ, ПОЛУЧЕННЫХ  
ПО ТЕХНОЛОГИИ ОРИЕНТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ**

А. С. Астапкин

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

Научные руководители: Н. С. Винидиктова, И. В. Царенко

Упрочнение полимерных образцов в процессе ориентационной вытяжки происходит вследствие преимущественного расположения макромолекул (а точнее – их участков) вдоль направления действия растягивающей силы. Перестройка структуры материала образцов при вытяжке совершается на масштабных уровнях как макромолекул, так и надмолекулярных образований. Под действием растягивающей силы ослабевают или частично разрушаются связи – межмолекулярные и между фрагментами макромолекул, вследствие чего макромолекулярные цепи ориентируются. Последнее возможно при условии достаточной гибкости макромолекул. Это достигается при высокоэластическом состоянии полимера, которое реализуется при высоких температурах. Чтобы снизить потери на внутреннее трение в полимере, при переводе его в высокоэластическое состояние применяют пластификаторы – термодинамически совместимые с ним вещества, ослабляющие связи между макромолекулами и надмолекулярными структурами [1].

Цель исследовательской работы – выбрать наиболее эффективный пластификатор для получения по технологии ориентационной вытяжки полипропиленовых лент. За основной критерий эффективности пластификатора принимали его способность понижать температуру плавления полимерного композита.

**Материалы и методики изготовления образцов и испытаний.** Объектом исследований служил полипропилен ПП марки 089901, фирма UNIKO (Ю. Корея) со следующими техническими характеристиками: порошок белого цвета, показатель текучести расплава ПТР 3,4 г/10 мин, прочность  $\sigma = 280$  МПа, температура плавления  $T = 167,5$  °С.

При выборе пластификатора использовали вещества из различных химических классов.

Парафин (ГОСТ 23683) – воскоподобная смесь предельных углеводородов  $C_{18}$ – $C_{35}$  (рис. 1, а), твердое вещество, плотность 0,88–0,91 г/см<sup>3</sup>, температура плавления  $T_{пл} = 45$ –65 °С [2].

Бензамид (ТУ 6-09-14-2096–82) – белое твердое вещество (рис. 1, б) с химической формулой  $C_6H_5C(O)NH_2$ , плотность 1,34 г/см<sup>3</sup>, температура плавления  $T_{пл} = 125$ –130 °С, температура кипения  $T_{кип} = 290$  °С [3].

Веретенное масло (марка И-20А ГОСТ 1642) – минеральное промышленное масло общего назначения, маслянистая жидкость желтого цвета (рис. 1, в), смесь парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов, плотность 1,34 г/см<sup>3</sup>, температура плавления  $T_{пл} = 125$ –130 °С, температура кипения  $T_{кип} = 290$  °С [4].

Вазелиновое масло (ГОСТ 3164) – маслянистая прозрачная жидкость (рис. 1, г), очищенная от вредных органических веществ и их соединений смесь парафиновых и нафтеновых углеводородов, плотность 0,893–0,894 г/см<sup>3</sup>, температура застывания  $T_3 = -45$  °С, температура кипения  $T_{кип} = 300$  °С [5].

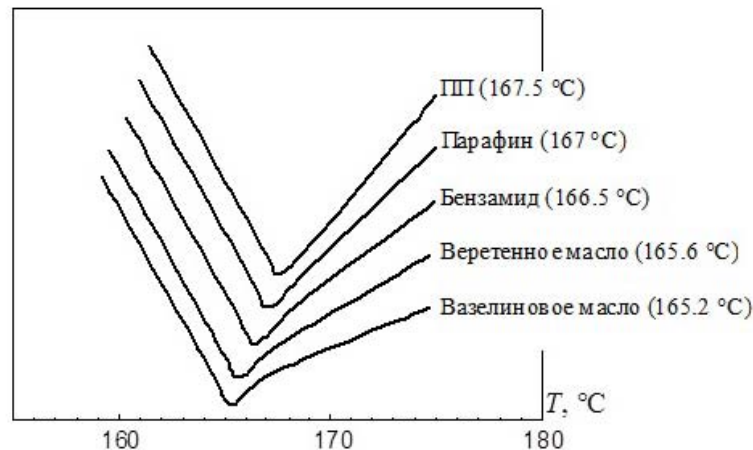


Рис. 1. ДТА-спектры образцов из исходного ПП и композиций ПП-пластификатор (5 %)

Образцы из ПП получали термическим прессованием. Предварительно смешивали механически полимерный порошок и пластификатор, до равномерного распределения пластификатора по всему объему полимерного порошка. Образцы в виде пластин изготавливали на гидравлическом прессе ПППР при температуре  $180 \pm 5$  °С и давлении 10–15 МПа. Полученные пластины  $50 \times 100$  мм и толщиной 0,5–0,7 мм разрезали на полоски шириной 10 мм. Полученные заготовки подвергали ориентационной вытяжке на оригинальном лабораторном устройстве. Ориентационная вытяжка проводилась при  $T \approx 140$  °С. Деформационно-прочностные показатели определяли в соответствии с ГОСТ 14236. На машине Instron (США) проводили испытания по определению разрушающего напряжения при растяжении (прочность  $\sigma$ , МПа) и относительное удлинения ( $\varepsilon$ , %) лент из исходного ПП и ПП с пластификаторами в концентрации 1, 3, 5, 7 %. Скорость деформирования при растяжении составляла 50 мм/мин. Температуру плавления исходного ПП и пластифицированного (содержащего 5 % пластификатора) определяли с помощью дифференциально-термического анализа (ДТА). Испытания проводили на дериватографе Q–1500 (Венгрия) в среде воздуха при скорости нагрева 5 °С/мин.

**Результаты испытаний.** Результаты дифференциально-термического анализа (ДТА) образцов композиционного состава ПП-пластификатор, представлены на рис. 1.

Очевидно, что практически все добавки снижают температуру плавления исходного ПП. Таким образом, применение всех рассмотренных пластификаторов позволит снизить температуру переработки ПП. По эффективности пластификации ПП добавки можно расположить в следующий ряд: 1) вазелиновое масло; 2) веретенное масло; 3) бензамид; 4) парафин. Однако с введением наполнителя можно ожидать потерю механических свойств материала. Поэтому было важно оценить влияние пластифицирующих добавок на деформационно-прочностные свойства композита.

В таблице приведены результаты измерения прочности на разрыв лент их исходного ПП и с пластификаторами в концентрации 1, 3, 5, 7 %. Все образцы были подвергнуты ориентационной вытяжке кратности до  $\varepsilon_s \approx 8$ –10.

Как и следовало ожидать, введение пластифицирующих веществ в состав ленты приводит к снижению ее прочности. Однако влияние исследуемых пластификаторов не одинаково. Наиболее негативное влияние на прочность оказывает веретенное

масло: при введении его в композит в концентрации 7 % прочность образца уменьшается практически вдвое. Введение парафина и вазелинового масла практически одинаково влияет на разрушающее напряжение. Наибольшей прочностью обладают образцы, пластифицированные бензамидом. Таким образом, по влиянию на прочностные свойства материала добавки можно расположить в следующий ряд: 1) бензамид; 2) вазелиновое масло; 3) парафин; 4) веретенное масло. Неодинаковое влияние оказывают пластификаторы на относительное удлинение материала: введение бензамида и парафина уменьшают значения относительного удлинения, что может ухудшить качество ориентационной вытяжки, тогда как вазелиновое и веретенное масла улучшают этот показатель материала. Так, введение всего 1 мас. % вазелинового масла поднимает значение относительного удлинения  $\epsilon$  почти в 2 раза (с 25 до 46 %).

#### Прочность образцов из композиций ПП–пластификатор

Состав	Содержание добавки, мас. %	$\sigma$ , МПа	$\epsilon$ , %
ПП	–	303	25
ПП–бензамид	1	289	23
	3	295	20
	5	290	20
	7	280	18
ПП–парафин	1	260	19
	3	221	13
	5	215	11
	7	210	8
ПП–вазелиновое масло	1	292	46
	3	230	35
	5	215	32
	7	210	28
ПП–веретенное масло	1	171	30
	3	198	38
	5	181	34
	7	160	20

Анализ данных, полученных в ходе исследований, позволяет сделать вывод, что наилучшими характеристиками обладают материалы, модифицированные вазелиновым маслом. Такие материалы обладают оптимальным сочетанием свойств: наилучшими теплофизическими характеристиками и приемлемыми механическими показателями.

#### Литература

1. Шишенок, М. В. Высокомолекулярные соединения / М. В. Шишенок. – Минск : Выш. шк., 2012. – 535 с.
2. Википедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Парафин>. – Дата доступа: 04.03.2022.



3. Переведенные турбонаддувы. – Режим доступа: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.57260965-62440138-0e762019-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Pyramide\\_\(benza-mide\)](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.57260965-62440138-0e762019-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Pyramide_(benza-mide)). – Дата доступа: 06.02.2022.
4. Википедия. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Индустриальные\\_масла](https://ru.wikipedia.org/wiki/Индустриальные_масла). – Дата доступа: 04.03.2022.
5. Википедия. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вазелиновое\\_масло](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вазелиновое_масло). – Дата доступа: 04.03.2022.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ФРАКЦИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Е. С. Глинников

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

Научные руководители: Н. С. Винидиктова, Д. Л. Стасенко

Крекинг нефти – высокотемпературная переработка нефти и ее фракций с целью получения, как правило, продуктов меньшей молекулярной массы. В настоящей работе нами изучена возможность применения коронного разряда, с целью понижения энергоемкости процесса получения углеводородных продуктов. Воздействие на молекулы нефтепродуктов свободных электронов и ионов, возникающих в электрическом разряде, по физическому эффекту сравнимо с воздействием повышенных температур. Электрическая поляризация молекул жидкости может обуславливать снижение интенсивности физико-химического взаимодействия между ними и облегчать их переход в парогазовую фазу.

Целью данной работы было оптимизировать параметры электрического поля, применяемого для интенсификации процесса превращения нефтепродуктов, снижения температуры и, следовательно, энергоемкости процесса получения углеводородного продукта.

**Материалы и методы исследования.** В качестве модели рассматривали процесс конвертирования углеводородов под воздействие электрического разряда. На рис. 1 представлена экспериментальная установка.



а)

б)

Рис. 1. Установка для создания коронного разряда:  
а – общий вид установки; б – источник коронного разряда

Для проведения эксперимента в чашки Петри наливали пробы нефтепродукта слоем 1 см (рис. 1, б). Масса пробы составляла  $55 \pm 0,01$  г.

Для оптимизации параметров электрического поля, воздействующего на пробы нефтепродукта с целью отделения летучих фракций, провели следующий эксперимент. При температуре  $T = 25$  °С обрабатывали коронными разрядами разной напряженности  $E$  одинаковые пробы тройной смеси нефтепродуктов (п-ксилол + керосин + машинное масло), нефть (скважина № 249 Речицкого месторождения). Регистрировали потерю массы  $\Delta m$ , %:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m}{m_0},$$

где  $m_0$  – масса пробы исходная,  $m$  – масса пробы после электрической обработки в течение 120 мин.

Для сравнения эффективности целью отделения летучих фракций нефти был проведен модульный эксперимент двумя способами: 1) классическим способом, с нагревом пробы, без использования коронного разряда; 2) предлагаемым способом: интенсификация процесса под воздействием коронного разряда без дополнительного нагрева.

Мощность разряда рассчитывали по формуле

$$P_1 = UI,$$

где  $U$  – напряжение;  $I$  – сила тока.

Затраты энергии за время  $t = 30$  мин рассчитывали по формуле

$$W_1 = Pt,$$

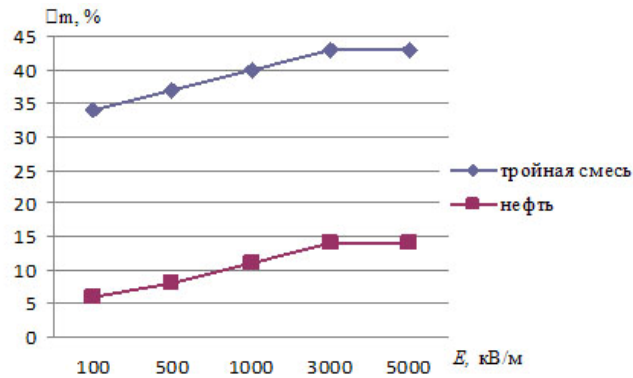
где  $P$  – мощность разряда;  $t$  – время воздействия.

**Результаты исследований.** Анализ потери массы проб тройной смеси нефтепродуктов (п-ксилол + керосин + машинное масло) и нефти в результате обработки коронным разрядом разной напряженности  $E$  при температуре  $T = 25$  °С в течение 120 мин (рис. 2) показывает, что: 1) оптимальное значение напряженности поля коронного разряда соответствует  $E = 3000$  кВ/м, так как увеличение напряженности не приводит к росту выхода летучих фракций нефтепродуктов; 2) нижней границей оптимального диапазона напряженностей является  $E_{\min} = 500$  кВ/м, так как на участке линейного роста  $\Delta m$ , который соответствует  $E = 100$ – $3000$  кВ/м, при  $E = 100$  кВ/м начинается нестабильность коронного разряда; 3) в оптимальном диапазоне напряженностей  $500$  кВ/м  $\leq E < 3000$  кВ/м имеет место достаточно высокий выход летучих, сравнимый с нагреванием проб от внешнего источника теплоты.

Для оценки эффективности использования коронного разряда при отделении летучих фракций нефти проводили модульный эксперимент двумя способами.

В первом случае оценивали мощность, потребляемую при имитации классического способа, нагрева нефтепродукта. Мощность, потребляемая термостатом на поддержание температуры  $T_5 = 500$  °С, составляет  $P_5 = 20$  кВт, затраты энергии за время работы термостата в течение 30 мин.  $W_5 = 20 \cdot 0,5 = 10$  кВт · ч. Потеря массы  $\Delta m = 58$  %.

Во втором случае, при использовании коронного разряда при отделении летучих фракций нефти, величина напряженности  $E = 10^3$  кВ/м при температурах  $T_1 = 25$  °С,  $T_2 = 95$  °С,  $T_3 = 105$  °С,  $T_4 = 150$  °С. При  $T_2 - T_4$  эксперименты проводили в термостате. Во всех случаях время эксперимента составляло 30 мин. Регистрировали потери массы пробы за этот период.



Нефтепродукты: тройная смесь (п-ксилол + керосин + машинное масло), нефть (скважина № 249 Речицкого месторождения)

Рис. 2. Кривая зависимости потери массы нефтепродуктов от напряженности коронного разряда

Энергетические затраты на реализацию способа с использованием коронного разряда оценивали следующим образом. Коронный разряд осуществляли при напряжении  $U = 5$  кВ и силе тока  $I = 0,1$  мА. Мощность разряда  $P_1 = 0,5$  Вт. Затраты энергии за время  $t = 30$  мин  $W_1 = 0,025$  кВт · ч. На поддержание температуры  $T_2 = 95$  °С мощность, потребляемая термостатом, соответствует  $P_2 = 3,8$  кВт, энергетические затраты составляют  $W_2 = 1,9$  кВт · ч. На поддержание температуры  $T_3 = 105$  °С мощность, потребляемая термостатом, соответствует  $P_3 = 4,2$  кВт, энергетические затраты составляют  $W_3 = 2,1$  кВт · ч. На поддержание температуры  $T_4 = 150$  °С мощность, потребляемая термостатом, соответствует  $P_4 = 6$  кВт, энергетические затраты составляют  $W_4 = 3,0$  кВт · ч. На рис. 3 представлена зависимость потери массы пробы от температуры при воздействии коронного разряда ( $E = 3 \cdot 10^3$  кВ/м).

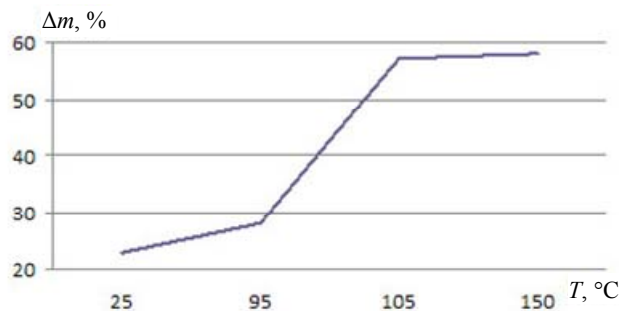


Рис. 3. Зависимость потери массы пробы от температуры при воздействии коронного разряда ( $E = 3 \cdot 10^3$  кВ/м)

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Конверсия углеводородов при использовании коронного разряда реализуется при температурах, гораздо более низких, чем без его использования и, соответственно, при гораздо более низких затратах и энергии.

2. Повышение температуры обработки проб коронным разрядом с 25 до 95 °С незначительно влияет на выделение из проб летучих фракций.

3. Использование коронного разряда, являющегося высокоинтенсивным технологическим фактором, обуславливает незначительные затраты энергии.

4. При одинаковом выходе летучих фракций нефти предложенный способ более чем в 3 раза превосходит по критерию энергосбережения способ без применения коронного разряда.

Предложенный способ может найти применение на предприятиях нефтехимической промышленности как средство расширения технологических возможностей нефтепереработки с целью повышения качества нефтепродуктов.

## **ВЛИЯНИЕ ВАЗЕЛИНОВОГО МАСЛА НА СТРУКТУРУ И ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ЛЕНТ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ОРИЕНТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ**

**А. С. Рябцев**

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

Научные руководители: Н. С. Винидиктова, И. В. Царенко

Полимерные ленты представляют собой особый вид материалов, для которых характерны значительные продольные и незначительные поперечные размеры, а также большая (относительно массы) удельная поверхность. Их применение постоянно растет, охватывает пищевую промышленность, строительство, машиностроение. Это ленты для упаковки пищевых продуктов, изоляционные и т. д.

Выбор пластификатора, работающего в качестве технологической жидкости, во многом определяет свойства будущего продукта. По результатам ранее проведенных исследований [1] наиболее эффективным пластификатором оказалось вазелиновое масло.

Целью настоящей работы было исследование влияния вазелинового масла как технологической среды и пластифицирующего агента на структуру и прочностные свойства полипропиленовых лент, полученных по технологии ориентационной вытяжки.

**Материалы и методики изготовления образцов и испытаний.** Объектом исследований служил полипропилен (ПП) марки 089901, пластификатор – вазелиновое масло (ГОСТ 3164) – очищенная фракция нефти, в которой нет вредных органических веществ и их соединений, маслянистая прозрачная жидкость, смесь парафиновых и нафтеновых углеводородов, плотность 0,893–0,894 г/см<sup>3</sup>, температура застывания  $T_3 = -45$  °С, температура кипения  $T_{\text{кип}} = 300$  °С [2].

Образцы из ПП получали термическим прессованием. Предварительно смешивали механически полимерный порошок и пластификатор, до равномерного распределения пластификатора по всему объему полимерного порошка. Образцы в виде пластин изготавливали на гидравлическом прессе ПППР при температуре  $180 \pm 5$  °С и давлении 10–15 МПа. Полученные пластины 50 × 100 мм и толщиной 0,5–0,7 мм

разрезали на полоски шириной 10 мм. Полученные заготовки подвергали ориентационной вытяжке на оригинальном лабораторном устройстве. Ориентационная вытяжка проводилась при  $T \approx 140$  °С на воздухе и в среде вазелинового масла. Кратность вытяжки образцов  $\varepsilon_s$  определяли по формуле

$$\varepsilon_s = \frac{T_\phi(f)}{T_\phi(f_0)},$$

где  $T_\phi(f)$  – фактическая линейная плотность ориентированного образца;  $T_\phi(f_0)$  – фактическая линейная плотность исходного образца.

Линейная плотность в соответствии с ГОСТ 10978 определяется по формуле

$$T_\phi(f) = 1000 \frac{m}{l},$$

где  $m$  – масса образца;  $l$  – длина образца.

Образцы полимерных лент изучали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) VEGA/TESCAN, оснащенного программой Digital Microscopy Imaging. Для данного исследования участок полимерной ленты в растянутом состоянии фиксировали на электропроводной липкой ленте и наносили на него методом ионного напыления слой золота.

Деформационно-прочностные показатели определяли в соответствии с ГОСТ 14236. На машине Instron (США) проводили испытания по определению разрушающего напряжения ПП лент при растяжении (прочность  $\sigma$ , МПа) и относительное удлинения ( $\varepsilon$ , %). Скорость деформирования при растяжении составляла 50 мм/мин. Рассчитывали среднее арифметическое значение определяемого параметра по результатам пяти повторных измерений.

**Результаты испытаний.** Согласно результатам, представленным в таблице, ориентационная вытяжка образцов в среде вазелинового масла привела к увеличению прочности образцов на 10 % по сравнению с образцами из ПП, подвергнутыми ориентационной вытяжке на воздухе.

#### Деформационно-прочностные характеристики образцов из полипропилена, подвергнутых ориентационной вытяжке в среде вазелинового масла

Ориентация в вазелиновом масле				Ориентация на воздухе			
$\varepsilon_s$	$\bar{\varepsilon}_s$	$\sigma$ , МПа	$\bar{\sigma}$	$\varepsilon_s$	$\bar{\varepsilon}_s$	$\sigma$ , МПа	$\bar{\sigma}$
10,9	10,5	326,0	333,4	10,8	10,3	327,9	302,9
10,2		342,4		10,2		300,9	
10,6		359,0		10,0		299,7	
10,4		315,1		10,2		301,9	
10,3		324,7		10,2		283,9	

Это может происходить по двум причинам. Во-первых, равномерность прогрева ленты в технологической жидкости более высокая, чем на воздухе (так как жидкость является лучшим теплоносителем). Во-вторых, технологическая жидкость пласти-

фицирует ПП и оказывает физико-химическое воздействие на поверхностный слой лент, стимулируя его пластическое течение под растягивающей нагрузкой с минимальным количеством разрывов макромолекул.

С помощью растрового электронного микроскопа была исследована поверхность образцов из ПП, которые подвергали ориентационной вытяжке на воздухе и в среде вазелинового масла (рис. 1).

Очевидно, что вытяжка на воздухе приводит к появлению на поверхности образца множества трещин, ориентированных вдоль направления вытяжки (рис. 1, б). Они разделяют однородный в исходном состоянии материал образца (рис. 1, а) на множество микроволокнистых образований, непрочно связанных между собой. Видно, что каждое из микроволокон несет сетку поперечных трещин. При вытяжке в вазелиновом масле трещины на поверхности лент не образуются (рис. 1, в). Вероятно, это обусловлено тем, что при ориентационной вытяжке ПП лент в пластификаторах происходит более равномерное прогревание полимерной ленты по всему объему. Еще одним положительным фактором при вытяжке в среде пластификатора является возможность исключить взаимодействие полимерного образца с кислородом воздуха, что снижает вероятность термоокислительной деструкции материала [3], [4].

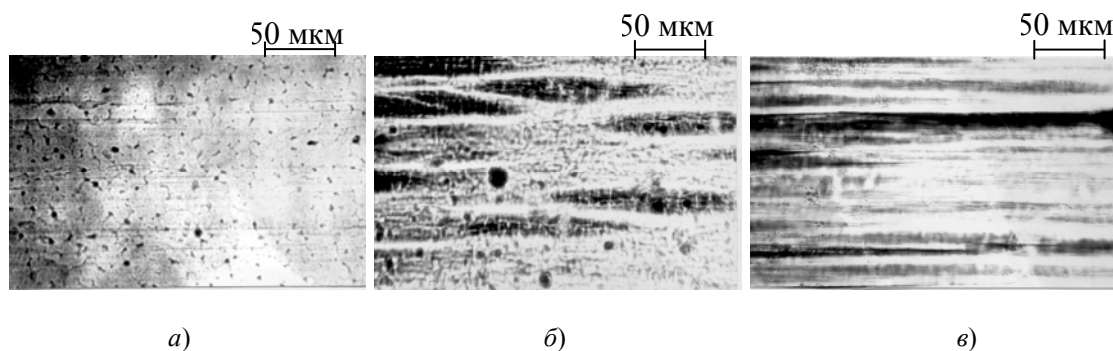


Рис. 1. Микрофотографии образцов ПП:  
а – исходного; б – подвергнутого ориентационной вытяжке на воздухе; в – в среде вазелинового масла

Полученные микрофотографии образцов указывают, что упрочнение полимерных образцов в процессе ориентационной вытяжки происходит вследствие преимущественного расположения макромолекул вдоль направления действия растягивающей силы. Перестроение структуры образцов при вытяжке совершается на масштабных уровнях как макромолекул, так и надмолекулярных образований. Под действием растягивающей силы ослабевают и частично разрушаются межмолекулярные связи и связи между фрагментами макромолекул, вследствие чего макромолекулярные цепи ориентируются. Последнее возможно при условии достаточной гибкости макромолекул. Это достигается при высокоэластическом состоянии полимера, которое реализуется при высоких температурах. Применение пластификатора позволяет снизить потери на внутреннее трение в полимере за счет ослабления связи между макромолекулами и надмолекулярными структурами.

Таким образом, ориентационная вытяжка полимерного материала в среде жидкого пластификатора, на примере ПП и вазелинового масла, позволяет уменьшить число дефектов на поверхности полимерных лент и, как следствие, повысить их деформационно-прочностные характеристики на 10 %.

## Литература

1. Винидиктова, Н. С. Влияние технологических добавок на прочностные характеристики полипропилена / Н. С. Винидиктова, Ж. В. Кадолич // Технология переработки и упаковки. – 2005. – № 1 (45). – С. 10–13.
2. Вазелиновое масло // Википедия. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вазелиновое\\_масло](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вазелиновое_масло). – Дата доступа: 01.04.2022.
3. Винидиктова, Н. С. Ориентационная вытяжка полимерных волокон в жидких средах с целью упрочнения и придания бактерицидности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 ; 05.17.06 / Н. С. Винидиктова ; ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2010. – 22 с.
4. Делокализованный крейзинг полимеров в жидких средах / А. Л. Волынский [и др.] // Высокомолекуляр. соединения. Сер. Б. – 1999. – Т. 42, № 3. – С. 549–564.

**ВЛИЯНИЕ ОГНЕУПОРНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОТЕКАНИЕ  
СМОЛЯНОГО ПРОЦЕССА В ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЯХ****Р. С. Романцов***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель И. Н. Прусенко

На современных литейных предприятиях используется большое разнообразие технологических процессов, позволяющих формировать необходимые эксплуатационные характеристики литейных стержней. В нашей стране хорошо зарекомендовали себя технологии групп «No bake» и «Cold box». Данные технологии основываются на применении песчано-смоляных смесей, которые обеспечивают высокую манипуляционную прочность, газопроницаемость литейных стержней с низкой газотворной способностью. Ввиду этого контроль параметров качества имеет важное значение в изготовлении отливок заданного химического состава с необходимыми размерной и геометрической точностью.

На основании литературных источников [1], [2] можно выделить два принципа технологического контроля параметров качества литейных стержней: исходные материалы, стержневые смеси. Причем исходные материалы песчано-смоляных смесей (синтетические смолы, огнеупорные наполнители, вспомогательные добавки) являются главными регуляторами технологического процесса получения качественных литейных стержней. Принято считать, что потенциально возможные прочностные и пластичные свойства песчано-смоляных смесей определяются характером и величиной сил когезионного воздействия [1] в зоне единичного контакта зерен огнеупорного наполнителя. Ввиду этого качественные и количественные характеристики огнеупорного наполнителя имеют значительное влияние на формирование механических свойств литейных стержней.

Для оценки их влияния были проведены исследования с использованием кварцевых огнеупорных наполнителей:  $1K_2O_102$ ,  $2K_2O_102$ ,  $2K_2O_1016$ . Проведенные лабораторные исследования позволили установить, что данные марки песков имеют сосредоточенную зерновую структуру, характеризуются средним размером зерен 0,18–0,28 мм, содержанием глинистой составляющей 0,2–0,5 %, низкоогнеупорных примесей 0,22–0,42 %, мелкодисперсной фракции 0,24–0,35 %.

Для исследования эксплуатационных свойств литейных стержней были изготовлены образцы, выполненные из данных марок песков с добавлением фурановой смолы Furtolit Q510 и отвердителя Hdrter SR45. При приготовлении песчано-смоляных смесей количество компонентов вводилось согласно нормам, рекомендованным производителем.

Таблица 1

**Характеристика полученных образцов, выполненных  
из исходных марок формовочных песков**

Образцы с использованием марок песков	Среднее значение прочности, МПа			Среднее значение газопроницаемости, ед.	Среднее значение газотворности, см <sup>3</sup> /г
	1 ч	4 ч	24 ч		
2K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 016	0,37	0,58	1,5	216	13
2K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 02	0,48	0,79	1,7	254	11
1K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 02	0,55	0,92	2,1	255	9

Как видно из табл. 1, все образцы имеют достаточно высокую газопроницаемость (более 200 ед.). Наибольшая прочность характерна для образцов, выполненных из формовочного песка 1K<sub>2</sub>O<sub>1</sub>02. Данный песок характеризуется наименьшим содержанием примесей и глинистой составляющей. Наименьшее значение прочности свойственно образцам, выполненным с использованием 2K<sub>2</sub>O<sub>1</sub>016. В данной марке песка установлено наибольшее количество примесей и глинистой составляющей. Кроме этого средний диаметр частиц данного песка составляет 0,16 мм, что говорит о большей удельной их поверхности и, как следствие, более тонкой «пленки» связующего в сравнении с 1K<sub>2</sub>O<sub>1</sub>02.

Для оценки влияния легкоплавких примесей (слюды, полевые шпаты, карбонаты, соединения железа) на основные эксплуатационные показатели (табл. 2) литейных стержней формовочный песок прокаливали в печи в течение 60 мин при температуре 1000 °С. После охлаждения навеска взвешивалась и далее повторно прокаливалась в течение 10 мин. Количество циклов прокалики определялось выходом на постоянство массы образца.

Таблица 2

**Характеристика полученных образцов, выполненных  
из формовочных песков после прокаливания**

Образцы с использованием марок песков	Среднее значение прочности, МПа			Среднее значение газопроницаемости, ед.	Среднее значение газотворности, см <sup>3</sup> /г
	1 ч	4 ч	24 ч		
2K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 016	0,42	0,62	1,7	218	9
2K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 02	0,52	0,85	2	259	8
1K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 02	0,61	0,98	2,2	257	8

Как видно из проведенного исследования, газопроницаемость образцов практически не изменилась, а газотворность уменьшилась. Это связано с очисткой исходных песков от щелочных оксидов и карбонатов, которые при температуре от 585 до 980 °С разлагаются с значительным газообразованием. Также следует обратить внимание на увеличение прочностных характеристик образцов, полученных с использованием прокаленных песков в сравнении с исходными. Считается, что низкоогнеупорные примеси активно взаимодействуют с отвердителем связующего компо-



нента, связывая его протоны, что нарушает формирование заданной химической структуры манжеты и, как следствие, ведет к снижению прочности образцов.

Для исследования влияния глинистой составляющей, содержащейся в огнеупорном наполнителе на эксплуатационные свойства литейных стержней, использовалась методика «отмучивания» предварительно прокаленных песков. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Характеристика полученных образцов, выполненных из формовочных песков после «отмучивания»**

Образцы с использованием марок песков	Среднее значение прочности, МПа			Среднее значение газопроницаемости, ед.	Среднее значение газотворности, см <sup>3</sup> /г
	1 ч	4 ч	24 ч		
2K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 016	0,42	0,62	2,1	219	9
2K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 02	0,52	0,85	2,4	262	8
1K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 02	0,61	0,98	2,5	258	8

В результате проведенного исследования установлено, что газотворность образцов не изменилась, а газопроницаемость не существенно увеличилась. Рост прочности образцов произошел за счет увеличения контактного взаимодействия зерен песка со связующим компонентом путем разблокирования от адгезированных на их поверхности частиц глинистой составляющей.

Для исследования влияния мелкодисперсной фракции на свойства литейных стержней и форм из песчано-смоляной смеси производили отсев фракций менее 005 из песков после прокаливания и «отмучивания». Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Характеристика полученных образцов, выполненных из формовочных песков без мелкодисперсной фракции**

Образцы с использованием марок песков	Среднее значение прочности, МПа			Среднее значение газопроницаемости, ед.	Среднее значение газотворности, см <sup>3</sup> /г
	1 ч	4 ч	24 ч		
2K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 016	0,53	0,7	2,3	225	9
2K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 02	0,58	0,93	2,6	268	8
1K <sub>2</sub> O <sub>1</sub> 02	0,64	1,2	2,6	267	8

В результате исследования отмечен рост газопроницаемости и прочности образцов. Вследствие удаления мелкодисперсной фракции произошло увеличение пористости структуры образцов и, как следствие, улучшение проходимости газов в их межзерновых каналах. Рост прочности связан с увеличением реологических свойств связующего вещества и равномерным формированием оболочек вокруг зерен песка. Присутствующая мелкодисперсная фракция увеличивает вязкость связующего компонента, замедляя протекание химических реакций для формирования стыковых манжет.

В данной работе проведены исследования влияния огнеупорных наполнителей  $1K_2O_{10}2$ ,  $2K_2O_{10}2$ ,  $2K_2O_{10}16$  на формирование прочности, газотворности и газопроницаемости. Было установлено, что параметры огнеупорного наполнителя оказывают существенное влияние на протекание смоляного процесса в литейных стержнях. При очистке кварцевых песков от легкоплавких примесей, глинистой составляющей, мелкодисперсной фракции происходит рост прочности на 23–53 % и газопроницаемости на 4–5 % с снижением газотворности на 12–31 %. В виду этого подбор кварцевых огнеупорных наполнителей для песчано-смоляных смесей является важной составляющей формирования необходимых свойств литейных стержней.

#### Литература

1. Жуковский, С. С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник / С. С. Жуковский. – М. : Машиностроение, 2010. – 256 с.
2. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства : в 2 ч. / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андрианов. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. – Ч. 1. Формовочные материалы и смеси. – 406 с.

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТОВОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ОТЛИВКИ

И. В. Предчанко

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

Научный руководитель И. Б. Одарченко

Решение задач по проектированию и оптимизации литейных технологий связано с необходимостью оценки технологичности отливок. Оценка технологичности основывается на определении в первую очередь геометрической сложности отливок и на практике проводится с использованием экспертного подхода. Вместе с тем современный аппарат математического моделирования и подходы, заложенные в CAD, CAM, CAE продуктах, создают возможность для комплексной разработки литейной технологии с применением автоматизированного процесса оценки геометрической сложности. В основе реализации такой возможности выступают современные программные продукты, позволяющие производить оценку геометрических параметров трехмерных моделей. При этом вопрос о возможности создания алгоритма компьютеризированной оценки сложности не решен в полной мере. В настоящее время отсутствует универсальная система признаков, характеризующих критериальные связи между параметрами геометрической сложности и технологичностью отливки, а также производственно-технологическими критериями их изготовления. Соответственно требуется разработка классификационной системы (кластеризация отливок), связывающей конструктивные особенности (признаки) отливок и необходимые технологические параметры процесса их производства. Это позволит перейти к универсальной системе признаков, способных охарактеризовать требования к технологии изготовления любой отливки. Очевидно, что геометрическая сложность коррелирует с затратами на обеспечение качества, трудоемкостью и ресурсоемкостью процессов получения отливок [1]. Поэтому предлагаемая кластеризация отливок, при ее создании, с минимальными затратами может быть доработана и использована в качестве основы в системах оценки себестоимости отливок и экономической эффективности процессов их производства.

Одним из методов быстрой оценки геометрической сложности отливок является параметрическое калькулирование. В основе параметрического калькулирования лежит предположение, что между технологической сложностью (или себестоимостью) и параметрами (конструктивными, технологическими или эксплуатационными) изделий существует зависимость, которую можно объективно определить количественно.

При решении задач кластеризации, отличающихся открытым множеством возможных классов, может быть использован интеллектуальный подход, который называется «кластеризацией с помощью самоорганизующихся нейронных сетей». Суть этого подхода состоит в том, что нейрон с вектором веса, наиболее близким к вектору входа, выигрывает конкуренцию в борьбе за этот вектор. Последующий рекуррентный алгоритм приведет к тому, что, когда на вход сети поступит достаточно большое количество векторов, каждая группа близких из них окажется связанной только с одним из нейронов слоя.

Подобная кластерная система позволяет разбиение отливок на однородные группы (кластеры или классы) [2]. Если данные выборки представить как точки в признаковом пространстве, то задача кластеризации сводится к определению «сгущений точек» (рис. 1).

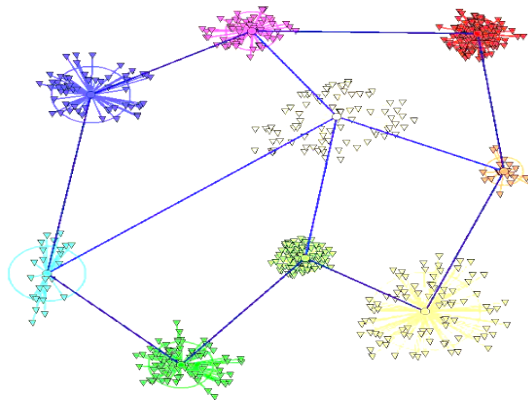


Рис. 1. Метаструктура кластеризованного блока диапазона записей базы данных

В искусственных нейронных сетях под понятием *кластер* понимается подмножество «близких друг к другу» объектов из множества векторов-характеристик. Следовательно, кластер можно охарактеризовать как группу объектов, имеющих общие свойства.

Кластеризация данных включает в себя следующие этапы:

а) *выделение характеристик*. Для начала необходимо выбрать свойства, которые характеризуют наши объекты, ими могут быть количественные характеристики, качественные характеристики и т. д.;

б) *определение метрики*. Следующим этапом кластеризации является выбор метрики, по которой мы будем определять близость объектов. Метрика выбирается в зависимости от пространства, в котором расположены объекты и неявных характеристик кластеров.

Результаты кластеризации должны быть представлены в удобном для обработки виде, чтобы осуществить оценку качества кластеризации. Обычно используется один из следующих способов: представление кластеров центроидами; представление кластеров набором характерных точек; представление кластеров их ограничениями.

Достоинство кластерного анализа состоит в том, что он работает даже в том случае, если данных мало и не выполняются требования нормальности распределений случайных величин и другие требования классических методов статистического анализа.

Технология нейросетевого моделирования может быть адаптирована к условиям конкретной автоматической формовочной линии. В этом случае, при наличии накопленной базы данных по технологическим параметрам, можно проводить не только оценку технологичности, но также выполнять точное прогнозирование себестоимости и связанных технико-экономических показателей производства, а в общем случае определять рациональность производства конкретной отливки на определенной автоматической линии, исходя из актуальных макроэкономических параметров. Пример структуры базы параметров отливок представлен на рис. 2.

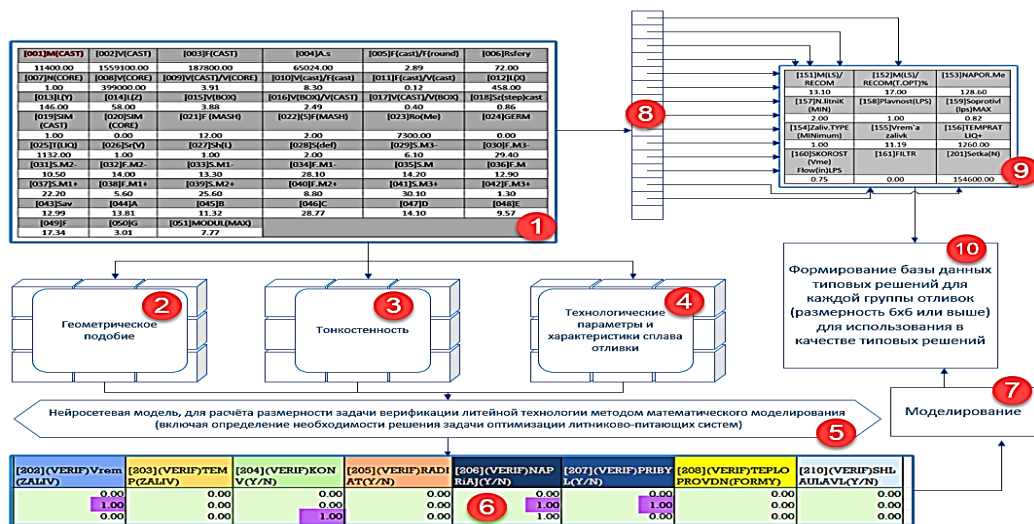


Рис. 2. Структура базы параметров отливок

Нейросетевая кластеризация обеспечивает генерацию матрицы групп отливок в количестве  $6 \times 6$  (36 индивидуальных групп отливок по комплексной технологической сложности), матрицы  $3 \times 3$  (9 индивидуальных групп отливок по технологической идентичности) и матрицы  $6 \times 6$  (по геометрическому подобию) (рис. 3).

При кластеризации отливок нейронная сеть обучается по важнейшим параметрам технологии, таким как характеристики 3D-модели геометрии отливки, особенностям заполнения формы расплавом, требованиям к качеству изготовления и допускаемым дефектам. В процессе обучения выделяют особенности, отличающие отливки друг от друга, которые составляют информационную базу для принятия решений о назначении отливок соответствующим классам. Информация о каждой отливке представлена в виде вектора конструктивных и технологических характеристик, которые наиболее достоверно соответствуют требованиям моделирования нейронной сети.

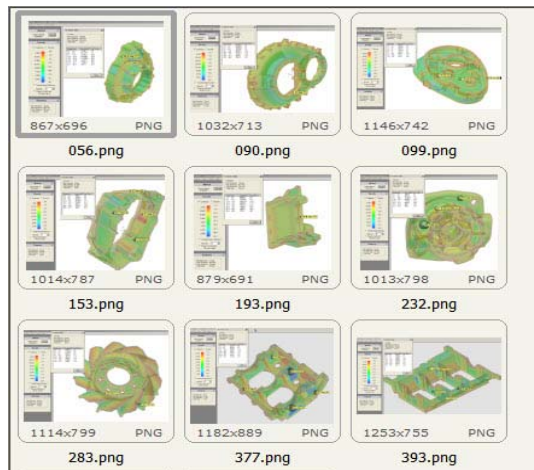


Рис. 3. Иллюстрация подгруппы отливок по конструктивной идентичности

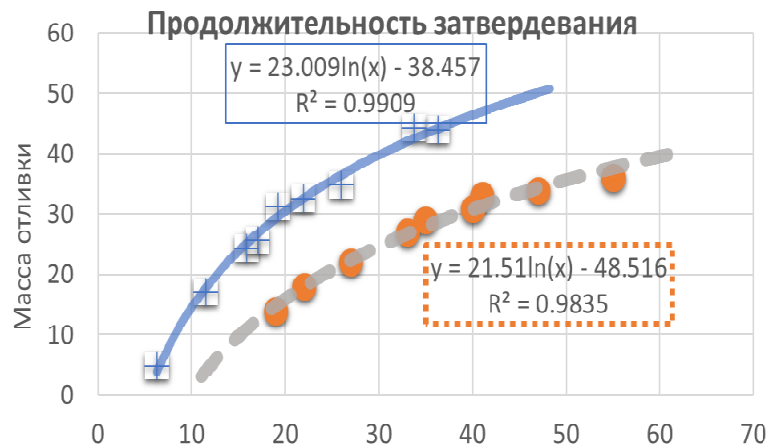


Рис. 4. Регрессионный анализ продолжительности затвердевания группы отливок одного кластера в зависимости от массы отливки

На рис. 4 представлен график регрессионного анализа зависимости продолжительности затвердевания (результаты моделирования) двух кластеризованных групп из базы данных отливок. Анализ графика показывает высокую степень точности прогностических зависимостей в пределах одного кластера отливок.

#### Литература

1. Одарченко, И. Б. Интеграция нейросетевых моделей в процессы технологической подготовки производства отливок / И. Б. Одарченко, В. А. Жаранов, И. Н. Прусенко // Литье и металлургия. – 2018. – № 4 (93). – С. 45–49.
2. Прусенко, И. Н. Применение средств компьютерного анализа в классификации сложности отливок / И. Н. Прусенко, В. А. Жаранов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 107–110.

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИМПЛАНТОВ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА

А. А. Кашперов

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

Научный руководитель Ж. В. Кадолич

Опорно-двигательный аппарат человека – сложная биофизическая система, достигшая в процессе эволюционного развития оптимальной структурной организации. С технической точки зрения сустав – это биологический узел трения, в котором реализуются движения, разные по объему, характеру и степеням свободы. Многообразие форм суставов человека практически не позволяет представить их функциональные особенности с помощью единой унифицированной модели [1].

История эндопротезирования суставов началась в 1890 г., однако этот опыт эндопротезирования представляет интерес только в историческом плане. Лишь в 30-е гг. XX в. в области эндопротезирования крупных суставов были предприняты серьезные шаги. К настоящему времени разработаны и апробированы различные варианты конструкций эндопротезов суставов, отличающиеся по критериям дизайна, трибологическим аспектам, способам крепления и т. д. [2].

Тазобедренный сустав – классический пример сочленения костей, допускающего три степени свободы, и все современные конструкции эндопротезов тазобедренного сустава примерно повторяют его природную геометрию [1]–[3]. Самая распространенная на сегодняшний день конструкция тотального эндопротеза тазобедренного сустава (рис. 1) является разъемной и включает два основных компонента: тазовый и бедренный. Тазовый (или ацетабулярный) компонент состоит из закрепляемой в вертлужной впадине металлической детали (чашки), которая несет вкладыш с вогнутой сферической поверхностью. Бедренный (феморальный) компонент выполнен в виде закрепляемого в мозговом канале берцовой кости фасонного стержня – ножки, снабженной шейкой, на которую надета шаровая головка, образующая пару трения со вкладышем [1].

Цель данной работы – проанализировать номенклатуру материалов, применяемых в паре трения тотального эндопротеза тазобедренного сустава.

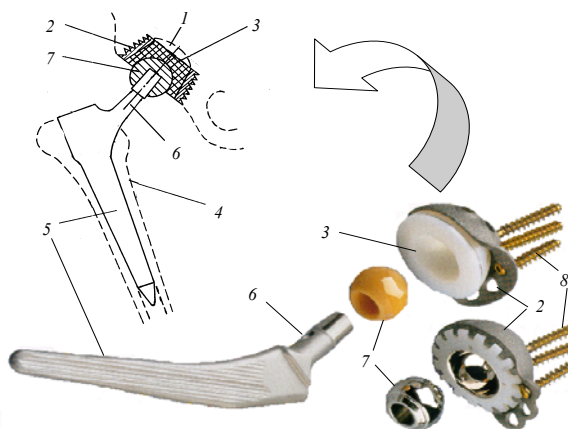


Рис. 1. Типичная конструкция тотального эндопротеза тазобедренного сустава:  
1 – вертлужная впадина; 2 – металлическая чашка; 3 – вкладыш;  
4 – берцовая кость; 5 – ножка эндопротеза; 6 – шейка ножки;  
7 – металлическая (или керамическая) головка; 8 – элементы крепления

Совокупность материалов, из которых изготавливают подобные эндопротезы (рис. 1), составляют технические материалы, к которым предъявляются следующие требования:

- биологическая совместимость с живым организмом;
- коррозионная стойкость в физиологических жидкостях;
- достаточная прочность и износостойкость;
- стойкость при стерилизации, облучении (СВЧ, рентгеновское, гамма-облучение);
- стабильность свойств при длительном функционировании в организме;
- технологичность при переработке;
- приемлемая для потребителя стоимость.

Практически все конструкционные полимерные материалы (полиэтилен (ПЭ), полиамид (ПА), политетрафторэтилен (ПТФЭ), полиоксиметилен (ПОМ), полиэтилентерефталат (ПЭТФ), сложные полиэфиры и др.) были применены для изготовления полимерного компонента тотального эндопротеза тазобедренного сустава [4], [5]. Сочетание материалов в парах трения современных эндопротезов основывается на многолетнем опыте эндопротезирования, который до сих пор, к сожалению, достаточно противоречив. Критерием правильности выбора являются только результаты работы материалов *in vivo* в составе эндопротеза. В таблице обобщены результаты использования комбинаций материалов в парах трения эндопротезов тазобедренного сустава.

#### Комбинация материалов в парах трения тотальных эндопротезов тазобедренных суставов

Материал головки	Материал чашки					
	полимеры				металл	керамика
	ПТФЭ	СВМПЭ	ПОМ	ПЭТФ	CoCrMo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
FeCrNiMo	×	++	•	•	–	–
FeCrNiMoNbN	•	++	•	•	–	–
CoCrMo	•	++	×	×	++	–
TiAlV	•	×	–	–	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	•	++	•	•	–	++
ZrO <sub>2</sub>	•	+	•	•	–	–

*Примечание.* ++ многолетнее клиническое использование; + клиническое апробирование; – непригодно по техническим причинам; × клинически непригодно; • не исследовалось.

Анализ данных таблицы свидетельствует о следующем. Единственным полимерным материалом, надежно зарекомендовавшим себя в парах трения тотальных эндопротезов суставов, является СВМПЭ. Попытки заменить СВМПЭ другими материалами не привели к успеху. В работах [1], [2], [5] обобщены данные, свидетельствующие о том, что продукты изнашивания полиамидов вызывают воспалительную реакцию мягких тканей и осложнения после эндопротезирования. Даже лучший из полимеров – антифрикционный ПТФЭ – не проявил достаточной надежности при длительной эксплуатации. В последние годы на основании многолетнего изучения отдаленных результатов имплантации тотальных эндопротезов тазобедренных суставов установлен следующий ряд пар трения по уменьшению скорости изнашивания: металл–СВМПЭ > керамика–СВМПЭ > металл–металл > керамика–керамика.

Следует также отметить, что пара трения СВМПЭ – сплав CoCrMo до сих пор используется в большинстве конструкций тотальных эндопротезов суставов из-за минимальной цены, низкого коэффициента трения, технологичности при изготовлении, несложности монтажа и хорошей прирабатываемости [2]. Выбор СВМПЭ обусловлен его высокой прочностью ( $\sigma_p = 45$  МПа) и биосовместимостью [6]. Он легко поддается модифицированию, ему можно придавать заданные структуру и свойства в процессе технологической обработки [5]. Кроме того, использование легко деформируемого СВМПЭ обеспечивает «комфортность» ходьбы, так как компенсирует толчковые нагрузки на вертлужную впадину [1], [2]. На международном рынке СВМПЭ представлен базовыми марками и различными композициями – Hostalen Gur 4120, Chirulen DIN 58836C и т. д. Указанные марки СВМПЭ традиционно используются для изготовления полимерных деталей ведущими производителями эндопротезов суставов [7].

Таким образом, обобщая приведенные выше данные, можно сделать вывод о том, что из номенклатуры полимеров для применения в медицине каждый материал обладает определенными достоинствами, однако по комплексу характеристик именно СВМПЭ является наиболее перспективным для формирования на его основе композиций и изделий для эндопротезирования суставов.

#### Литература

1. Николаев, В. И. Асептическая нестабильность ацетабулярного компонента эндопротезов: биофизические аспекты, диагностика, лечение и профилактика (клиническое и экспериментальное исследование) : дис. ... канд. мед. наук : 14.00.22 / В. И. Николаев. – Минск, 2000. – 93 с.
2. Пинчук, Л. С. Эндопротезирование суставов: медицинские и технические аспекты / Л. С. Пинчук, В. И. Николаев, Е. А. Цветкова. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2003. – 308 с.
3. Купчинов, Б. И. Биотрибология синовиальных суставов / Б. И. Купчинов, С. Ф. Ермаков, Е. Д. Белоенко. – Минск : Веды, 1997. – 272 с.
4. Мовшович, И. А. Полимеры в травматологии и ортопедии / И. А. Мовшович, В. Я. Виленский. – М. : Медицина, 1978. – 320 с.
5. Кадолич, Ж. В. Физическое модифицирование сопряжений полимер-металл для повышения их износостойкости на основе моделирования биофизических свойств естественных суставов : дис. ... канд. тех. наук : 01.04.07 / Ж. В. Кадолич. – Гомель, 2002. – 128 с.
6. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен / И. Н. Андреева [и др.]. – Ленинград : Химия, 1982. – 80 с.
7. Проспект фирмы Hoechst, 1993. – 8 с.

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РОЛИКОВ ОБРАТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ «ОБРАТНЫЙ НАМОТ» НА ДУГУ ПРОГИБА МЕТАЛЛОКОРДА В ПРОЦЕССЕ РЕЛАКСАЦИИ**

**О. Ю. Ходосовская**

*ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин,  
Республика Беларусь*

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Метизное производство находится в постоянном поиске способов совершенствования способов свивки на металлокорда на катаных машинах. Одним из важнейших требований, предъявляемых к канатным машинам, является обеспечение таких технологических характеристик металлокорда, как заданное значение остаточного кручения, нераскоручиваемость и прямолинейность. Механические и технологиче-



ские свойства металлокорда в значительной степени зависят от вида обработки после формирования геометрии профиля перед приемными устройствами. В современном метизном производстве начали использоваться ролики обратной деформации в системе «обратный намот» перед приемной катушкой. Основным принципом действия этих устройств заключается в перераспределении остаточных напряжений и деформации в готовой продукции.

Цель настоящего исследования – определить влияние ролика обратной деформации при свивке на технологические свойства металлокорда.

Для определения влияния ролик обратной деформации на дугу прогиба металлокорда в процессе релаксации было проведено исследование при изготовлении металлокорда конструкции  $2 \times 0,30\text{НТ}$ . На канатной машине типа СД + ТД, настроенной по действующей серийной технологии с использованием ролика диаметром 56 мм в системе «обратный намот» (этап I), изготовили три катушки металлокорда. Требования к металлокорду при запуске канатной машины:

- дуга прогиба не более 10мм/600 мм;
- остаточное кручение от 0,5 до 1,5 об/м.

После выполнения данного этапа канатная машина была оснащена роликом диаметром 44 мм (этап II) и выполнена настройка без заправки через ролик до требований, указанных выше. Затем произведена заправка металлокорда через ролик обратного изгиба (этап III) и изготовлено три катушки металлокорда.

Данные по распределению среднего значения дуги прогиба металлокорда, по этапам изготовления, в процессе релаксации представлены на рис. 1.

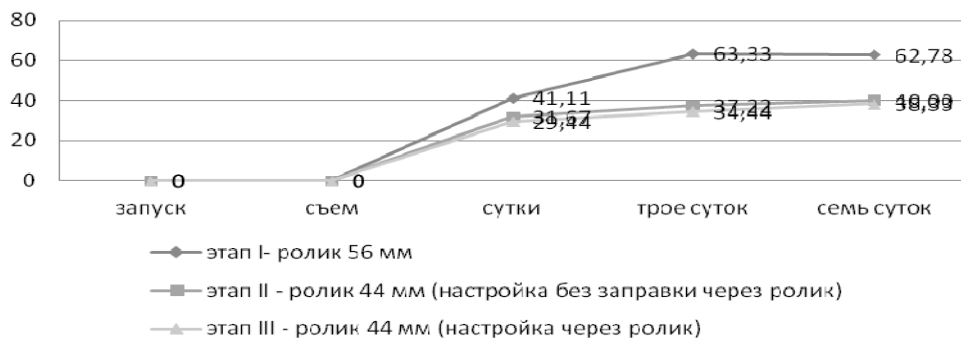


Рис. 1. Диаграмма изменения дуги прогиба металлокорда конструкции  $2 \times 0,30\text{НТ}$

Из данных графика следует, что значительное изменение дуги прогиба металлокорда, на всех этапах, происходило в течение первых суток выдержки, причем изменение значения составило до 3–4 раз.

Дальнейшая релаксация в течение следующих трех суток на этапе I также продолжалась со значительным изменением дуги прогиба и составило более 60 мм, что в 6 раз выше значения дуги прогиба металлокорда при съеме с канатной машины и стабилизировалось по истечении семи суток выдержки. На этапе II и III также происходило изменение значения дуги прогиба, но с меньшим значением: при трех сутках выдержки оно в среднем составило 34–37 мм, а через семь суток 38–40 мм.

Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии ролика диаметром 44 мм на конечную дугу прогиба металлокорда в процессе релаксации.

Была проведена работа по оценке влияния ролика обратной деформации диаметром 55 мм в системе «обратный намот» на дугу прогиба металлокорда конструк-

ции  $2 \times 0,30\text{SHT}$  в процессе релаксации. Свивка металлокорда производилась на машинах ТД 2/401. Чтобы обеспечить нераскручиваемость проволок металлокорда применялся 2-роликовый деформатор с диаметром деформирующего ролика 3,0 мм. В процессе наработки была отмечена повышенная непрямолинейность металлокорда после 3-суточной выдержки (около 100 %, превышение стрелы прогиба более 60 мм/600 мм). Для решения данной проблемы на укладчик намотки готового металлокорда был установлен ролик обратной деформации диаметром 55 мм. При этом угол между направляющим роликом и роликом обратной деформации сначала составлял  $130^\circ$ . Отбраковка по непрямолинейности стиснизилась примерно на 50 %. После установки угла в  $90^\circ$  (рис. 2) отбраковка металлокорда по выдержке в течение 3-х суток уменьшилась практически до нуля.

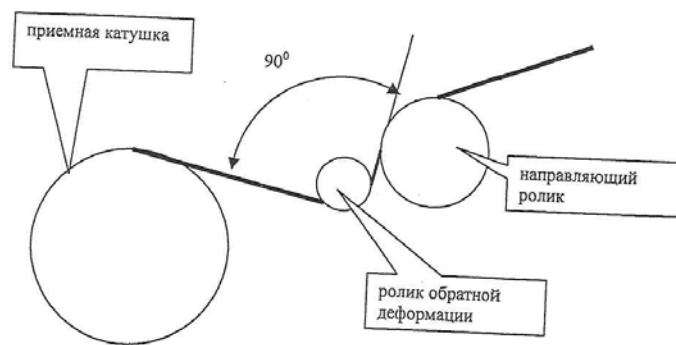


Рис. 2. Расположение ролика обратной деформации по отношению к направляющему ролику

В результате был наработан опытный лот в объеме 1008 катушек. В процессе наработки опытной партии металлокорда конструкции  $2 \times 0,30\text{SHT}$  проводилась оценка изменения величины остаточного кручения и прямолинейности во времени. На рис. 3 и 4 показаны изменения средних значений по партиям остаточного кручения и прямолинейности, полученных на канатном участке и линии инспекции.

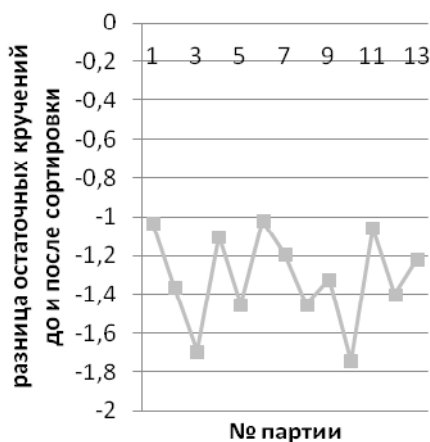


Рис. 3. Средние остаточные кручения до и после сортировки

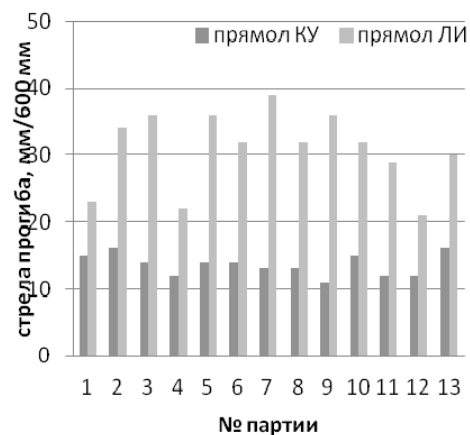


Рис. 4. Средние значения стрелы прогиба металлокорда

Средний уровень изменения остаточного кручения в процессе релаксации для металлокорда  $2 \times 0,30$  SHT составил  $-1,31$  об/м. Средний уровень роста отклонения от прямолинейности в процессе релаксации для металлокорда конструкции  $2 \times 0,30$  SHT составил  $17,4$  мм/600 мм. По уровню максимальной стрелы прогиба имеются отдельные катушки с непрямолинейностью более 40 мм и только в одной партии.

На рис. 5 показано долевое распределение средних значений по непрямолинейности: при съеме катушек с канатных машин на канатном участке и после 3-суточной выдержки на линии инспекции.

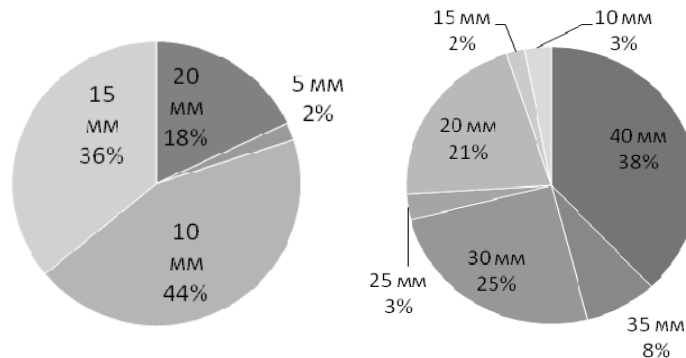


Рис. 5. Распределение уровней непрямолинейности металлокорда на КУ и ЛИ

Согласно анализу данных, представленных на рис. 5, видно, что основная масса образцов металлокорда с канатных машин с непрямолинейностью 10–15 мм/600 мм после 3-суточной выдержки перемещается до уровня 30–40 мм/600 мм.

Определены значения технологических параметров металлокорда, полученные с применением роликов обратной деформации. Угол между направляющим роликом и роликом обратной деформации должен составлять  $90^\circ$ . Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии роликов обратной деформации на конечную дугу прогиба металлокорда в процессе релаксации.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ

Е. С. Тимофеев

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

В электродуговых печах на каждую тонну жидкой стали образуется 10–30 кг пыли из соединений железа, марганца, алюминия, кремния, магния, хлора, хрома и фосфора. Большое количество вредных выбросов образуется как при подготовительных работах, так и при последующей обработке металлов. Необходимость снижения пылеобразования и разработки технологии утилизации пыли обусловлена негативным воздействием пыли на окружающую среду и здоровье человека.

В литературе нет принятой методики количественной оценки интенсивности пылеобразования по технологическим параметрам. Рекомендации по оценке пылевыделения позволяют прогнозировать и контролировать твердые выбросы. Изучение

процессов дугового испарения и свойств пыли (рис. 1) позволяет определить условия минимального пылеобразования, а также использование собранной из систем очистки пыли. Объективные данные по составу и объемам выбросов позволяют выбрать адекватные средства защиты окружающей среды для каждого агрегата и принять наиболее экономичные решения при организации или реконструкции плавильных отделений металлургических и литейных цехов.

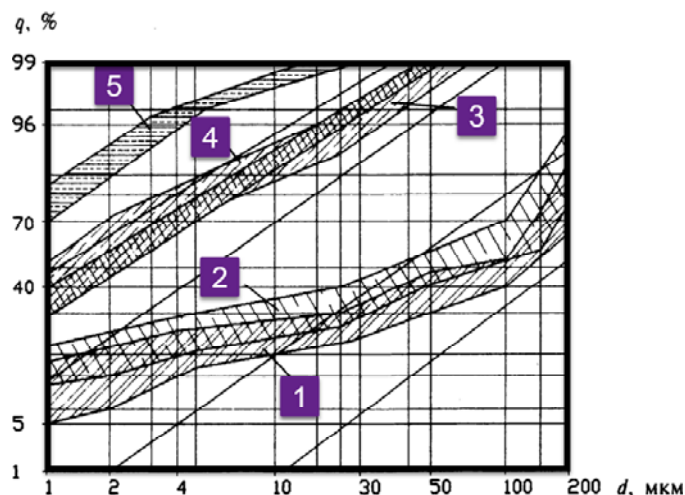


Рис. 1. Дисперсный состав аэрозолей плавильных печей:  
1 – вагранка холодного дутья; 2 – вагранка горячего дутья;  
3 – электродуговая печь; 4 – индукционная печь; 5 – конвертер

Потеря металла в виде пыли при удалении его из печи снижает объем выплавки годного на 2–5 %. Для металлургического предприятия с годовым производством стали 1 млн т запыленность может достигать 32000 т в год. Основная часть плавильной пыли не перерабатывается, а идет в хранилища и шламонакопители, несмотря на то, что данная пыль является ценным вторичным сырьем. По химическому составу пыль, выбрасываемая из электросталеплавильных печей, состоит преимущественно из оксидов железа. В период расплавления суммарное количество окислов железа составляет около 80 %, в период кипения (при продувке кислородом) – 62 %, в период доводки – 53 %.

Главными причинами проблем с улавливанием и утилизацией плавильной пыли являются ее дисперсность и нестабильный химический состав.

Согласно теории испарительного механизма пылеобразования, расплавленная пыль является материалом первичной зоны реакции, который испаряется, а затем восходящий пар конденсируется в низкотемпературной части печи. Согласно теории механизма диспергирования большую роль в образовании частиц играет лопание пузырьков оксида углерода при активном кипении стальной ванны.

Основную часть пыли ДСП представляют мелкие частицы (менее 20 мкм) в основном сферической формы размерами 0,2–20 мкм. Определены сферические частицы трех типов: гомогенные, по составу соответствующие металлу ванны или шлаку; гетерогенные (дендриты железа с включениями стекловидной фазы), состоящие из шлака и металла, обогащенного Zn; нанометровые – из чистого ZnO, в основном монокристаллы. Частицы размером менее 2 мкм часто присутствуют в виде агломератов таких частиц или скоплений мелких частиц вокруг больших, также встречаются полые частицы, когда их диаметр превышает 2–3 мкм.

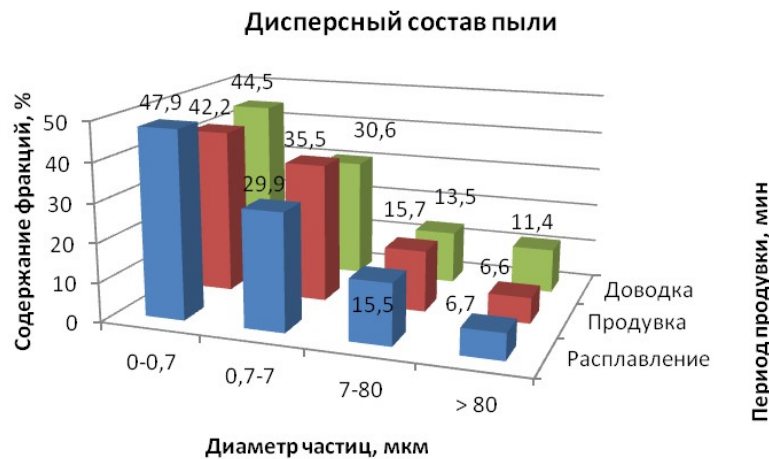


Рис. 2. Дисперсный состав пыли в газах, выходящих из электропечей, выплавляющих хромистые и среднеуглеродистые сплавы

Многочисленные исследования показали, что скорость пылевыведения зависит от тепловых факторов (температура зоны реакции, содержание примесей и скорость горения, температура ванны металла), а также аэродинамических и технических факторов (интенсивность тепломассопереноса, площадь поверхности зоны реакции, потребление кислорода, скорость шлакообразования и др.).

Основным доказательством испарительного механизма образования плавильной пыли является малый размер ее частиц – менее 1 мкм. Данное обстоятельство может быть также подтверждено химическим и морфологическим составом частиц пыли.

Для определения химического состава плавильной пыли необходимо предварительно определить массу всех основных испарившихся компонентов расплава. Сумма данных величин принимается за 100 % плавильной пыли. Затем по общей массе пыли определяется процентная доля каждого компонента, т. е. химический состав образующейся пыли. Способы снижения выбросов делятся на два основных вида: первичные мероприятия, направленные на подавление процесса образования отхода, и вторичные – улучшение способа отвода загрязненной газовой смеси и усовершенствование газоочистного оборудования. В сталеплавильном производстве применяют оба вида природоохранных мероприятий.

Анализ результатов численного исследования математической модели процесса пылеобразования в сталеплавильных печах подтвердил, что основным фактором, влияющим на массу образующейся плавильной пыли, является температура реакционной зоны, определяемая теплом окисления примесей или подводом энергии извне. Наиболее эффективным способом снижения выбросов плавильной пыли из конвертеров и ДСП является уменьшение температуры реакционной зоны в сталеплавильных печах.

По результатам расчетов установлено, что скорость дистилляции и, следовательно, масса пыли находятся в экспоненциальной зависимости от температуры реакционной зоны. Очевидно, что наиболее эффективным мероприятием по снижению выбросов пыли является снижение температуры реакционной зоны, особенно при достижении  $T_{p,z}$  высоких значений (более 2300 К). Тем не менее корректировку данного параметра следует проводить в пределах, не нарушающих технологический регламент плавки, поскольку это может привести к ухудшению экономических и экологических показателей всего процесса.

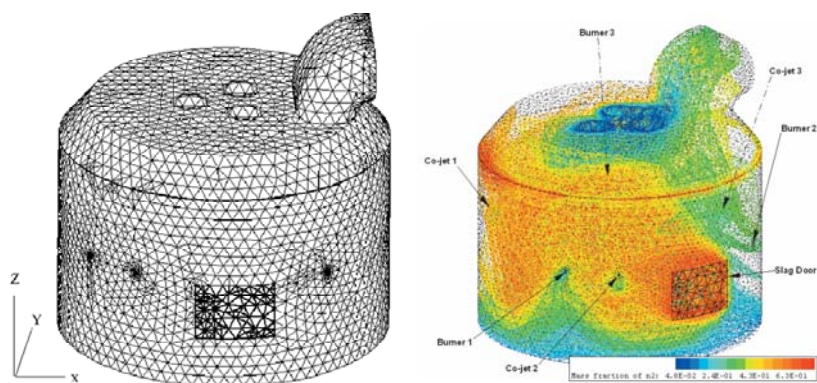


Рис. 3

Проведенные численные исследования математического описания образования плавильной пыли показывают, что значительно увеличить размер частиц плавильной пыли в процессе ее образования невозможно, так как это обусловлено закономерностями процессов испарения и конденсации паров жидкости. Для повышения эффективности ее улавливания пылеочистными аппаратами различного типа необходимо использовать различные способы ее коагуляции: на каплях жидкости, в электростатическом, магнитном и акустическом полях. Для улучшения улавливания выбросов плавильной пыли следует усовершенствовать конструкцию укрытия печей и не допускать образования неорганизованных выбросов в атмосферу в периоды наиболее интенсивного пылевыведения, а также использовать газоочистное оборудование, рассчитанное на улавливание пыли размеров менее 1 мкм, и применять способы коагуляции частиц пыли.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ШИХТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ ЕМКОСТИ

**Н. О. Магомедов**

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

Дуговые печи обладают высокой производительностью и возможностью получать металл высокого качества из различной шихты. Однако 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. На рис. 1 представлены лишь некоторые из наиболее значимых мероприятий, внедрение которых привело к сокращению удельных затрат электроэнергии при дуговой плавке в 2,5 раза, расхода электродов в 4,3 раза, продолжительности плавильной кампании почти в 5 раз. При всей условности приведенных зависимостей, интерполированных до 2025 г., можно заметить, что если технологические возможности плавки – показателями чего являются производительность (длительность кампании) и удельный расход электродов – близки к максимально возможным для ЭДП, то в отношении удельных затрат электроэнергии перспективы далеко не исчерпаны.

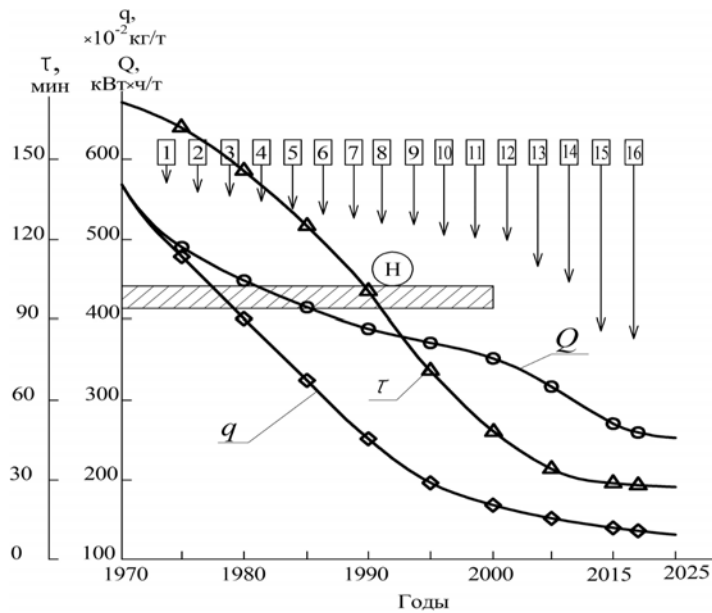


Рис. 1. Влияние методов интенсификации на основные технико-экономические параметры выплавки стали в электродуговых печах:

$\tau$  – продолжительность плавки;  $q$  – удельный расход электродов;  $Q$  – удельный расход электроэнергии;  $H$  – суммарная энтальпия жидких стали и шлака, кВт; 1–16 – методы интенсификации, соответственно: применение кислорода, жидкая завалка, внепечная обработка, водоохлаждаемые панели, повышение мощности трансформаторов (сверхмощные печи), компьютеризация (АСУ ТП), вспененные шлаки, газоокислородные горелки, донный выпуск, печь-ковш, эркерный выпуск, подогрев скрапа (сушка), фурмы-манипуляторы, донная продувка, высокотемпературный подогрев шихты, комплексные плавильные агрегаты с непрерывным подогревом шихты

Теоретически наиболее эффективным способом сокращения затрат электроэнергии является предварительный подогрев шихты. Он обеспечивает экономию до 200 кВт·ч на тонну выплавляемой стали. Предварительный нагрев лома перед нагревом позволяет увеличить энтальпию металлической шихты в десять раз и, следовательно, резко снизить потребление энергии при плавке. Данный способ позволяет также ускорить процесс плавки.

Было предложено множество различных способов и устройств, использующих топливо и тепло отходящих газов для подогрева скрапа перед плавкой. Но лишь некоторые из них были реализованы на практике в промышленных масштабах. Несмотря на разнообразие конструкций, все они были основаны на одном из двух принципиально разных способов нагрева: либо нагрев всей кучи лома в емкости большого объема, либо нагрев относительно тонкого слоя лома на конвейере.

Подогрев шихты может осуществляться: нагревом газовыми или газокислородными горелками в рабочем пространстве печи; в камерных, шахтных или проходных газовых печах; в стационарных или вращающихся электрических печах; в специальных установках, конструктивно совмещенных с плавильной печью, за счет тепла отходящих газов; в загрузочных корзинах на автономных установках.

Использование для подогрева шихты в бадьях отходящих печных газов создает дополнительные трудности из-за нестабильности режимов работы печи, колебаний

температуры и расходов газов (рис. 2). На входе в бадью параметры газового потока необходимо стабилизировать по температуре во избежание перегрева и коробления корпуса, а при понижении температуры отходящих газов включать газовые горелки для интенсификации подогрева шихты.

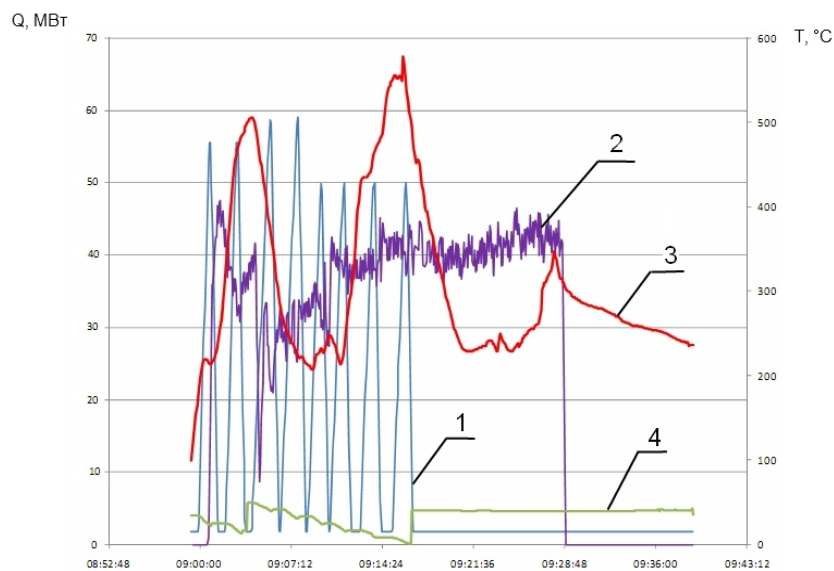


Рис. 2. Изменения температурного режима по ходу плавки (координаты: потребляемая мощность – время):  
 1 – загрузка очередной порции 20 т; 2 – потребляемая мощность; 3 – температура отходящих газов;  
 4 – масса шихты в шахте подогревателя

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.

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. Задача описания течения газов описывается законами неразрывности, сохранения моментов и энергии. Эти законы выражаются в виде дифференциальных уравнений в частных производных.

Исследования температурного режима нагреваемого слоя шихты показали, что имеется близкое совпадение характера процесса и распределения температур в слое кускового материала и нагреваемой сплошной заготовке при идентичных коэффициентах теплопроводности. Это позволяет сделать предположение об использовании уравнения Фурье для описания процесса подогрева шихты в слое, где решающую роль играет конвекция.

В этом случае для упрощения расчетов коэффициент теплового сопротивления можно принять постоянным в диапазоне температур процесса.



В общем виде уравнение Фурье–Кирхгофа для сплошной среды имеет вид:

$$\frac{Dt}{d\tau} = a\nabla^2 t,$$

где  $\frac{Dt}{d\tau}$  – полная производная температуры;  $\nabla^2 t$  – оператор Лапласа;

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

где  $\lambda$  – необходимо в данном случае отнести ко всему слою, также как коэффициент теплоемкости  $c$  и плотности  $\rho$ .

Коэффициент теплопроводности можно рассчитать как суммарный, состоящий из парциальных вкладов металла и газовой прослойки. В этом случае мы получим значение, крайне близкое к экспериментальному. Для определения диаметра элементов слоя можно использовать статистические данные по результатам типичных засыпок из шихтовых материалов.

После преобразований получим выражение для текущей температуры:

$$t = \frac{\Delta T_{\text{и}}}{2\sqrt{\pi a_{\text{пр}} \tau}} \exp\left(-\frac{(x-h)}{4a_{\text{пр}} \tau}\right) dh,$$

где  $\Delta T_{\text{и}}$  – температура источника, в данном случае – газов на входе в слой;  $h$  – высота слоя.

Исследования процесса нагрева шихты в слое за счет продувки горячими газами производится на основе теории подобия, которая предполагает в качестве обязательного условия равенство критериев модели и реального процесса (прототипа), обуславливающих тепло- и массообмен. По результатам расчетов строятся картины распределения температур по слою шихты.

## **ВЛИЯНИЕ НАСТРОЙКИ РИХТОВАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА В УЗЛЕ НАМОТКИ ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА НА ПРЯМОЛИНЕЙНОСТЬ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ**

**Ю. В. Мартьянов, В. М. Рудницкий**

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Повышение прямолинейности тонкой проволоки и металлокорда является на сегодняшний день актуальной задачей метизного производства в связи с необходимостью повышения технологичности производства, снижения брака при производстве и повышения конкурентоспособности. В современном метизном производстве для повышения прямолинейности проволоки и металлокорда используются рихтовальные устройства. Рихтовальное устройство работает по принципу знакопеременного изгиба, снижая уровень внутренних остаточных напряжений в проволоке. Таким образом снижается релаксация остаточных напряжений, что приводит к повышению прямолинейности металлокорда [1]. Роликовая рихтовка одинаково эффективна для твердых

и мягких материалов и мало зависит от исходной прочности проволоки. Рихтовальное устройство изменяет внутренние напряжения с устранением условий внутреннего напряжения, существующих в материале до рихтовки. Величина и распределение внутренних напряжений, существующих после рихтовки, зависят от конструкции рихтовальной системы и от настройки положения роликов [2].

Цель работы – определить влияние настройки рихтовального устройства в узле намотки волочильного стана на прямолинейность тонкой проволоки.

Объект исследования – тонкая стальная латунированная проволока диаметром 0,35 мм класса прочности НТ.

Инструмент: рихтовальное устройство односекционное на базе семи роликов (три верхних, четыре нижних) с индивидуальным регулированием верхнего ряда роликов; диаметр роликов 16 мм.

Общий вид рихтовального устройства представлен на рис. 1.

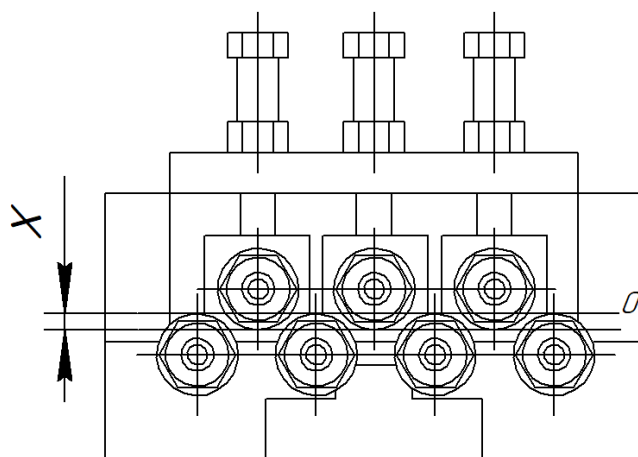


Рис. 1. Общий вид рихтовального устройства:  
 $x$  – вертикальная координата положения  
 верхнего ряда роликов рихтовки, мм

**Описание эксперимента.** Изменяемый параметр: положение верхнего ряда роликов, осуществляющее прижим и контролируемый изгиб тонкой проволоки в диапазоне от 0 до 2,4 мм. Прижим осуществляется за счет хода прижимного винта с шагом резьбы 0,8 мм. Выполнение эксперимента проводилось в течение семи суток для уменьшения остаточных напряжений в процессе их релаксации в проволоке, помещенной на катушке диаметром 80 мм.

Перед началом лабораторных испытаний рихтовальное устройство полностью разжато. Подготовленный отрезок проволоки диаметром 0,35 мм класса прочности НТ заправляется в рихтовальное устройство с разжатыми роликами. Верхний регулируемый ряд роликов рихтовального устройства опускается до момента касания роликами тонкой проволоки. Для блокировки ходового винта, регулирующего положение роликов рихтовки используется зажимная гайка. Полученное положение роликов принимается нулевым.

Немного ослабив зажимную гайку, верхний ряд роликов опускается на расстояние, равное одному шагу резьбы ходового винта. Далее проволока протягивается через рихтовку на длину, достаточную для отрезки минимум пяти образцов длиной более 600 мм плюс один метр запаса для отрезки начала и конца проволоки. Полученные образцы длиной более 600 мм измеряются на отклонение от прямоли-

нейности на базе 600 мм, маркируются и помещаются на катушку диаметром 80 мм. Эксперимент повторяется для положений роликов рихтовального устройства, равным двум и трем шагам резьбы ходового винта.

Результаты представлены в виде диаграммы, представленной на рис. 2.

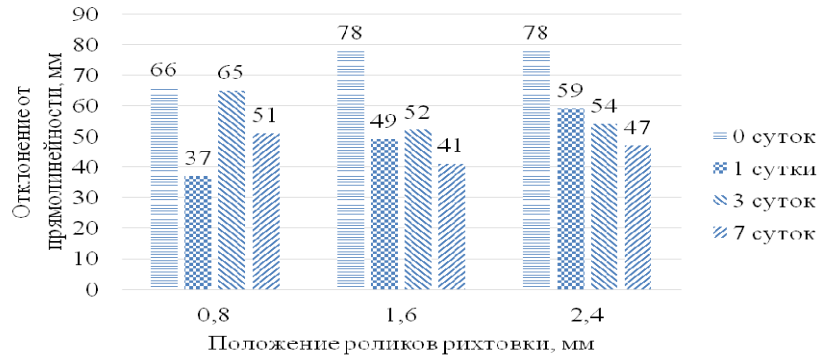


Рис. 2. Отклонение от прямолинейности проволоки диаметром 0,35HT после испытаний в рихтовальном устройстве

Как видно из рис. 2, наибольшим абсолютным эффектом по истечении семи суток обладает настройка рихтовального устройства с положением роликов, равным 1,6 мм. Положение роликов рихтовки, равное 2,4 мм, проявляет более стабильный и предсказуемый характер воздействия на тонкую проволоку.

По результатам исследования построены зависимости отклонения от прямолинейности проволоки от положения роликов в рихтовальном устройстве. Для поиска неизвестной оптимальной переменной, характеризующей минимальное отклонение от прямолинейности, по методу локальной оптимизации функции необходимо принять отклонение от прямолинейности  $\Delta = 0$ , уравнять правые части полученных выражений.

Итоговое выражение имеет вид:

$$\Delta = 0,781x^2 + 1,875x - 16, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – отклонение от прямолинейности тонкой проволоки, мм;  $x$  – положение верхнего ряда роликов рихтовки, мм.

Согласно выражению (1), имеется один фактор, влияющий на отклонение от прямолинейности проволоки – положение роликов рихтовки. Решение уравнения (1) дает оптимальное значение положения верхнего ряда роликов рихтовки, обеспечивающее минимальное отклонение от прямолинейности. Это значение  $x = 3,482$  мм, что приблизительно равно 4,5 оборота ходового винта.

На основании проведенной научной работы определено влияние настройки рихтовального устройства в узле намотки волочильного стана на прямолинейность тонкой проволоки.

Предложенная зависимость отклонения от прямолинейности тонкой проволоки, от положения роликов рихтовки позволит настраивать рихтовальные устройства в оптимальном режиме, что позволит улучшить технологические свойства тонкой проволоки и металлокорда, а также снизить количество брака по причине отклонения от прямолинейности.

## Литература

1. Бобарикин, Ю. Л. Тонкое волочение и свивка в металлокорд стальной латунированной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, Ю. В. Мартыанов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 304 с.
2. Бобарикин, Ю. Л. Исследование влияния скорости грубого волочения стальной высокоуглеродистой проволоки на распределение напряжений и деформаций по сечению проволоки [Research of the influence of highcarbon steel wire drawing speed on stresses and deformations on wire cross section] / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартыанов // Литье и металлургия. – 2019. – № 1. – С. 73–77.

## ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВОК ИЗ ХРОМИСТОГО ЧУГУНА В КОМБИНИРОВАННЫЕ ФОРМЫ

Ю. Д. Черняков

*Учреждение образования «Гомельской государственной технической  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель И. Б. Одарченко

Толстостенные отливки, изготовленные из высокохромистого чугуна (ВХЧ), обладают низкой эксплуатационной стойкостью, так как при твердости наружной поверхности отливки 54–55 HRC на глубине 15 мм твердость не превышает 45 HRC. Это связано с неравномерной по толщине структурой отливки и размером карбидов более 20 мкм [1].

Цель исследования – изучение возможностей повышения эксплуатационной стойкости.

Затвердевание отливки является важнейшим параметром, определяющим формирование ее кристаллического строения и свойств. Более высокие скорости охлаждения расплава создают благоприятные условия для увеличения числа центров кристаллизации в расплаве, формирования структуры отливки с более мелкими зернами металлической матрицы и карбидной фазы, что повышает плотность литого металла.

Скорость затвердевания может изменяться в широком диапазоне от 0,5 до 200 °С/мин.

Для решения вопроса увеличения скорости охлаждения отливки рассматривается возможность использовать комбинированные формы. Нами рассмотрено три типа комбинированных форм: полностью состоящая из холодно-твердеющей смеси (ХТС) (рис. 1, а), форма из ХТС со стальной пластиной, покрытой термостойкой тканью (рисунок 1, б), форма из ХТС со стальной пластиной, покрытой слоем антипригарной краски (рис. 1, в). Преимущество комбинированных форм заключается в том, что охлаждение перегретого расплава происходит со скоростью, среднее значение – от 2 до 4 К/с. Непосредственно у металлических стенок комбинированных форм интенсивность охлаждения расплава в 1,3–1,5 раза выше, чем ее среднее значение для отливки.

Также характерной особенностью затвердевания отливки в комбинированных формах является то, что образование твердой фазы в отливке начинается значительно раньше, чем расплав во всем рабочем пространстве формы охладится ниже температуры ликвидуса  $T_{л}$ , т. е. при наличии в форме перегретого расплава. Так, на момент полного охлаждения перегретого расплава в комбинированных формах типа а, б и в (рис. 1) величина  $\psi$  составляет 36, 25,4 и 17,8 % соответственно. В песчаной форме полностью затвердевшая корка появляется практически только после полного снятия перегрева.

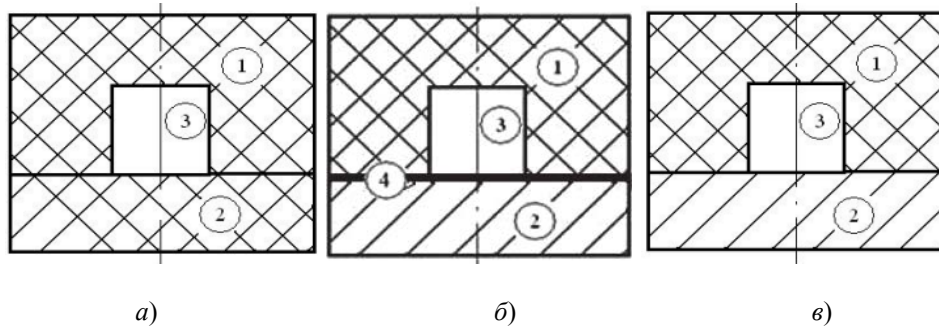


Рис. 1. Виды возможных литейных форм:  
*a* – форма из ХТС; *б* – форма из ХТС со стальной пластиной, покрытой термостойкой тканью; *в* – форма из ХТС со стальной пластиной, покрытой слоем антипригарной краски; 1 – верхняя часть формы (из ХТС); 2 – нижняя часть (*a* – из ХТС, *б*, *в* – сталь 20); 3 – отливка; 4 – термостойкая ткань

Скорость образования твердой фазы  $d\psi/dt$  во всех случаях уменьшается по мере роста продолжительности охлаждения отливки. Скорость образования твердой фазы в комбинированных формах зависит от соотношения количества металлических и песчаных стенок формы. Так, для форм, у которых все стенки металлические, кроме одной стенки из ХТС, интенсивность затвердевания почти в 3 раза выше, чем в форме, где металлической является только одна стенка.

Кроме выбора способа охлаждения необходимо проанализировать основные карбидообразующие элементы и их влияние на структуру высокохромистого чугуна.

Согласно исследованиям Института технологии металла НАН Беларуси [1], размеры карбидов увеличиваются по мере увеличения количества углерода в сплаве. Необходимый заэвтектический сплав с содержанием углерода 4,74 % характеризуется большим количеством довольно крупных карбидов размерами до 100 мкм. При уменьшении содержания углерода до 3,98 % большая часть карбидов имеет размеры до 30 мкм и небольшое количество – размеры 30–50 мкм.

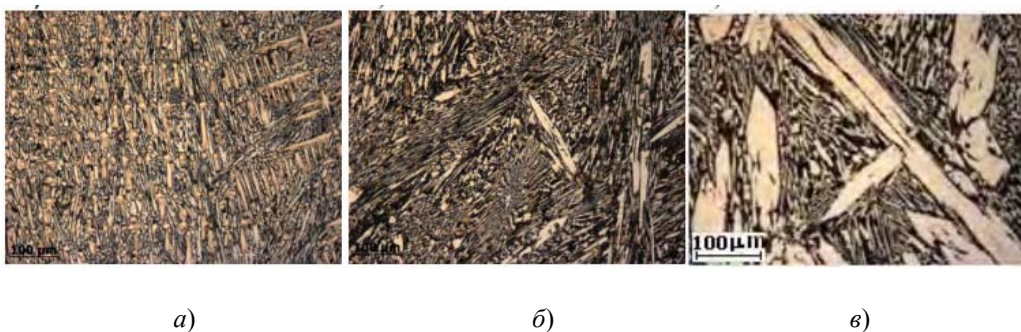


Рис. 2. Микроструктура образцов из высокохромистого чугуна с различным содержанием углерода:  
*a* – содержание углерода 3,25 %; *б* – 3,98 %; *в* – 4,74 % [1]

Также отмечалось, что изменение содержания углерода в ВХЧ может оказывать значительное влияние на процесс затвердевания отливок. В наибольшей степени изменение содержания углерода влияет на динамику затвердевания отливки и продолжительность снятия перегрева расплава. Следует подчеркнуть, что влияние количе-

ства углерода в высокохромистом чугуна на динамику затвердевания отливки, при использовании формы типа В (рис. 1), меньше.

Согласно этому исследованию было принято решение использовать комбинированную форму из ХТС со стальной пластиной, покрытой слоем антипригарной краски.

Кроме охлаждения на кристаллизационные параметры ВХЧ влияют легирующие элементы:

– с ростом концентрации в расплаве чугуна меди расширяется температурный интервал кристаллизации эвтектики и эвтектоида;

– добавка никеля снижает температуры  $t_{A1}^H$  и  $t_{A1}^K$  и одновременно увеличивает интервал кристаллизации эвтектоида;

– олово повышает температуру  $t_{\text{л}}$  (до 1,0 мас. %) и эвтектического превращения, одновременно расширяя интервал кристаллизации эвтектики;

– добавка алюминия, равная 1,0 мас. %, максимально уменьшает  $t_3^H$  и  $t_3^K$  и расширяет температурный интервал кристаллизации аустенита и эвтектики [2].

Согласно представленным данным стоит рассмотреть возможность модифицирования чугуна для эффективного управления структурой отливки.

В работе [3] предлагается модифицировать чугун комплексным модификатором ФСМг6 для обеспечения формирования тригонального карбида при более низком содержании хрома в чугуне.

На основе вышеизложенного предложен способ изготовления отливок, обеспечивающий эффективное управление кристаллизацией матрицы сплава и избыточных карбидных фаз. Перегрев расплава до 1600–1400 °С и выдержке в течение 1–15 мин обеспечивает растворение крупных карбидных включений и гомогенизацию расплава. Ввод окиси хрома совместно с модификатором ФСМг7. Использование порошкообразных реагентов и выбранные режимы обработки расплава обеспечивают измельчение и равномерное распределение карбидных включений при улучшении их формы. Причем ввод окиси хрома в количестве 0,05–0,3 % от массы шихты и в дисперсной форме обеспечивает перераспределение элементов в структуре отливок. За счет перераспределения углерода между матрицей сплава и карбидами и образования карбидов, обедненных углеродом, происходит увеличение доли карбидов в структуре отливок, что позволяет улучшить механические и эксплуатационные свойства отливок.

Из представленных данных для решения поставленных задач важным является скорость затвердевания и охлаждения отливок. Это можно решить путем применения комбинированных форм, которые увеличивают скорость затвердевания примерно в 3 раза по сравнению с песчаными формами. Также важным является выбор первоначального химического состава расплава, так как медь, никель, олово, алюминий могут существенно повлиять на кристаллизационные параметры. Нами предложен оптимальный способ улучшения формирования отливки из ВХЧ, в результате которого ожидается повышение эксплуатационной стойкости изделий из ВХЧ.

#### Литература

1. Исследование влияния углерода в хромистых чугунах на формирование отливок в песчаной и комбинированной формах / Е. И. Марукович [и др.] // Литье и металлургия. – 2018. – № 1. – С. 41–46.

2. Орехова, А. И. Исследование и разработка способа управления первичной структурой хромистых чугунов с помощью модифицирования с целью повышения качества отливок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 22 с.
3. Управление первичной структурой хромистого чугуна / Е. В. Рожкова [и др.] // Черные металлы. – М. : Руда и металлы. – 2010. – № 1. – С. 10–12.

**«ИНДУСТРИЯ 4.0» КАК ИНТЕГРАЦИЯ ЗВЕНЬЕВ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЦЕПИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЕЙШИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
И КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Н. В. Грудина, Д. К. Даниленко**

*Учреждение образования «Гомельской государственной технической  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

**И. А. Кольцова**

*Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,  
г. Гомель, Республика Беларусь*

Научный руководитель В. И. Козлов

Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси на 2021–2025 годы» предусматривает внедрение передовых информационных технологий во всей национальной экономике, которые базируются на стыке технологий четвертой промышленной революции («Индустрия 4.0»). Четвертая промышленная революция («Индустрия 4.0») предполагает новый подход к производству, основанный на массовом внедрении информационных технологий в промышленность, масштабной автоматизации бизнес-процессов и распространении искусственного интеллекта.

В «Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года» указаны стратегические цели, предусматривающие развитие конкурентоспособного промышленного комплекса и его цифровизацию. «Индустрия 4.0» предполагает всеобщую цифровизацию, новый подход к производству, использование новых прорывных технологий, использование цифровых нитей, цифровых двойников, массовое внедрение информационных технологий в промышленность, масштабную автоматизацию бизнес-процессов и распространении искусственного интеллекта. «Индустрия 4» должна иметь человекоориентированный подход. В центре человек и данная технология должна служить благополучию людей: «Технологии – это очень круто, но есть кое-что круче – это люди». Для развития «Индустрии 4» на предприятиях в стране необходима стратегия (концепция развития) «Индустрии», так называемая «дорожная карта» по развитию сквозной цифровизации (цифровых технологий, новых производственных технологий).

Центральным элементом в функционировании производственных систем становятся Интернет-технологии, обеспечивающие коммуникации между людьми, машинами и продуктами. Приоритетную роль играют интернет-технологии, обеспечивающие коммуникации между персоналом и машинами. Велика роль Интернета в «Индустрии 4». «Индустрия 4» требует объединить и перевести в цифровой вид на новые технологии всю цепочку создания изделия – жизненный цикл изделия (рис. 1).



Рис. 1. Этапы жизненного цикла изделия при «Индустрии 4»

«Индустрии 4» неразрывно связана с уровнем автоматизации и внедрения новых передовых технологий. Основные технологии: применение инструментов цифровой трансформации; цифровых двойников (Digital Twin); «умных» цифровых двойников (Smart Digital Twin); технологии цифровых теней (Digital Shadow); «умной» цифровой тени (Smart Digital Shadow). Разработка цифрового двойника начинается в момент появления идеи о разработке нового продукта. Цифровой двойник – это технология-интегратор: он формируется на основе применения «сквозных» цифровых технологий (компоненты робототехники и сенсорики, технологии виртуальной и дополненной реальности, искусственный интеллект, системы распределенного реестра, технологии беспроводной связи и новые производственные технологии).

Эксперты выделяют базовых технологии, в результате внедрения которых ожидаются революционные изменения. Все они являются важными драйверами развития современной промышленности:

1) *анализ больших данных*. Цели применения: повышение качества продукции, энергосбережение и усовершенствование порядка обслуживания оборудования. Для эффективного применения важна интеграция данных из нескольких информационных систем, в том числе управления производством, учета ресурсов, управления отношениями с клиентами и др.;

2) *автономные роботы*. Современные роботы настраиваются и конструируются так, чтобы взаимодействовать между собой и с сотрудниками, самостоятельно обучаться и оптимизировать собственные операции. Манипуляторы и компьютерное зрение позволяют роботу безопасно взаимодействовать с человеком и распознавать детали;

3) *симуляция (моделирование)*. Виртуальное моделирование продуктов, материалов и процессов уже применяется на этапе инженерных разработок, в будущем его применение расширится для имитации полного цикла операционных и производственных процессов. Эти модели будут извлекать данные в режиме реального времени для создания виртуальной копии реального производства с участием машин, продуктов и сотрудников. В семейство входят продукты для симуляции процессов в трехмерном пространстве, имитационного моделирования, программирования промышленных роботов в режиме оффлайн, виртуальной пусконаладки линий и анализа собираемости с учетом размерных отклонений;

4) *интеграция ИТ-систем*. Во многих компаниях информационные системы не интегрированы между собой либо интегрированы частично. Также крайне редко между собой интегрируются предприятия-производители, поставщики и клиенты.



«Индустрия 4» предполагает, что функциональные подразделения в рамках одной компании и целые компании образуют общее универсальное (единое) информационное пространство с целью автоматизировать сразу несколько цепочек создания ценности (цифровых нитей);

5) *промышленный интернет вещей*. В настоящее время только некоторое оборудование на производстве использует межмашинное подключение и встроенные вычислительные мощности. Промышленный интернет вещей предполагает оснащение встроенными датчиками все большего количества производственных объектов и даже незавершенную продукцию. Это позволит передавать большие объемы данных как между машинами, так и централизованным системам контроля, осуществить децентрализацию систем аналитики и принятия решений, обеспечивая работу в режиме реального времени;

6) *кибербезопасность*. В управлении и на производстве многие компании по-прежнему полагаются на ИТ-решения, которые являются закрытыми и не соединенными с внешним миром. При увеличении соединений и использовании стандартных протоколов соединений, которые предполагает «Индустрия 4», становится очевидной потребность в защите ключевых производственных систем и линий от киберугроз. Поэтому безопасные подключения и надежные подходы к управлению доступом к системам являются неотъемлемым условием развития корпоративных информационных систем;

7) *облачные вычисления*. Многие компании уже используют программное обеспечение и системы анализа на основе облачных платформ. «Индустрия 4» предполагает увеличение потоков обмена данными, выходящих за пределы отдельно взятой компании. Растет и вычислительная мощность облачных платформ. В дальнейшем производственные системы мониторинга и контроля, возможно, перейдут на облачные платформы;

8) *аддитивное производство (3D-печать)*. Компании постепенно начинают применять инструменты аддитивного производства, например, 3D-печать. Сейчас основная область применения – это прототипирование и создание отдельных компонентов. В «Индустрии 4» инструменты аддитивного производства могут применяться более широко, в том числе для производства небольших партий кастомизированной продукции;

9) *нанотехнологии*. Новые композиционные материалы;

10) *дополненная реальность*. Системы дополненной реальности оптимизируют работу на складе и подбор комплектующих, направляют инструкции на мобильные устройства производственных рабочих во время ремонта оборудования путем направления. В рамках «Индустрии 4» сфера их применения будет расширяться с целью упростить работу производственного персонала и обеспечить поддержку принятия решений.

Сегодня в Научно-техническом центре комбайностроения (далее – НТЦК) и в ОАО «Гомсельмаш» заложены этапы цифровизации, автоматизации с элементами «Индустрии 4», которые требуют дальнейшего продолжения и внедрения. А для продвижения необходим уровень образования, хорошо подготовленные кадры. Начало цифровой нити – создание конструкторами НТЦК электронных 3D-моделей деталей, сборок с заполненными атрибутами. Электронная 3D-модель создается (модифицируется) с использованием технологии трехмерного проектирования и моделирования конструкторами НТЦК на этапе проектирования. Проектировщики определяют геометрию, проводят бизнес-процессы электронного согласования 3D-моделей в системе управления жизненным циклом изделия – новой технологии –

PDM Windchill, переводят модели в состояние «Выпущено». Далее 3D-модели конструкторов используют технологи УГТ для получения развертки и построения программ с ЧПУ для написания G-кода.

Готовых решений не существует, в рамках ОАО «Гомсельмаш» необходим свой уникальный опыт по цифровизации, внедрению новых технологий, цифровой трансформации, «Индустрии 4», который возможен только при повышении знаний, образования, профессиональных компетенций и грамотности в данной области, подготовленных кадров, развития персонала, постоянного обучения и переподготовки кадров.

#### Литература

1. Всемирный обзор реализации концепции «Индустрия 4.0». – Режим доступа: [http://www.pwc.ru/ru/technology/assets/global\\_industry-2016\\_rus.pdf](http://www.pwc.ru/ru/technology/assets/global_industry-2016_rus.pdf).
2. Что такое Индустрия 4.0 и что о ней нужно знать. – Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/5e740c5b9a79470c22dd13e7>.
3. Технологии индустрии 4.0: Влияние на повышение производительности промышленных компаний. – Режим доступа: [https://www.jsdrm.ru/jour/article/view/772?locale=ru\\_RU](https://www.jsdrm.ru/jour/article/view/772?locale=ru_RU).

### **ПЕРЕХОД НА БЕЗБУМАЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ В КОНЦЕПЦИИ «ИНДУСТРИИ 4.0»**

**Н. В. Грудина, А. Д. Кузмич**

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

**И. А. Кольцова**

*Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь*

Научный руководитель А. С. Шантыко

Разработка новой техники становится все более сложной и динамичной, в условиях сжатых сроков выполняются множество проектов. Переход на безбумажные технологии (все в электронном виде) – одно из основных направлений в концепции «Индустрии 4.0». Целесообразно уходить от бумажных носителей (чертежей, спецификаций). Работать с 3D-моделями проще. В мировой инженерии применяются 3D-модели вместе с аннотациями.

В последние десятилетия используется новая технология, называемая цифровое определение продукта на основе моделей (MBD). MBD новая, прогрессивная технология (англ. Model-Based Definition (MBD), синоним Digital product definition (DPD)). Прогрессивная технология MBD при работе с 3D-моделями имеется в CREO и в других САПР. Использование аннотаций вместе с 3D-моделями легче в понимании. Все, что конструктор выполнял на чертежах вносить на 3D-моделях. Модель и аннотации могут в электронном виде просматривать все заинтересованные специалисты, руководители. Сегодня необходимо придать 3D-модели основной приоритет и значимость.

Вся информация, которая традиционно добавлялась к 2D-чертежам, теперь может быть применена к 3D-моделям, включая:

- любые специфические производственные примечания;
- замысел дизайна;
- аннотации на 3D-моделях;

– стандартные размеры и геометрические размеры, данные о допусках, аннотации, технические требования;

– конфигурации для проектирования.

Преимущества определения на основе моделей:

– снижение затрат благодаря тому, что не нужно создавать 2D-чертежи;

– сокращение брака и переделок из-за неправильного сочетания информации из 2D-чертежей;

– улучшенное качество, так как все требования к качеству могут быть добавлены к 3D-моделям, которые используются для изготовления компонентов.

«Определение основанное на модели», мировой тренд, поддерживается в программе Сгео для сокращения сроков проектирования, улучшения качества 3D-моделей. Технология MBD избавляет от рутинного и трудоемкого оформления чертежей. В MBD информация, полученная программным приложением CAD (например, Сгео, имеется и в других САПР), автоматически передается в приложение САМ (автоматизированное производство) и переводится через постпроцессор на другие языки, такие как G-код, который выполняется станком с ЧПУ. Теперь можно не волноваться о различиях в чертежах и моделях, поскольку вся команда работает с единственным источником данных о размерах и допусках с 3D-моделью. Кроме того, понятия связанные 3D-модели проще, чем сложные чертежи, а это снижает потребность в дополнительном обучении и вероятность ошибок.

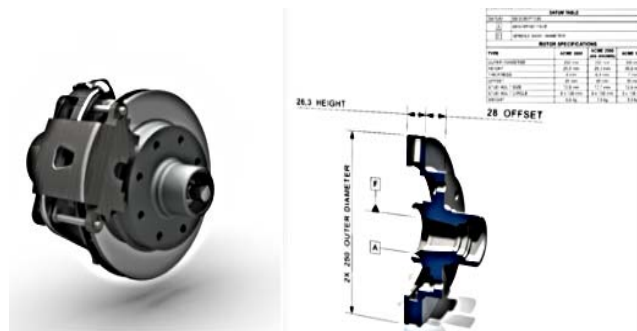


Рис. 1. Пример использование технологии MBD

В MBD набор данных, а не чертеж, является приоритетным. Цифровое определение продукта – практика использования 3D-цифровых данных (например, твердотельных моделей и связанных с ними метаданных) в рамках программного обеспечения 3D CAD, что обеспечивает предоставление спецификации для отдельных компонентов и собранных продуктов. Виды информации, содержащиеся в MBD, включают геометрические размеры и допуски, инженерные спецификации на уровне сборок, описание материалов на уровне деталей, инженерные конфигурации, дизайнерский замысел и т. д.

Технология MBD основана на выполнении аннотирования 3D-моделей. Конструктор на 3D-моделях проставляет надписи, заметки, размеры, допуски, геометрические допуски, технические требования, шероховатости и другие атрибуты, данные необходимые для производства. То есть на 3D-модели конструктора наносят аннотации (рис. 2). В CREO разработан функционал для работы с аннотациями.

Преимущества работы с 3D-моделями: 3D-модели проще в понимании; сокращается время на оформление; уменьшение ошибок, конструктор сосредоточен только на редактировании модели, что повышает качество разработки; передача инфор-

мации, осуществляется в электронном виде; актуальная 3D-модель и электронная версия – основной источник данных для всех заинтересованных подразделений, что соответствует концепции «Индустрии 4.0» и выше (исправления типа исправил чертеж, а модель не исправил, исключаются и не допускаются).

Действия, внимание конструктора (проектировщика), компетенции конструктора – направлено для работы только с одной 3D-моделью (с одним источником информации).



Рис. 2. 3D-модель и аннотации

Сегодня 3D-модель с актуальной версией и актуальными атрибутами (параметрами) необходима для многопользовательской работы для конструкторов и подразделений ОАО «Гомсельмаш». Вся информация о модели, заполненных атрибутах хранится в цифровом (электронном) виде. Сегодня в НТЦК есть 3D-модели с заполненными аннотациями (рис. 3). Чем сложнее чертежи, тем выше эффективность применения технологии MBD.

Следует отметить, что действующие ГОСТ подтверждают, что электронная 3D-модель должна содержать все данные, необходимые для изготовления и контроля детали в соответствии с требованиями ГОСТ 2.052 «ЕСКД Электронная модель детали», ГОСТ 2.102 «Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов».

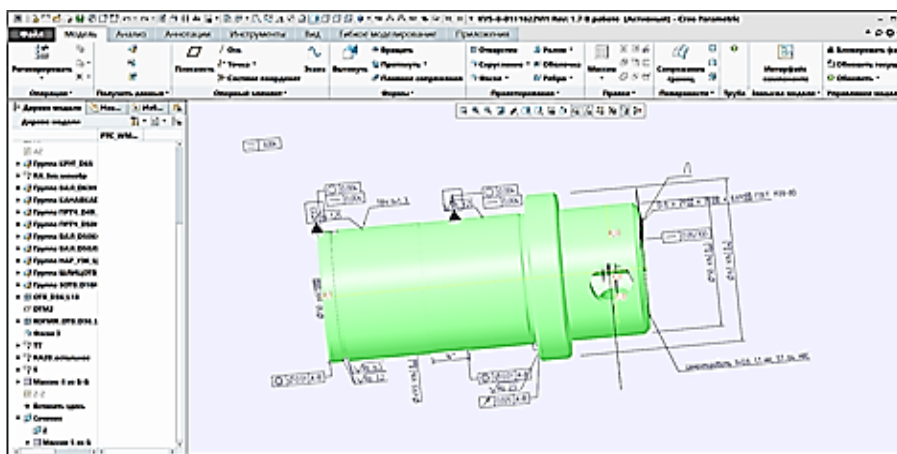


Рис. 3. Пример выполнения 3D-модели в НТЦК «Гомсельмаш»

Вместе с тем на данный момент 3D-модели еще не являются главным источником информации об изделии на многих предприятиях. Несмотря на то, что, как и многие предприятия, проектируют свои изделия в виде 3D, в итоге на их основе выпускаются конструкторскую документацию – традиционно бумажные чертежи, которые в дальнейшем и являются основным источником информации, в том числе и в производстве. Для полноценного использования 3D-моделей необходимо внедрение единой PDM (Product Data Management – система управления данными об изделии) системы, создание единой информационной среды предприятия, внедрение сквозных САПР для конструкторско-технологической подготовки, разработка и выполнение стандартов предприятия, внесение организационных изменений в существующих бизнес-процессы.

Для того чтобы перейти на цифровую трансформацию, безбумажную технологию следует: перейти на электронно-цифровой макет изделия при выпуске конструкторской документации; перейти на электронный подлинник и последовательный уход от «отвязанных» от модели чертежей, а также их бумажных версий; оснащенность техническими средствами на всех участках жизненного цикла изделия; высокопроизводительные сети; введение обязательного использования расчетных комплексов для всех видов расчетов с использованием 3D-моделей; цифровая симуляция технологического процесса.

#### Литература

1. Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов : ГОСТ 2.102.
2. Единая система конструкторской документации. Электронная модель детали : ГОСТ 2.052.
3. Кондаков, А. И. САПР технологических процессов : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / А. И. Кондаков. – М. : Академия, 2007. – 272 с.
4. Ведмедь, П. Почему внедрение новых технологий PLM происходит медленно? «ПЛИМ Урал» / П. Ведмедь, С. П. Щейников. – Режим доступа: [http://www.uppro.ru/print/library/information\\_systems/management/plmtehnologii.html](http://www.uppro.ru/print/library/information_systems/management/plmtehnologii.html).
5. Щейников, С. П. Системно-ориентированный подход к разработке продукции на базе продуктов Siemens PLM Software.
6. Интернет-ресурс: материал из Википедии.

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ КРУГЛОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО АРМАТУРНОГО ПРОФИЛЯ НА ДЕФОРМАЦИОННО-КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНЦА ПРОКАТКИ**

**Г. А. Слепнев**

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Цель работы – провести деформационно-кинематический анализ конца прокатки арматурного профиля в условиях прокатного стана 320 СПЦ-1 ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК» для изучения параметров прокатки и совершенствования методики расчета калибров периодического арматурного профиля № 32.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

– анализ деформационно-кинематических параметров прокатки арматурного профиля № 32 по данным калибровки и телеметрии стана 320;

– проведение аналитического и численного определения параметров прокатки для клетей № 13, 17, 18 по базовому технологическому процессу;

– определение численным экспериментом основных деформационных, кинематических параметров деформации в калибрах исследуемых клетей для уточнения расчетных методик калибровки;

– анализ результатов и формулирование выводов.

Объектом исследования в работе являются деформационно-кинематические параметры прокатки периодического арматурного профиля № 32 в прокатных клетях № 13, 17, 18 мелкосортного прокатного стана 320 ОАО «Белорусский металлургический завод».

Непрерывный мелкосортный стан 320 предназначен для производства сортового и фасонного проката. Главная линия стана включает в себя черновую группу (8 клетей), промежуточную группу (6 клетей) и чистовую группу (6 клетей) [1].

Калибровка валков в клетях № 13 и 17 круг и овал соответственно, клеть № 18 чистовая, геометрия калибра предназначена для прокатки арматурного профиля № 32 по ГОСТ 34028–2016. Подкатом является полоса овального сечения, выходящая из клетки № 12 (рис. 1) [2], [3].

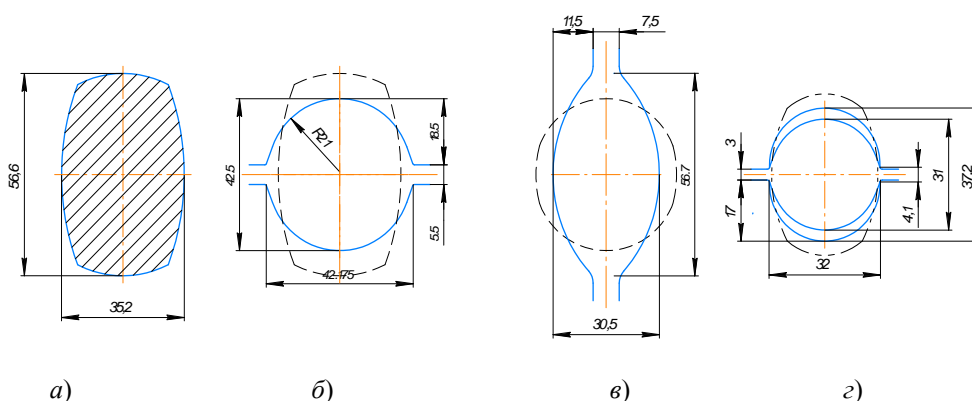


Рис. 1. Геометрия сечения подката и калибров:  
а – сечение подката из клетки № 12; б, в, г – геометрия калибров в клетях № 13, 17, 18

В табл. 1 представлены размеры валков и прокатываемой полосы, а также параметры прокатки в клетях № 13, 17, 18 в соответствии с действующим технологическим процессом.

Таблица 1

**Исходные данные телеметрии работы стана и таблицы калибровки для исследования прокатки арматурного профиля № 32**

Технологические параметры	Подкат из клетки № 12	Клеть № 13	Клеть № 17	Клеть № 18
Диаметр валков (факт.) $D_{в}$ , мм	–	293	305	277
Диаметр валка по дну калибра валка (расчет) $D_{д.к}$ , мм	–	256	282	249
Катающий диаметр валков (расчет) $D_{к}$ , мм	–	250,43	287,22	253,16

Технологические параметры	Подкат из клетки № 12	Клеть № 13	Клеть № 17	Клеть № 18
Площадь сечения $F_i$ , мм <sup>2</sup>	1730	1380	1120	832
Высота полосы $h_i$ , мм	25,20	42,50	27,50	№ 32
Ширина полосы $b_i$ , мм	56,60	50	45,30	
Число оборотов привода для действующего технологического процесса (факт.) $N_i$ , об/мин	–	577	629	717
Передаточное число $k$	–	1,620	1,538	1,227
Коэффициент трения (расчет) $f$	–	0,202	0,202	0,202
Температура полосы на выходе из клетки № 12 (расчет) $T_0$ , °C	999,464			
Скорость движения толкателя $v_{та}$ , м/с	4,10			

Для корректного определения деформационно-кинематических параметров процесса прокатки периодического арматурного профиля проведены численные эксперименты в программном пакете SimufactForming 16 с наложением на подкат из клетки № 12 сетки конечных элементов с размером ячейки 1,4 мм по методике, изложенной в [4].

В результате численного моделирования определили параметры очага деформации (рис. 2) путем построения геометрии и расчета площадей в программном пакете Компас 3D. Результаты аналитического расчета и численного эксперимента представлены в табл. 2.

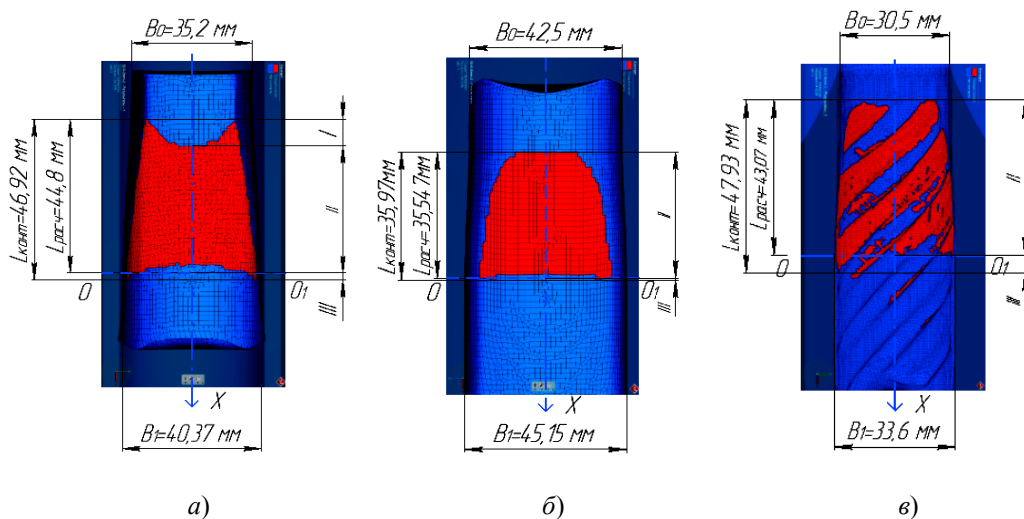


Рис. 2. Контактная поверхность очага деформации в калибрах клеток № 13, 17, 18:

$O_1-O$  – плоскость осей валков;  $X$  – ось прокатки;  $B_0$ ,  $B_1$  – исходная и конечная ширина полосы;  $I$  – зона контакта по выпускам калибра на входе в очаг деформации (ОД);  $II$  – зона одновременного контакта по выпуску и дну калибра;  $III$  – зона контакта по выпускам калибра на выходе из ОД;  $L_{\text{расч}}$  – расчетная длина дуги прокатки;  $L_{\text{конт}}$  – длина дуги контакта

## Результаты исследования

Геометрические параметры прокатки полосы		Клеть № 13	Клеть № 17	Клеть № 18
Высота полосы $H$ , мм	до прокатки $H_0$	56,60	40,37	45,15
	после прокатки $H_1$	42,50	30,50	31,00
Ширина полосы $B$ , мм	до прокатки $B_0$	35,20	42,50	30,50
	после прокатки $B_1$	40,37	45,15	33,60
Длина очага деформации $L$ , мм	$L_{\text{расч}}$	44,80	35,55	43,07
	$L_{\text{конт}}$	46,92	35,97	47,93
Угол прокатки $\alpha$ , град	расчет	19,23	15,12	19,26
	модель	19,28	15,04	18,92
Длина дуги прокатки $L_d$ , мм (формула)	расчет	42,02	37,90	42,55
	модель	41,90	37,61	42,85
Площадь контактной поверхности $F_k$ , мм <sup>2</sup>	расчет	1266,35	1335,24	1050,95
	модель	1281,55	1075,55	1376,07
Площадь поперечного сечения раската $S_n$ , мм <sup>2</sup>	расчет	1380	1145	832
	модель	1373,56	1142,13	841,28
Катающий диаметр валков $D_{ki}$ , мм	расчет	250,43	287,22	253,16
	модель	249,0679	286,6542	259,5554
Опережение $S_{1i}$	модель	0,0371	0,0353	0,0423
Отставание $S_{0i}$	модель	0,1130	0,1018	0,2016
Коэффициент вытяжки $\lambda$	расчет	1,254	1,205	1,376
	модель	1,2386	1,1935	1,3799
Момент прокатки $M$ , кНм	расчет	7,76	7,94	7,43
	модель	4,05	3,12	3,62
Усилие прокатки $P$ , кН	расчет	185,36	210,67	175,84
	модель	174,90	157,52	161,52
Мощность прокатки $W$ , кВт	расчет	288,97	340,18	454,58
	модель	157,78	127,71	221,48
Коэффициент плеча $\psi$	расчет	0,498	0,497	0,496
	модель	0,552	0,527	0,523
Плечо прокатки $a$ , мм	модель	23,14	19,81	22,41

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Выполнен аналитический расчет для определения деформационно-кинематических и энергосиловых параметров прокатки арматурного профиля № 32 на стане 320.

2. Разработана численная модель процесса прокатки в клетях № 13, 17, 18 стана 320 по действующей (базовой) технологии и выполнен анализ результатов моделирования.



3. Рассчитан и проверен численным экспериментом оптимизированный скоростной режим, существенно улучшающий силовую нагрузку на клетки № 13, 17, 18 стана 320.

4. Разработана методика для определения параметров прокатки, которая может универсально применяться и для других схем калибров.

5. Для получения боковых полос арматуры потребовалось увеличение межвалкового зазора в клетки № 17 с 4,5 до 7,5 мм на 3 мм.

#### Литература

1. Астапенко, И. В. Оборудование прокатных цехов : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» направления 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалобработка (металлургия)» специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 47 с.
2. Барановский, Д. С. Совершенствование прокатки по «слиттинг-процессу» в контрольном калибре стана 320 ОАО «БМЗ» / Д. С. Барановский, И. В. Астапенко // 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. 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, 2021. – С. 93–97.
3. Барановский, Д. С. Конструктивные решения контроля ширины полосы для горячей прокатки по «слиттинг-процессу» / Д. С. Барановский, И. В. Астапенко // Беларусь в современном мире : материалы XIV Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 13–14 мая 2021 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, 2021. – С. 250–253.
4. Васильков, Д. М. Исследование параметров очага деформации полосы при прокатке в валах с ящичными калибрами черновой группы клетей стана 370/150 ОАО «БМЗ» / Д. М. Васильков, И. В. Астапенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 26–27 апр. 2018 г. / 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, 2018. – С. 178–182.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СТРЕСС-ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОКАТЕ В ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ ЗАГОТОВКИ СЕЧЕНИЕМ 250 × 300 ММ**

**И. А. Панковец**

*ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин,  
Республика Беларусь*

Научный руководитель М. Н. Верещагин

За весь период работы стана 370/150 (начиная с октября 2015 г.) при производстве сортового проката в прутках отмечаются дефекты поверхности прокатного происхождения, такие как морщины, вкатанная окалина, деформационная рванина, чешуйчатость и др. Классификация дефектов проводилась соответствии с ГОСТ 21014. В ходе анализа причин образования поверхностных дефектов выявлена вероятная причина – снижение пластичности металла на поверхности тела раската. Для исследования и определения стресс-факторов, потенциально способных привести к снижению пластичности проведены математические эксперименты методом конечных

элементов. Метод конечных элементов – это метод приближенного численного решения физических задач [1].

**Методика проведения исследования.** В качестве основополагающих факторов, влияющих на снижение пластичности металла на поверхности при прокате заготовки номинальным сечением 250 × 300 мм длиной 500 мм, определены следующие:

- влияние радиуса скругления (сопряжения) граней исходной заготовки;
- влияние коэффициента трения при прокате (имитация износа калибра);
- влияние радиуса скругления (сопряжения) стенки со дном ящичного калибра;
- влияние температуры поверхности прокатного инструмента.

В качестве объекта исследования выбраны клетки черновой группы.

**Исследование влияния радиуса скругления (сопряжения) граней исходной заготовки номинальным сечением 250 × 300 мм.** Рассмотрено влияние радиуса скругления (сопряжения) граней исходной заготовки номинальным сечением 250 × 300 мм на температурно-деформационные характеристики процесса проката с различными заготовками.

При температуре начала прокатки 1100 °С и температуре поверхности валков 150 °С максимальное напряжения деформации в углах заготовки с радиусами скругления 20 и 10 мм составило 78 и 81 МПа соответственно. При этом минимальная температура в очаге деформации первой клетки, в обоих случаях, составила 951–952 °С.

Анализируя результаты математического моделирования, различия температурно-деформационного состояния не наблюдались. Причиной отсутствия значительных различий температурно-деформационного состояния в очагах деформации клеток 2–7 между радиусом скругления 10 и 20 мм не выявлено. Данный факт объясним тем, что при прокате в первой клетки заготовок с различными радиусами скругления плоскостей, раскат принимает форму первого калибра и далее раскат, в обоих случаях, имеет одинаковую геометрию поперечного профиля, что и сказалось на отсутствии значительных различий при прокате. Стоит отметить, что при прокате заготовки с радиусом скругления граней 20 мм увеличилось усилие толкателя (трайбаппарата) в очаг деформации первой клетки на 6 %, однако распределение нагрузки более равномерное при меньшем напряжении в углах заготовки.

В ходе проведения эксперимента, с радиусами скругления 20 и 10 мм на заготовках, получены однозначные данные, свидетельствующие о том, что значительных различий при прокатке не выявлено, в связи с чем проведен дополнительный эксперимент с заготовкой без радиуса скругления плоскостей поверхности, моделирование процесса проката заготовки после 100%-ной обточки поверхности.

Результатом дополнительного эксперимента, углы блюда без скругления, стало повышение максимального напряжения в первой клетки до 85 МПа, при этом минимальная температура составила 892 °С. Далее при прокате в клетях 4–5 минимальная температура составила 769 °С, максимальная нагрузка составила 123 МПа. Таким образом, отсутствие скругления на заготовке повышает температурный градиент и при этом возрастает локальное напряжение на поверхности раската при прокатке.

**Исследование влияния коэффициента трения при прокате.** Принято считать, что в процессе горячей прокатки, в момент захвата валком раската и непосредственно при самой прокатке происходит граничное трение – возникающее на поверхности раздела двух тел (валка и раската) [2], [3]. В качестве адсорбционной смазки может выступать мелкодисперсная окалина на поверхности раската, при этом увеличение общей шероховатости валка (выработка калибра) приводит к увеличению коэффициента трения за счет более грубой поверхности калибра.

При температуре начала прокатки 1100 °С и температуре поверхности валков 150 °С максимальное напряжения деформации в углах заготовки с различными коэффициентами трения 1,0 и 0,4 мм составило 83 и 81 МПа соответственно. При этом минимальная температура в очаге деформации первой клетки в обоих случаях составила 966 и 951 °С соответственно.

Анализируя результаты математического моделирования на клетях 4–5, различия деформационного состояния проявились более значительно, при этом температурный градиент остался неизменным. Повышение напряженного состояния в очаге деформации объясняется высоким коэффициентом трения, обусловленного выработкой калибра. В процессе проката из-за выработки поверхности калибра отсутствует граничное трение. Отсутствие трения-скольжения дополнительно препятствует раскату пластически деформироваться и принимать форму калибра, вследствие чего и возникает повышение локального напряжения на поверхности раската.

**Исследование влияния радиуса сопряжения стенки и дна калибра.** В качестве исследования проведен ряд экспериментов с измененным радиусом сопряжения стенки ящичного калибра со дном в диапазоне  $\pm 10$  мм от фактического размера на калибрах 1–4 клетях. Температура начала прокатки 1100 °С и температура поверхности валков составила 150 °С для каждого эксперимента.

При прокате в клетки 1 и увеличенным радиусом сопряжения с 27 до 37 мм значительно возросло напряженное состояние с 75 до 89 МПа, минимальная температура составила 918 °С против 951 °С (считая от стандартного процесса проката). Возможной причиной явилось неравномерность деформации в момент захвата валками заготовки, т. е. из-за большого радиуса скругления калибра (37 мм) происходит более ранний и более интенсивный процесс пластической деформации в углах, и только после всего тела заготовки.

Анализируя полученные данные, можно сделать предварительный вывод: чем больше разница между радиусом скругления заготовки и радиусом сопряжения стенки и дна ящичного калибра, тем выше значение локального напряженного состояния на поверхности раската [4].

**Исследование влияние температуры поверхности прокатного инструмента на температурно-деформационные характеристики проката.** Как известно из источников технической литературы по прокатному производству, прокатный инструмент перед прокатом должен иметь температуру, достаточную для безаварийного процесса проката и при этом не должен локально захлаживать поверхность раската. Другими словами, температура прокатного инструмента должна находиться в узком диапазоне температур, обеспечивая оптимальные условия технологических и эксплуатационных параметров. Проведено численное моделирование процесса проката с температурой валков 20 °С, результаты эксперимента, в сравнении с процессом проката при температуре валков, – 150 °С.

При температуре начала прокатки 1100 °С и температуре поверхности валков 20 °С напряжения деформации в углах заготовки составляют 128 МПа, градиент температур между поверхностью и сердцевинной заготовки достигает 352 °С. При повышении температуры поверхности валков до 150 °С напряжения деформации снижаются до 120 МПа одновременно с уменьшением градиента температур до 271 °С.

Полученные результаты, по оценке стресс-факторов при прокате в черновой группе клетей, можно разделить на две основные группы: критические (температура валков, износ калибра, отсутствие радиуса скругления на заготовке после 100%-ной обточки); не значительные, либо не достаточно изученные факторы в силу достаточно грубых математических моделей (радиус скругления на заготовке 20 мм, радиус

сопряжения стенки и дна ящичного калибра  $\pm 10$  мм). Суммируя критические факторы, вариативность реального процесса, возникают локальные очаги захлаживания с одновременным возрастанием локального напряженного состояния, в сравнении с нормальным процессом проката: в клетях 1 температура – 864 °С (951 °С), напряжение – 86 МПа (81 МПа); в клетях 4–5 температура – 732 °С (848 °С), напряжение – 144 МПа (120 МПа). Для более глубокого анализа необходимо моделирование процесса проката при помощи тетраэдрических элементов сеткопостроения.

#### Литература

1. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях : учеб. пособие / С. В. Каменев ; Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2019. – 110 с.
2. Крагельский, И. В. Развитие науки о трении. Сухое трение / И. В. Крагельский, В. С. Щедров. – М. : Изд. АН СССР, 1956.
3. Popov, V. L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation, Springer, 2009.
4. Смирнов, В. К. Калибровка прокатных валков : учеб. пособие для вузов / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Теплотехник, 2010. – 490 с.

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВРАЩЕНИЯ ВОЛОКИ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ СТАЛИ**

**В. А. Петрусевич**

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Цель работы – исследование влияния частоты вращения волоки на напряженное состояние очага деформации при волочении стали в первом проходе стана UDZSA 2500/6 для совершенствования процесса волочения и повышения механических характеристик проволоки.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- 1) разработка базовой численной модели процесса волочения на первом переходе без использования вращающейся волоки по технологическим параметрам стана UDZSA 2500/6;
- 2) определение параметров очага деформации волочения в 1-м проходе при помощи аналитического расчета и численного моделирования;
- 3) моделирование процесса волочения в первом проходе стана UDZSA 2500/6 для определения влияния скоростного режима вращения волоки на напряженное состояние очага деформации и механические характеристики проволоки.

Объектом исследования является технологический процесс волочения проволоки-заготовки шурупного производства на стане UDZSA 2500/6 магазинного типа цеха предварительного волочения ОАО «Речицкий метизный завод».

Для совершенствования технологического процесса было предложено применить в процессе волочения вращатели волок, позволяющие добиться [1], [2]:

- повышения ресурса волок;
- снижения энергозатрат;
- улучшения механических характеристик проволоки.

На первом этапе исследований анализировалась эффективность применения вращателей 1-й и 6-й волок для стана UDZSA 2500/6 в соответствии с действующими режимами технологического процесса по следующим направлениям:

- температура контактной поверхности в очаге деформации;
- температура по сечению проволоки в очаге деформации;
- усилие волочения.

Полученные результаты исследования и их анализ позволили сделать следующие выводы [3], [4]:

- 1) применение вращения волоки позволяет обеспечить равномерный износ рабочей поверхности волоки и увеличить ресурс эксплуатации (для 1-го и 6-го переходов);
- 2) вращение волоки позволяет существенно снизить температуру контактной поверхности, при этом снижение усилия волочения незначительно (для 1-го перехода);
- 3) наибольший интерес представляет применение вращение волок с частотой 100 об/мин для снижения температуры и ее равномерного распределения по контактной поверхности (для 1-го перехода, для 6-го перехода результат достигается при частотах вращения более 3000 об/мин, что малоперспективно);
- 4) существенное снижение усилия волочения при вращении волок [2] происходит по причине лучшего захвата смазки, преодоление тангенциальных напряжений энергией вращателей не дает снижения более 5 %.

На втором этапе исследований анализировалась эффективность применения вращателей волоки 1-го прохода на напряженное состояние очага деформации при волочении стали в соответствии с действующими режимами технологического процесса по следующим направлениям:

- распределение полей осевых, радиальных и тангенциальных напряжений на выходе из очага деформации по сечению проволоки;
- распределение накопленной пластической деформации на выходе из очага деформации по сечению проволоки;
- напряжения пластического течения на выходе из очага деформации.

Была построена базовая численная модель в соответствии с действующим технологическим процессом без вращения по исходным данным параметров действующего технологического процесса, представленным в табл. 1. Геометрия волоки первого перехода представлена на рис. 1.

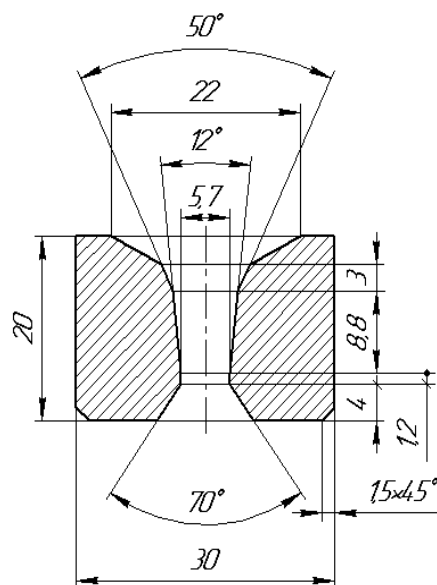


Рис. 1. Геометрия волоки 1-го прохода ГОСТ 9453–75, форма 12, калибр 1980-0155

**Исходные данные численных эксперимента процесса волочения  
на 1-м переходе стана UDZSA 2500/6**

Номер	Частота вращения $n$ , об/мин	Параметр							
		$d_0$ , мм	$d_1$ , мм	$N_{эд}$ , кВт	$D_{бар}$ , мм	$v$ , м/с	$\mu_1$	$\epsilon$ , %	марка стали
1	Базовый (без вращения)	6,5	5,7	55	550	3,5	1,3	23,1	Ст1сп
2	100, 500								

Шестикратный волочильный стан блочного типа модели UDZSA 2500/6 с максимальным усилием волочения на первом черновом блоке равным 25 кН (2500 кг), предназначен для волочения стальной углеродистой проволоки при диаметре заготовки до 12 мм.

Моделирование проводилось для первого прохода в программном пакете SimufactForming 16 с наложением на заготовку сетки конечных элементов с размером ячейки 0,2 мм.

После построения и выполнения расчетов численной модели волочения, получены следующие результаты по полям распределения напряжений (рис. 2) и величине их градиентов (табл. 2).

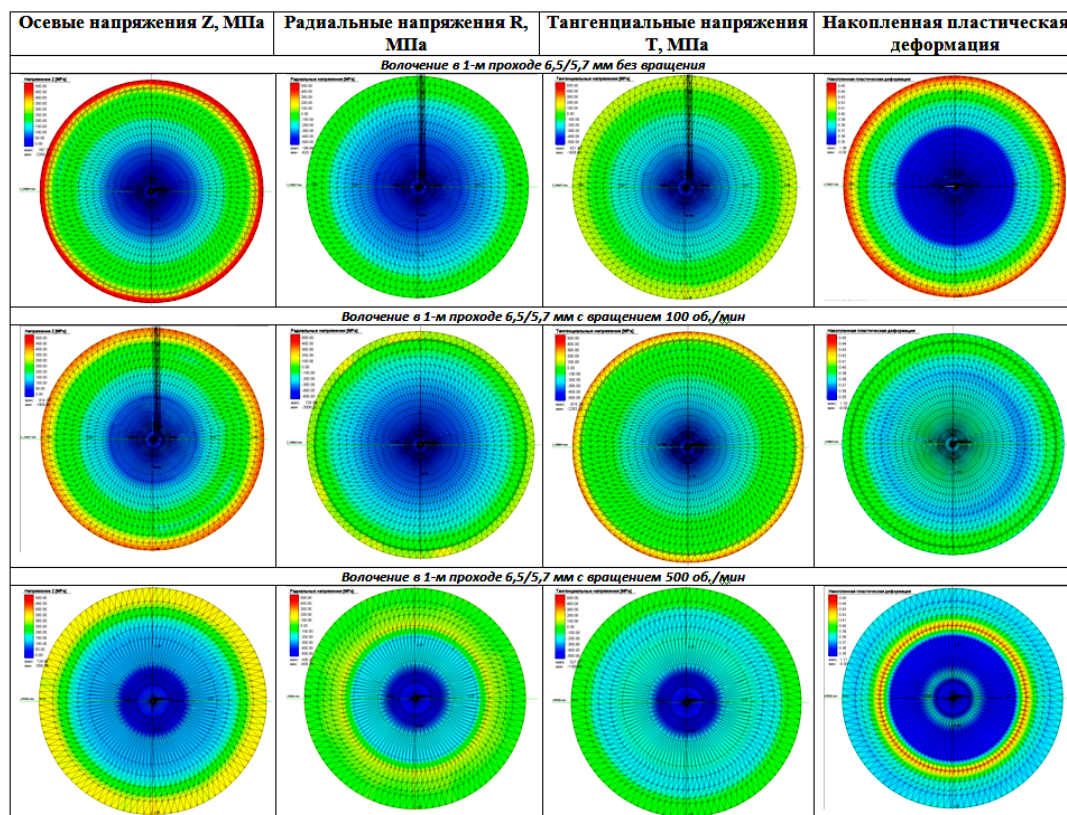


Рис. 2. Распределение полей напряжений и накопленной пластической деформации на выходе из калибрующей зоны проволоки в 1-м проходе стана UDZSA 2500/6

**Градиент полей напряжений и накопленной пластической деформации на выходе из калибрующей зоны волокни в 1-м проходе стана UDZSA 2500/6**

Эксперимент, об/мин	0 (min/max)	100 (min/max)	500 (min/max)
Осевые напряжения Z, МПа	0/520	0/440	0/370
Радиальные напряжения R, МПа	-240/90	-280/240	-410/210
Тангенциальные напряжения T, МПа	-380/240	-290/280	-450/110
Накопленная пластическая деформация	0,35/0,45	0,38/0,40	0,34/0,43

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Вращение волокни с  $n = 100$  об/мин для 1-го прохода 6,5/5,7 мм оказалось оптимальным как по показателям температурных полей в сечении и на контактной поверхности, так и по напряженному состоянию.

2. При вращении волокни с  $n = 100$  об/мин накопленная пластическая деформация становится практически равной по всему сечению, что даст возможность получить равномерную структуру.

3. При волочении во вращающейся волоке происходит снижение эквивалентных (по сумме распределения) осевых напряжений, причем чем выше скорость вращения волокни, тем больше снижение усилия волочения.

4. Растягивающие (+) радиальные и тангенциальные напряжения возросли при вращении волокни со скоростью 100 об/мин и практически выровнялись (сбалансировались) со сжимающими (-). При этом сжимающие (-) напряжения возрастают с увеличением скорости вращения волокни. Самое большое перераспределение тангенциальных напряжений: с увлечением скорости вращения волокни до 500 об/мин растягивающие напряжения уменьшаются, в то время как сжимающие напряжения увеличиваются до 410 МПа.

#### Литература

1. Астапенко, И. В. Оборудование волочильных и канатных цехов: пособие по курсу «Оборудование метизных цехов» для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» направления специальности 1-42 01 01-02 «Металлургическое производство и материалобработка (материалобработка)» специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка материалов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 55 с.
2. Применение вращающейся волокни в метизном производстве РУП «Речицкий метизный завод» / В. И. Тимошпольский [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2-2 (38).
3. Петрусевич, В. А. Оценка влияния диаметра проволоки на эффективность применения вращающихся волок / В. А. Петрусевич, И. В. Астапенко // Беларусь в современном мире : материалы XIV Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 13–14 мая 2021 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, 2021. – С. 274–277.
4. Петрусевич, В. А. Оценка влияния частоты вращения волокни на параметры процесса при волочении стали / В. А. Петрусевич, И. В. Астапенко // 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. 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, 2021. – С. 100–104.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ  
ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ Ø 5,5 ММ  
В УСЛОВИЯХ ПРОВОЛОЧНОГО СТАНА 150 СПЦ-1  
ОАО «БМЗ – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК»**

**М. А. Бовкало**

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Цель работы – минимизация получения «пузырчатой» окалины на поверхности катанки Ø 5,5 мм из стали марок 80К и 80РМЛ.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- изучение причин получения «пузырчатой» окалины;
- аналитическое определение оптимальных режимов с помощью известных теоретических зависимостей и практики;
- прокатка опытной партии по новым режимам;
- анализ результатов, формирование выводов и предложений производству.

Объектом исследования в работе является высокоуглеродистая катанка Ø 5,5 мм в условиях проволочного стана 150 ОАО «Белорусский металлургический завод».

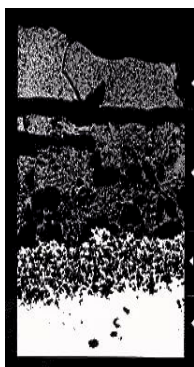
В настоящее время одной из приоритетных задач сортопрокатного производства является повышение эффективности производства путем снижения себестоимости. С другой стороны, немаловажной задачей является повышение производительности оборудования, качества проката, эксплуатационной стойкости инструмента и оборудования.

Важным показателем качества катанки является масса окалины на поверхности и способность ее к удалению различными методами. Это связано с уменьшением износа волок и расхода кислот при переработке катанки на сталепроволочном переделе производства [1].

Окалина, образующаяся на высокоуглеродистой катанке, состоит из трех структурных слоев (рис. 1), аналогичных тем, которые формируются на низкоуглеродистых марках стали и чистом железе:

- вюстит ( $\text{FeO}$ ) 80 %;
- магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 18 %;
- гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 2 % – по направлению от внутреннего до внешнего слоя.

Тем не менее высокоуглеродистым маркам стали характерны два основных слоя, поскольку количество гематита в них является незначительным.



[магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )  
и вюстит ( $\text{FeO}$ )] – слой 1

[магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ),  
вюстит ( $\text{FeO}$ ) и поры] – слой 2

[вюстит ( $\text{FeO}$ ) и Mn-Fe силикаты] – слой 3

сталь

Рис. 1. Слои окалины высокоуглеродистой катанки



При обработке высокоуглеродистых марок стали может потребоваться применение как механического, так и химического способа снятия окалины.

Для некоторых видов продукции требуется обеспечить идеально очищенную от окалины поверхность – в этих целях используется химический способ снятия окалины.

Более низкие температуры катанки на виткообразователе ( $T_{в/о} \sim 850$  °С) способствуют формированию тонкой, плотной окалины, без бластеров (т. е. пузыристой окалины) и состоящей преимущественно из вьюститита, приводящей к сокращению времени на травление.

Повышенные температуры укладки витков ( $T_{в/о} > 900$  °С) подходят для механического удаления окалины, так как образуется более толстый слой вьюститной окалины черного цвета, который формируется при 950 °С и выше (оптимальное значение 950–1000 °С). Данный слой окалины примыкает к металлооснове, над которой с внешней стороны расположен магнетит серо-металлического цвета.

Согласно проведенным исследованиям отобранных образцов катанки из высокоуглеродистой стали было установлено [2], [3]:

- на исследованных образцах (сталь 80К) толщина слоя окалины составляет 14–20 мкм, масса окалины 7–10 кг/т, окалина неоднородная дефектная на большей части или на всей поверхности катанки, в структуре стали присутствует разнотерность в виде отдельных участков крупных зерен;

- происходит повышенный износ волок, который вызван переработкой катанки с неоднородной дефектной окалиной.

- образцы катанки после травления и бурирования (рис. 2) имеют в высокой степени шероховатую поверхность (макрорельеф) – выступы в виде округлых участков. Дефекты являются следствием различной степени травимости неоднородной дефектной окалины катанки.



а)

б)

Рис. 2. Образцы катанки после травления и бурирования:  
 а – внешний вид и состояние окалины на поверхности катанки до травления; б – макрорельеф после травления, выступы округлой формы по всей поверхности

На структуру и форму образующейся окалины при прокатке высокоуглеродистой катанки ключевое влияние оказывает температурно-скоростной режим. Для оценки влияния температур в контрольных точках линии прокатки на образование окалины за четыре этапа был собран статистический материал (см. таблицу) с вариацией технологических режимов.

## Данные параметров прокатки катанки из стали 80К

Этап прокатки	Статистические показатели	Время в печи, минут	Температура, °С						Скорость прокатки (РКБ), м/с
			печь, зона 4	перед 1 кл.	перед ПБ	перед РКБ	в зоне ВО	«Стельмор» (5–6 зона)	
1-й этап	мин.	55	1060	938	948	946	949	188	83,7
	макс.	306	1185	1035	1016	1018	1005	440	105,0
	<b>средн.</b>	<b>112</b>	<b>1140</b>	<b>963</b>	<b>984</b>	<b>1004</b>	<b>981</b>	<b>341</b>	<b>98,3</b>
2-й этап	мин.	60	1117	910	954	944	957	240	95,0
	макс.	227	1187	997	1015	1056	998	499	104,0
	<b>средн.</b>	<b>106</b>	<b>1145</b>	<b>964</b>	<b>984</b>	<b>1017</b>	<b>980</b>	<b>411</b>	<b>102,9</b>
3-й этап	мин.	89	1119	900	952	964	958	244	97,9
	макс.	182	1173	992	1010	1058	996	436	103,6
	<b>средн.</b>	<b>105</b>	<b>1146</b>	<b>964</b>	<b>982</b>	<b>1020</b>	<b>980</b>	<b>415</b>	<b>102,9</b>
4-й этап	мин.	94	1129	916	945	959	956	161	102,9
	макс.	212	1170	988	1006	1038	993	435	103,6
	<b>средн.</b>	<b>109</b>	<b>1144</b>	<b>964</b>	<b>984</b>	<b>1008</b>	<b>980</b>	<b>422</b>	<b>103,4</b>

*Примечание.* 1 кл. – первая клеть, ПБ – предчистовой блок клетей, РКБ – редуционно-калибровочный блок клетей, ВО – виткообразователь, «Стельмор» – рольганг контролируемого охлаждения катанки.

Проанализировав данные прокатки и результаты отобранных проб катанки по окалине каждого этапа, были сделаны следующие выводы:

- 1) температура перед виткообразователем и проволочным блоком не влияет на получение пузырчатой окалины;
- 2) температура РКБ оказывает влияние на получение «пузырчатой» окалины (минимально при температуре 970 °С).

## Литература

1. Астапенко, И. В. Оборудование волочильных и канатных цехов : пособие по курсу «Оборудование метизных цехов» для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» направления специальности 1-42 01 01-02 «Металлургическое производство и материалобработка (материалобработка)» специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка материалов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 55 с.
2. Савченко, С. А. Совершенствование технологического процесса горячей прокатки шарикоподшипниковых сталей в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ» УКХ «БМК» / С. А. Савченко, И. В. Астапенко // Беларусь в современном мире : материалы XII Междунар. 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. 282–285.
3. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / В. С. Путеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 65–73. – DOI 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73. – EDN OBYZET.

**ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТЫХ  
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА, ПОЛУЧЕННЫХ  
МЕТОДОМ БЕСФИЛЬЕРНОЙ ВЫТЯЖКИ****Е. В. Авдеева***Государственное научное учреждение «Институт химии новых  
материалов Национальной академии наук Беларуси», г. Минск***А. М. Михалко***Международная Китайско-Белорусская научная лаборатория  
по вакуумно-плазменным технологиям, Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины, Республика Беларусь*

Волокнистые фильтрующие материалы широко используются в фильтрующих элементах для удовлетворения требований к производительности фильтрации в промышленных процессах и СИЗ. Способы получения волокнистых материалов определяют структуру, диаметр волокон, взаимное расположение, толщину и плотность укладки, что оказывает влияние на эффективность фильтрации. В процессе формирования волокон путем распыления в поле высокого напряжения образующиеся волокна накладываются друг на друга, слипаются, что приводит к уменьшению адсорбционных свойств. Вытягивание волокна сжатым воздухом приводит к формированию волокон неправильной формы и большой доле неволокнистых включений. В настоящей работе исследованы фильтрующие свойства волокон, полученных методом свободной вытяжки из расплава. Высокая вязкость полимера способствует сохранению исходной структуры и дополнительной ориентации молекул, что положительно влияет на физико-механические свойства готового волокна.

Цель работы заключается в установлении особенностей фильтрационных свойств волокон на основе полиэтилена, пластифицированного олифой и этиленгликолем, полученных методом бесфильерной вытяжки.

Использован нетканый полипропиленовый материал SpunBel с поверхностной плотностью 40 г/см<sup>2</sup> («СветлогорскХимволокно», Беларусь). Полимерные волокна изготавливали из полиэтилена высокого давления (ПЭВД) марки 16803-070 (ГОСТ 16337-77), олифы (ГОСТ 7931-76), этандиол-1,2 (ГОСТ 19710-83) методом бесфильерной вытяжки из расплава при температуре ( $T = 423$  К).

Оценка эффективности воздушной фильтрации (ЭВФ) со средним диаметром 10 мкм ( $PM_{10}$ ), 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ), 1,0 мкм ( $PM_{1,0}$ ) проводилась на экспериментальном лабораторном стенде (ИХНМ НАН Беларуси). С помощью ультразвукового генератора был создан аэрозоль, в качестве дисперсной фазы в котором использовались капли воды. Воздушный насос создавал перепад давления для скорости потока аэрозоля 8 л/мин. Аэрозоль пропускали через слои фильтрующего материала SpunBel (в виде диска, диаметром 40 мм) между которыми располагались пластифицированные волокна ПЭВД. Значение параметра ЭВФ рассчитывается как отношение абсолютного изменения концентрации частиц при фильтрации к концентрации частиц до фильтрации.

При бесфильерной вытяжке волокон из расплава введение пластификатора (олифы и этиленгликоля) уменьшает взаимодействие между макромолекулами ПЭВД. Поэтому волокна легко извлекаются из расплава, имеют однородную, гладкую поверхность (рис. 1).

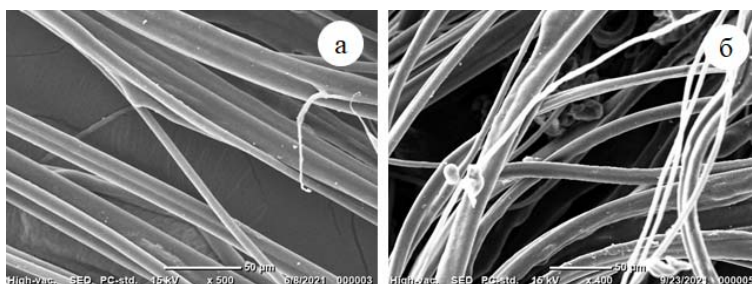


Рис. 1. СЭМ-изображения волокон ПЭВД:  
 а – пластифицированных олифой (25 %);  
 б – пластифицированных этандиолом-1,2 (25 %)

При дальнейшей вытяжке возникают поперечные силы, стремящиеся уменьшить его диаметр и обуславливающие выдавливание пластификатора. Вследствие этого межмолекулярное взаимодействие снова возрастает, способствуя формированию тонкого непрерывного волокна.

Для характеристики эффективности воздушной фильтрации относятся: массовые концентрации частиц диаметром менее 10 мкм ( $PM_{10}$ ) и менее 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ). Важнейшим параметром разрабатываемых материалов для СИЗов является эффективность фильтрации аэрозоля, содержащего твердые и жидкие микро- и наночастицы с вирусами (от 0,03 до 0,1 мкм), т. е. способность препятствовать их проникновению через фильтрационный материал. Нетканый полипропиленовый материал SpunBel является коммерческим и активно используется для создания фильтров и масок. Его фильтрующие свойства недостаточны (41,5 %) для самостоятельного использования (рис. 2).

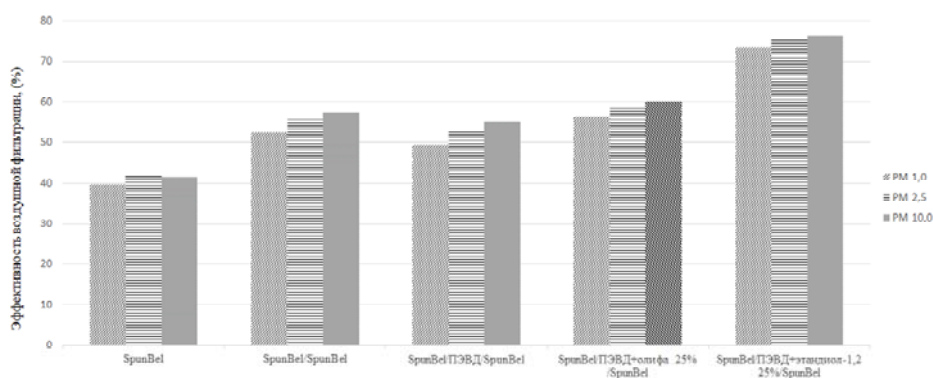


Рис. 2. Диаграмма эффективности воздушной фильтрации для исходных SpunBel и прослойкой из пластифицированных волокон ПЭВД для фильтруемых частиц размером 1, 2,5 и 10 мкм

Установлено, что для образцов SpunBel/ПЭВД+этандиол-1,2 (25 %)/SpunBel наблюдалось увеличение эффективности воздушной фильтрации более чем на 26,3 %, причем для мелкодисперсных частиц разница наибольшая (27 %) в сравнении с исходной SpunBel/SpunBel (рис. 3).

Применение в качестве прослойки между фильтрами SpunBel волокон ПЭВД пластифицированных олифой оказалось менее эффективным и составило в среднем 3,1 %, а для мелкодисперсных частиц – 3,8 %.

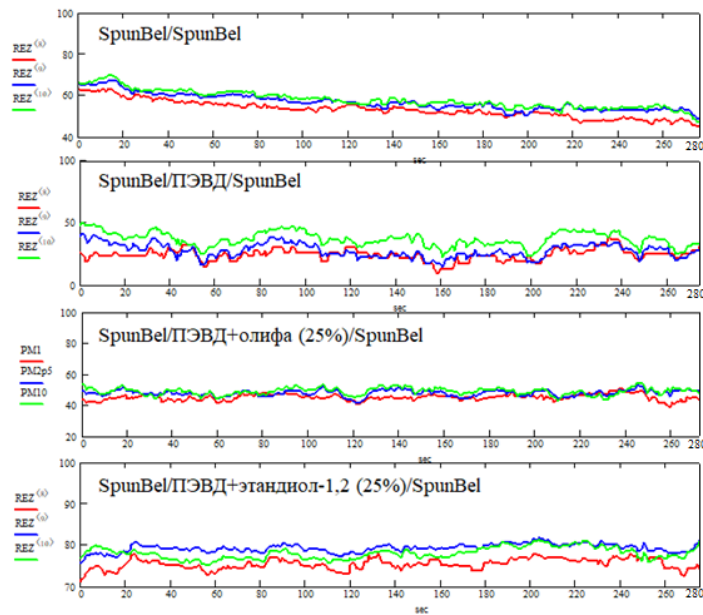


Рис. 3. Эффективность воздушной фильтрации нетканых полимерных материалов по  $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10,0}$

Указанные особенности формирования волокон коренным образом отличаются от методов получения химических волокон, применяемых в настоящее время. Бесфильтр-ерная вытяжка волокон из пластифицированных расплавов полимеров создает возможности для разработки новых видов волокнистых полимерных материалов, обладающих рядом уникальных свойств.

*Работа проведена при финансовой поддержке БРФФИ X21УЗБГ-030.*

#### Литература

1. Yoon K., Hsiao B. S., Chu B. Functional nanofibers for environmental applications, *J. Mater. Chem.* 18 (44) (2008) 5326–5334.
2. Современные технологии производства нетканых материалов / И. Ш. Абдуллин [и др.] // *Вестн. Казан. технолог. ун-та.* – 2014. – Т. 17, № 19. – С. 114–119.
3. Перепелкин, К. Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности // *Рос. хим. журн. (Журн. рос. хим. о-ва им. Д. И. Менделеева).* – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 31–48.
4. Калиновски, Е. Химические волокна / Е. Калиновски, Г. В. Урбанчик. – М. : Легкая индустрия, 1966. – 251 с.
5. Перепелкин, К. Е. Структура и свойства волокон / К. Е. Перепелкин. – М. : Химия, 1985. – 208 с.
6. Face masks and respirators in the fight against the COVID-19 pandemic: A review of current materials, advances and future perspectives / К. O’Dowd [et al.] // *Materials (Basel).* – 2020. – Vol. 13, № 15. – P. 3363 (1–27).
7. Lustig, S. R. [et al.] “Effectiveness of Common Fabrics to Block Aqueous Aerosols of Virus-like Nanoparticles”, *ACS Nano.* – Vol. 14, № 6. – P. 7651–7658, 2020. – DOI: 10.1021/acsnano.0c03972.
8. Tcharkhtchi A., Abbasnezhad N., Zarbini Seydani M., Zirak N., Farzaneh S. and Shirinbayan M. “An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration”, *Bioact. Mater.* – Vol. 6, № 1. – P. 106–122, 2021. – DOI: 10.1016/j.bioactmat.2020.08.002.

**ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ «МЯГКОГО» ОБЖАТИЯ  
НА КАЧЕСТВО НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА  
ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

**В. С. Путеев**

*ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин,  
Республика Беларусь*

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Технология «мягкого обжатия» заключается в незначительном обжатии бьюма по толщине заготовки в промежутке времени конца лунки жидкого металла, начала образования так называемой смешанной двухфазной зоны слитка. Осуществление данного процесса обеспечивается путем давления, осуществляемого роликами правильно-тянущего механизма (ПТМ) в соответствии с заданными режимами.

Принципом работы системы является предварительный математический расчет длины жидкой сердцевины трех участков: на первом участке подпитка усадочных пустот происходит без ограничений, на втором жидкий металл встречает сопротивление дендридной сетки и протекает в режиме фильтрации, на третьем участке усадочные поры разделены непроницаемыми перегородками, поэтому усадка металла при затвердевании вызывает образование пористости.

Особенно важно точно определить протяженность жидкой лунки, так как при слишком большой доле жидкой фазы в двухфазной зоне и применения обжатия заготовки возможно получение неблагоприятного результата, а именно – развитие внутренних трещин и микронадрывов, обогащенных ликватами на границе разделов фаз. При малой доле жидкой фазы в двухфазной зоне из-за достаточно высокого сопротивления деформации материала положительный эффект не будет достигнут либо для этого потребуются применение значительных сил обжатия, что может привести к появлению внутренних трещин в температурном интервале хрупкости.

Принципиальная схема применения «мягкого» обжатия реализована двумя способами или системами:

1. Статический – при данной системе в предполагаемой зоне обжатия заготовки устанавливаются определенные значения усилий давления прижимного ролика в зависимости от длины жидкой лунки и процентного, твердо-жидкого двухфазного состояния непрерывнолитой заготовки. Это наиболее простой метод, который тем не менее имеет эксплуатационные ограничения, поскольку для его применения необходим набор значений постоянных скоростей разливки в определенном интервале температур стали для получения стабильного количества смешанного (твердо-жидкого) состояния стали в зоне действия ПТМ.

2. Динамический – при этой системе заготовка подвергается обжатию в абсолютных значениях по высоте слитка (мм), при этом усилие обжатия определяется необходимостью достижения заданного значения высоты заготовки. Таким образом, при изменении скоростных режимов разливки зона обжатия заготовки изменяется по длине дуги и в случае выполнения заданных условий возможно применение технологии «мягкого» обжатия. Несмотря на то что данный метод является более сложным с точки зрения управления, он позволяет обеспечить более высокую степень гибкости при разливке стали, которая дает возможность выполнить программы производства сталеплавильного цеха и настроить работу МНЛЗ с учетом логистики производства стали.

При регулируемом мягком обжатии реализуются три основные концепции:

- непрерывный расчет доли твердой фракции на оси блюма с помощью математической модели, которая позволяет выдавать результаты расчетов в режиме «онлайн» с высокой частотой;
- расчет степени обжатия и ее соответствия заданной величине; передача полученных результатов в виде сигналов на каждый тянущий ролик посредством специализированной системы автоматизации;
- непрерывная адаптация ступеней мягкого обжатия к меняющимся параметрам процесса.

Верно установленные параметры обжатия гарантируют приложение необходимых усилий в каждом блоке роликов с максимальной точностью и предотвращают возникновение внутренних трещин.

В ходе освоения технологии разливки стали основное применение «мягкого» обжатия слитка осуществлялось на высокоуглеродистых марках стали для производства передельной заготовки.

Так, скорость разливки составляла от 0,80 до 1,0 м/мин, мягкое обжатие на начальном этапе выставлялось в ручном режиме, далее производилась корректировка параметров обжатия от скорости разливки, температуры металла в промежуточном ковше и анализа макроструктуры полученной заготовки.

Для определения корреляции расчетной модели затвердевания и фактической температуры поверхности блюма в зоне тянущих модулей, лазерным пирометром «Raygei 3i» производились измерения температуры поверхности разливаемого блюма в определенных точках на радиальной части МНЛЗ.

В данный период производства стали более 20 % плавок стали 80К имели значения подусадочной ликвации более 3-х баллов, а также наблюдались внутренние «залеченные» надрывы от обжатия, что в итоге не позволило получить необходимый уровень качества в катанке  $\varnothing$  5,5 мм.

Также оценочным параметром качества заготовки # 125 мм являлось отношение содержания углерода в центре темплета к среднему содержанию углерода в середине образца, отобранное в четырех местах ( $K = C_1/C_{cp2} \leq 1,06$ ). Таким образом, учитывая неудовлетворительное качество полученной макроструктуры, а также в связи с низкой эксплуатационной стойкостью датчиков положения уровня ПТМ, что зачастую не позволяло использовать режим «мягкого обжатия», было принято решение подбора обжатия в статическом режиме – применения постоянных значений усилий в определенных температурно-скоростных интервалах разливки стали.

Опробованное применение статического метода обжатия заготовки показало возможность снижения ликвации углерода при условии выполнения определенных требований технологического процесса. Эмпирическим путем были определены: скорость разливки, зона применения обжатия, значения усилий ПТМ, а также суммарная величина обжатия слитка.

Для оценки качества структуры металла, разлитого с применением «мягкого» обжатия, отбирались продольные и поперечные темплеты. На примере нескольких плавок стали марки 80К можно проследить изменения в макроструктуре металла. Таким образом, степень «мягкого» обжатия применяемая в определенном сечении относительно продольной оси блюма является одним из основных вариантов необходимого регулирования сегрегации углерода в осевой зоне. Точность определения условий затвердевания, величин усилий в зависимости от доли твердой фазы является решающим фактором, обуславливающим получение достоверных результатов при использовании модели.

В результате работы выполнен подбор параметров «мягкого» обжатия для высокоуглеродистых марок стали (70, 80, 90К) как статического, так и для динамического вариантов обжатия непрерывнолитой заготовки; установлены интервалы применения и количество участвующих в обжатии ПТМ в двухфазной зоне в зависимости от марки стали; уровень подсадочной ликвации снижен до 1–1,5 балла, при среднем значении 1,7 балла; увеличена производительность передела на сортовом стане за счет исключения слиттинг процесса.

### **ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ СВИВКИ МЕТАЛЛОКОРДА ИЗ ТОНКОЙ СТАЛЬНОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ**

**В. А. Петрусевич**

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Прогнозирование моделируемых процессов или объектов возможно путем представления их поведения в виде функции. При этом в модель, как правило, вводятся постоянные (коэффициенты), описывающие специфику поведения процесса. При этом вводимые постоянные характеризуют непосредственно процесс без уточнения физического смысла самих постоянных.

Ранее разработана зависимость для расчета величины или численного критерия относительной обрывности металлокорда, позволяющей прогнозировать величину относительной обрывности перед началом производства или снижать эту величину в действующем производстве металлокорда:

$$B = \frac{E \varepsilon_{св}}{\sigma_b \delta} \cdot \frac{K_{констр} K_C K_V}{K_N}, \text{ обр/т,}$$

где  $E$  – модуль упругости Юнга тонкой проволоки, Па;  $\sigma_b$  – предел прочности при растяжении тонкой проволоки, Па;  $\delta$  – относительное удлинение тонкой проволоки при растяжении, %;  $\varepsilon_{св}$  – максимальная эквивалентная деформация проволоки в процессе свивки, %;  $K_{констр}$  – коэффициент, учитывающий конструкцию металлокорда;  $K_C$  – коэффициент, учитывающий влияние содержания углерода в стали проволоки на обрывность м/корда при свивке;  $K_N$  – коэффициент, учитывающий программу выпуска металлокорда;  $K_V$  – коэффициент, характеризующий влияние скорости тонкого волочения на обрывность проволоки при свивке в металлокорд.

На основании анализа технологических параметров определен коэффициент  $K_{констр}$ , учитывающий влияние сложности конструкции металлокорда на его обрывность при свивке на канатной машине, который равен:

1) для металлокорда, свиваемого на канатной машине TD2:

$$2 \times 0,30 \text{ НТ} - K_{констр} = 1,2;$$

$$2 + 1 \times 0,30 \text{ НТ} - K_{констр} = 2,4;$$

$$2 + 2 \times 0,30 \text{ ШТ} - K_{констр} = 3,8;$$



2) для металлокорда, свиваемого на канатной машине Ri10-ВМ:

$$3 + 2 \times 0,35 \text{ UT коэффициент } K_{\text{констр}} = 9;$$

$$4 + 3 \times 0,35 \text{ UT коэффициент } K_{\text{констр}} = 11.$$

Количество обрывов также изменяется с ростом выпуска металлокорда. Объяснение этой взаимосвязи заключается в зависимости среднего значения относительной обрывности металлокорда от характеристик выборки выпуска металлокорда: количества наблюдений, типа распределения и среднеквадратичного отклонения. Количественное влияние величины выборки на относительную обрывность предлагается оценивать коэффициентом  $K_N$ . Методом статистического анализа определено:

1) для объема производства менее 20 т:

$$K_N = 2,009N^{0,0811};$$

2) для объема производства от 20 до 100 т:

$$K_N = 0,068N + 1,2;$$

3) для объема производства более 100 т:

$$K_N = 4\log(N),$$

где  $N$  – объем производства металлокорда, т.

Влияние содержания углерода в стали проволоки на обрывность металлокорда при свивке связано с влиянием углерода на пластические свойства проволоки. Это влияние учитывается коэффициентом  $K_c$ . Статистическим анализом производственных данных определено:

$$K_c = 1 + \frac{C - 0,8}{0,8},$$

где  $C$  – содержание углерода в стали в относительных единицах.

При изменении скорости волочения проволоки с содержанием углерода свыше 0,8 % следует учитывать температурное влияние на пластические свойства тонкой проволоки и, как следствие, на изменение обрывности м/корда при ее дальнейшей свивке. Это влияние учитывается коэффициентом  $K_V$ , который рассчитывается для заэфэктоидных сталей (содержание углерода больше 0,8 %) по полученной эмпирической формуле:

$$K_V = 0,34 \cdot e^{0,21V_b},$$

где  $V_b$  – скорость тонкого волочения проволоки, м/с.

Для доэфэктоидных сталей (содержание углерода меньше 0,8 %) и эфэктоидных сталей (содержание углерода 0,8 %)  $K_V = 1$ .

## **ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТОВАННЫХ И НИТРОЦЕМЕНТОВАННЫХ СЛОЕВ СТАЛИ 16CrMnS5**

**А. В. Рабков, 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**

*ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Республика Беларусь*

Научный руководитель И. Н. Степанкин

Традиционно в машиностроительном производстве Республики Беларусь и стран СНГ для изготовления различного рода деталей машин с поверхностным диффузионным упрочнением применяются конструкционные стали 18ХГТ, 12ХНЗА, 20ХГР, 20ХНЗА и др. В настоящее время на металлургическом заводе ОАО «БМЗ – УКХ «БМК» производят сортовой прокат для стран ЕС из стали 16CrMnS5 по DIN EN 1084. Актуальной является проблема расширения линейки используемых традиционных материалов материалами-заменителями из-за низкой информативности о свойствах новых сталей. Для решения этой задачи необходимо изучить свойства указанного сплава, чтобы применять его для изготовления деталей машин, работающих в условиях контактного изнашивания – зубчатые колеса, вал-шестерни, кулачки и др. Для них основным параметром повышения износостойкости является твердость, которая повышается с увеличением углерода в ней. Классическими и легко осуществляемыми способами диффузионного упрочнения поверхности деталей являются цементация и нитроцементация [1], [2].

Целью работы является установление влияния длительности цементации и нитроцементации на структуру, микротвердость и износостойкость стали 16CrMnS5.

Объектом исследований являлись термодиффузионно-упрочненные слои стали 16CrMnS5. Диффузионное насыщение сплава осуществлялось путем проведения цементации при температуре 920 °С в течение 8-ми и 12-ти часов и нитроцементации при температуре 860 °С в течение 6-ти и 8-ми часов в твердом карбюризаторе. После ХТО проводилась закалка в масле с температуры 860 °С и отпуск при 200 °С в течение одного часа. Исследования микроструктуры и особенностей разрушения упрочненных слоев проводились на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление микрошлифов проводилось в 2,5–5%-ном спиртовом растворе HNO<sub>3</sub>. Распределение микротвердости термодиффузионно-упрочненных слоев определяли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 2Н. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое инструмента при многократном контактом воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [3]. Регистрация величины износа заканчивалась при достижении глубины лунки износа более 0,6 мм. Испытания проводились при амплитуде контактных напряжений 950 МПа.

Микроструктура науглероженных слоев представляет матрично-аустенитную матрицу с карбидными включениями (рис. 1, а, б), объемное количество которых увеличилось с 18 до 26 % при увеличении длительности ХТО с 8-ми до 12-ти ч соответственно. Их максимальный размер в процессе науглероживания достиг 20 мкм. Микротвердость поверхности слоев составила 7000–7500 МПа, сердцевины – 3500–4000 МПа. Общая толщина диффузионных слоев достигла 1,9–2,1 мм.

Микроструктура нитроцементованных слоев (рис. 2) стали 16CrMnS5 значительно отличается от цементованных (рис. 1). Структура слоя, сформированного после 6-часовой нитроцементации, состоит из мартенсита и остаточного аустенита (рис. 2, а). После увеличения длительности ХТО до 8-ми часов (рис. 2, б) в поверхностном слое обнаружены мелкодисперсные включения, предположительно карбонитридного типа размером не более 5 мкм. Главным отличием нитроцементованных слоев от цементованных оказалось снижение их общей толщины до 1,0–1,1 мм.

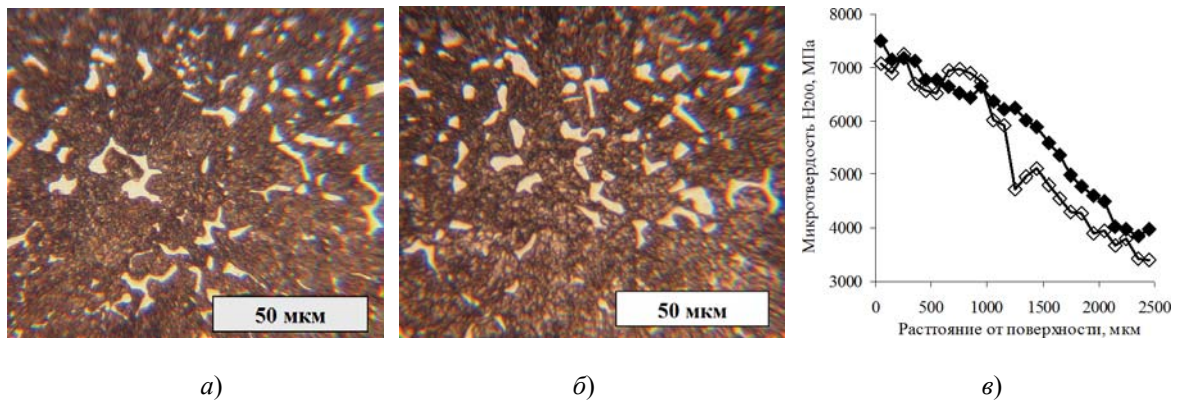


Рис. 1. Структура заэвтектоидной зоны цементованных слоев стали 16CrMnS5 после 8-часовой (а) и 12-часовой (б) ХТО, распределение микротвердости по сечению слоев (в): ♦ – 8 ч; ◇ – 12 ч

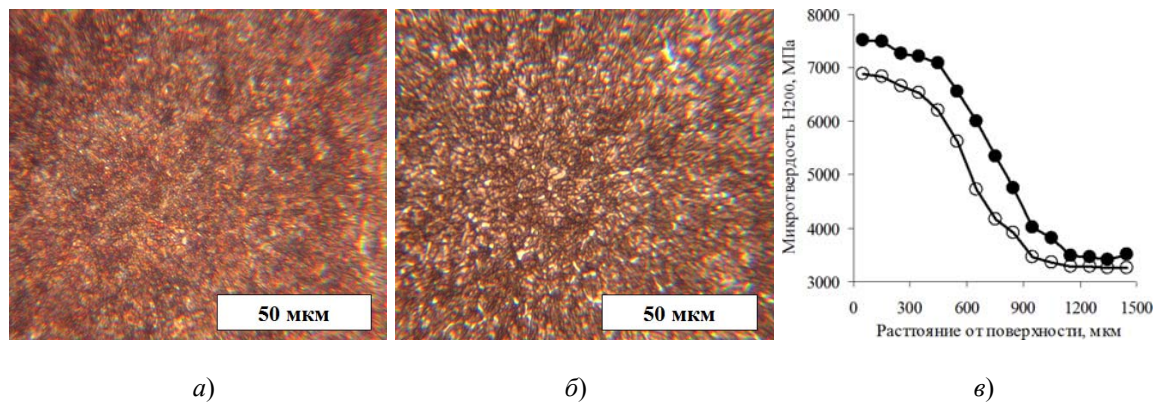


Рис. 2. Структура заэвтектоидной зоны нитроцементованных слоев стали 16CrMnS5 после 6-часовой (а) и 8-часовой (б) часовой ХТО, распределение микротвердости по сечению слоев (в): ○ – 6 ч; ● – 8 ч

На рис. 3 приведен график зависимости износа диффузионно-упрочненных слоев стали 16CrMnS5 от числа циклов нагружения в условиях воздействия контактных напряжений амплитудой 950 МПа. Анализ кривых показал, что зависимости износа всех диффузионных слоев имеют близкое распределение. Отчетливо выделяются три этапа изнашивания. На первом этапе, длительностью 1000–1500 циклов, происходит приработка контактирующих поверхностей образцов и контртела.

Второй этап отличается высокой износостойкостью – практически без износа. Его длительность оказалась в интервале 16–20 тыс. нагружения. Глубина лунки износа для всех партий образцов не превысила 0,05 мм.

На третьем этапе интенсивность изнашивания повысилась. Скорость износа составила около 0,020–0,025 мм на каждые 1000 циклов нагружения. Предельный износ науглероженные образцы достигли при 39–40 тыс. циклов нагружения. Отличительной особенностью нитроцементованных образцов является аномально высокая скорость изнашивания при достижении лунки износа около 0,4 мм (~32 тыс. циклов). Это связано резким снижением микротвердости на глубине около 0,5 мм (рис. 2, в), после превышения которой слои не способны сопротивляться воздействию контактных нагрузок при данных напряжениях.

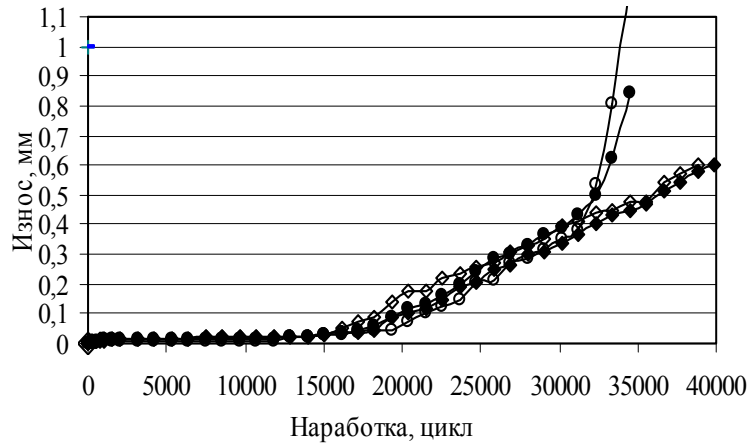


Рис. 3. Зависимости износа диффузионно-упрочненных слоев стали 16CrMnS5:

◆ – 8-часовая цементация; ◇ – 12-часовая цементация; ○ – 6-часовая нитроцементация; ● – 8-часовая нитроцементация

Анализ структурных превращений, проведенный при высоком разрешении, позволяет обнаружить эффект пластической деформации карбидной фазы, выявленный на науглероженных образцах – наклеп, переориентация карбидов, а также разделение крупных карбидов на отдельные мелкие частицы уже при первых 1000 циклах нагружения (рис. 4, а). Для нитроцементованных слоев происходит аналогичный процесс – протекание наклепа (рис. 4, б). В процессе увеличения наработки формирующиеся трещины контактной усталости растут, образуя в итоге питтинги (рис. 4, в, г). Их появление провоцирует уменьшение площади контакта и, соответственно, увеличение интенсивности износа (3 этап).

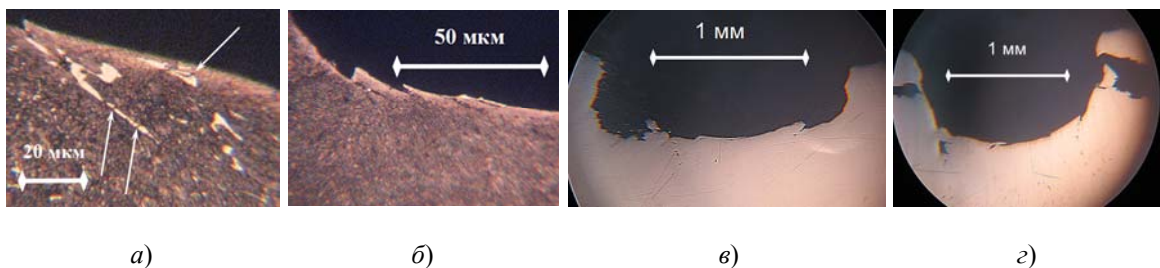


Рис. 4. Особенности разрушения термодиффузионных слоев стали 16CrMnS5

Исследовано структурообразование и свойства термодиффузионных слоев стали 16CrMnS5. Анализ данных позволил сделать следующие выводы:

1. Проведение цементации в обоих случаях формирует мартенситно-аустенитную металлическую матрицу, в которой расположены разрозненные карбиды. Их объемная доля при увеличении цементации с 8-ми до 12-ти часов возросла с 18 до 26 %. Обнаружено, что в слое после 8-часовой нитроцементации начали формироваться мелкодисперсные карбонитриды, которые не обнаружены в слое после 6-часовой нитроцементации. Микротвердость поверхности всех исследованных слоев составила 7000–7500 МПа, а сердцевины – 3500–4000 МПа. Общая толщина цементованных слоев примерно в 2 раза больше, чем нитроцементованных – 1,9–2,1 мм и 1,0–1,1 мм соответственно.

2. Этап высокой износостойкости отмечен у всех исследованных слоев, который составил 16–20 тыс. циклов нагружения при амплитуде контактных напряжений 950 МПа. Из-за возникновения питтингов на поверхности лунки износа образцов интенсивность износа увеличилась. Скорость износа составила около 0,020–0,025 мм на каждые 1000 циклов нагружения. Следует отметить, что эта тенденция сохранилась только для науглероженных слоев, которые достигли предельного износа при 39–40 тыс. циклов нагружения. Для нитроцементованных образцов обнаружен аномальный износ при достижении глубины лунки износа 0,4 мм. Это связано с уменьшением общей толщины слоя в 2 раза. На глубине более 0,5 мм микротвердость резко снижается, а, соответственно, материал с малой твердостью не способен сопротивляться процессам контактной усталости при воздействии на него напряжений с амплитудой 950 МПа.

3. Для деталей машин с поверхностным упрочнением, у которых допустимый износ поверхности составляет около 0,6 мм, нитроцементацию целесообразно проводить из-за малой толщины диффузионного слоя.

#### Литература

1. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г. В. Борисенок [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
3. Устройство для испытания на контактную усталость и износ : пат. ВУ 7093 / И. Н. Степанкин, В. М. Кенько, И. А. Панкратов. – Опубл. 28.02.2011.

### **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 18ХГТ**

**А. В. Рабков, 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**

*ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Республика Беларусь*

Научный руководитель И. Н. Степанкин

При выборе материалов для изготовления деталей машин конструкционного назначения инженерно-конструкторские работники ориентируются на механические и эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали. Для придания требуемых

свойств поверхности изделий необходима модификация материала после их механической обработки. В качестве наиболее распространенных способов изменения свойств поверхности деталей применяются методы диффузионного насыщения – цементация, азотирование, нитроцементация и цианирование [1], [2]. Среди приведенных технологически простыми и менее длительными являются цементация и нитроцементация. В качестве сплава для изготовления таких деталей, как зубчатые колеса, вал-шестерни, распределительные валы, кулачки и других применяется конструкционная низколегированная сталь 18ХГТ. Наличие в ее химическом составе титана может существенно повлиять на структурообразование и свойства упрочненного сплава.

Целью работы является определение влияния продолжительности цементации и нитроцементации на структурообразование и микротвердость модифицированных слоев стали 18ХГТ.

Объектом исследований являлись диффузионные слои, сформированные на образцах из конструкционной стали 18ХГТ. Диффузионное насыщение осуществлялось двумя методами – цементацией и нитроцементацией. Цементацию проводили при температуре 920 °С в течение 8-ми и 12-ти часов в древесно-угольном карбюризаторе с добавлением углекислого бария, нитроцементацию – при температуре 850 °С в течение 6-ти и 8-ми часов в древесно-угольном карбюризаторе с добавлением карбамида. Окончательные структура и свойства слоев придавались путем проведения закалки с температуры 860 °С в масле и низком отпуске при температуре 200 °С в течение одного часа. Исследование микроструктуры осуществлялось на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление микрошлифов проводилось в 2,5–5%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Распределение микротвердости по сечению диффузионных слоев определялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 2Н. Определение объемной доли карбидной фазы в заэвтектоидном слое определялось методом случайных секущих.

Структура поверхности термообработанных цементованных слоев представляет мартенситную основу с включениями остаточного аустенита и карбидов (рис. 1). При увеличении длительности цементации особых различий в морфологии карбидной фазы не выявлено. Карбидная фаза разделена на две зоны. В первой зоне карбиды представлены в виде отдельных сферических и продолговатых включений, максимальная длина которых не превышает 20 мкм. Однако при изменении времени насыщения углеродом данная зона увеличивается с 90 мкм (рис. 1, а) до 110 мкм (рис. 1, б). В данном слое объемная доля карбидной фазы в металлической матрице при увеличении времени насыщения увеличилась с 35 до 50 %. Во второй зоне карбидная фаза представляет собой цементитную сетку. Глубина распространения карбидов составила 0,30 и 0,40 мм после 8- и 12-часового насыщения соответственно.

Микроструктура нитроцементованных (рис. 2) слоев стали 18ХГТ отличается от цементованных (рис. 1) за счет присутствия избыточной карбонитридной фазы вместо карбидной. Причем карбонитриды значительно меньше по размерам, чем карбиды. Их величина не превышает 10 мкм, а морфология представлена отдельными мелкими сферическими с присутствием коагулированных продолговатых частиц. Объемная доля карбонитридов, определенная в поверхностном слое 0,05 мм, в обоих исследованных случаях составляет около 25 %. После 6-часовой ХТО (рис. 2, а) частицы распространены на глубину до 50 мкм от поверхности, в то время как после 8-часовой ХТО (рис. 2, б) их наличие обнаружено на расстоянии 200 мкм от поверхности образца. В микроструктуре нитроцементованных слоев стали 16CrMn5S5, которая является близким аналогом по химическому составу, видимые карбонитриды обнаружены в небольшом количестве только в образце, подвергнутом 8-часовой нитроцементации [2]. Это может свидетельствовать о том, что присутствие в химическом составе стали титана – сильного карбидо-

и нитридообразующего элемента [3], [4], – способствует появлению избыточных фаз, влияющих на износостойчивость сплава. Следует отметить наличие зоны, распространенной на глубине 0,10–0,13 мм от поверхности, с практически полным отсутствием видимых частиц (рис. 2, б).

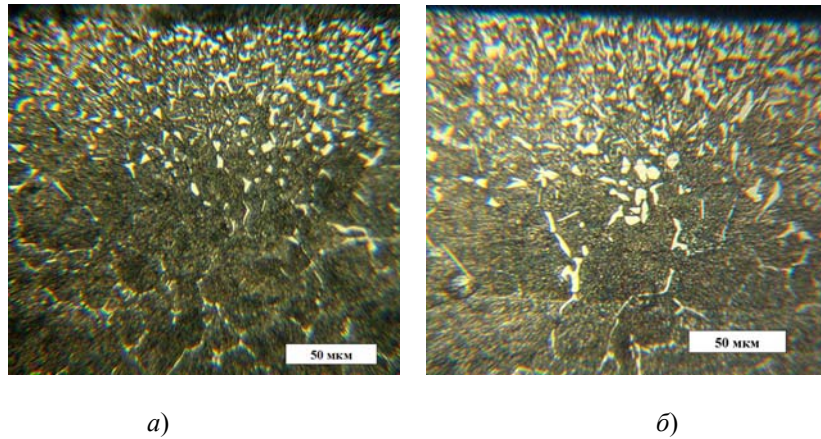


Рис. 1. Морфология карбидной фазы в заэвтектоидном слое стали 18ХГТ после проведения цементации в течение 8-ми (а) и 12-ти (б) часов

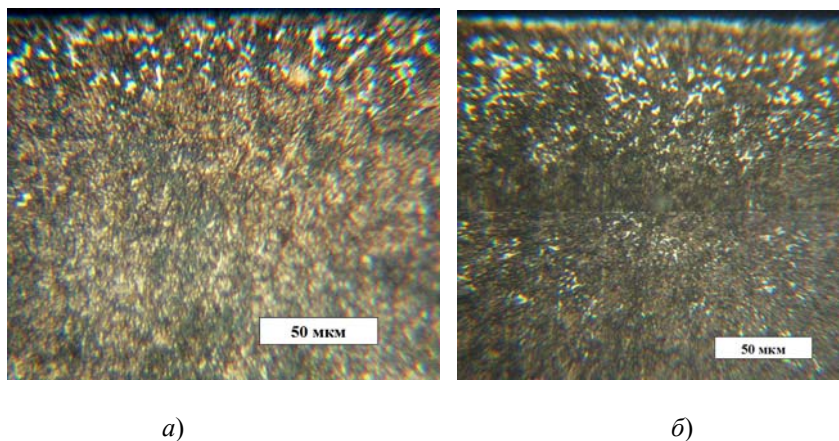


Рис. 2. Морфология поверхности нитроцементованных слоев стали 18ХГТ после проведения нитроцементации в течение 6-ти (а) и 8-ми (б) часов

Изучение графиков распределения микротвердости по сечению науглероженных слоев показало, что их зависимости имеют достаточно близкое распределение (рис. 3, а). Единственным различием является повышенная микротвердость поверхности у 12-часового насыщения, которая составила 7500 МПа, по сравнению с 8-часовым – 6500 МПа. Общая толщина цементованных слоев оказалась на уровне около 2,0 мм. Микротвердость сердцевины – 3800–4200 МПа.

Проведение нитроцементации позволило сформировать очень близкие зависимости распределения микротвердости по сечению слоев (рис. 3, б). Микротвердость поверхности составила 6800–7000 МПа. Затем она плавно понижается до твердости сердцевины, которая колеблется в достаточно широком интервале от 2800 до 3700 МПа. Главным отличием нитроцементованных слоев от цементованных оказалась уменьшенная в два раза толщина модифицированных слоев – 1,0–1,1 мм.

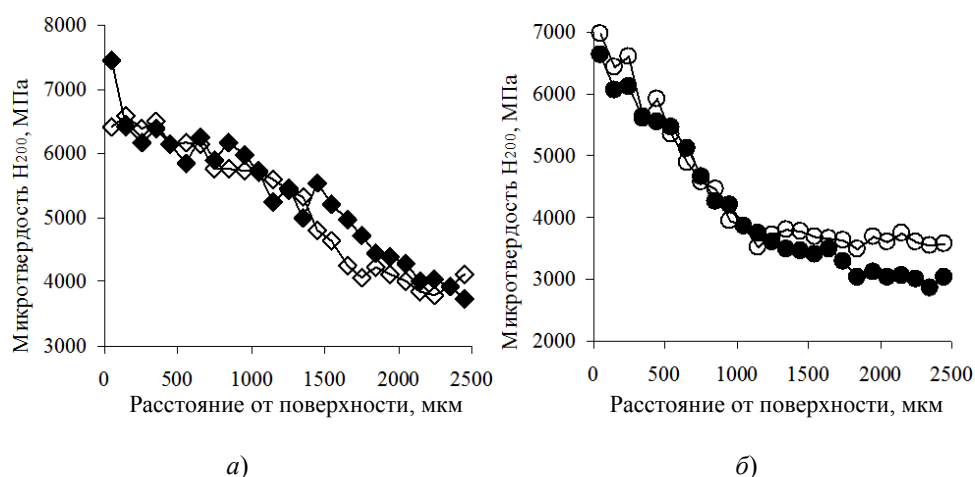


Рис. 3. Распределения микротвердости науглероженных (а) и нитроцементованных (б) слоев стали 18ХГТ:  
 ◊ – 8-часовая цементация; ◆ – 12-часовая цементация;  
 ○ – 6-часовая нитроцементация; ● – 8-часовая нитроцементация

В результате проведенных исследований диффузионных слоев стали 18ХГТ можно сделать следующие выводы:

1. Проведение цементации в обоих случаях формирует мартенситно-аустенитную матрицу, в которой расположены разрозненные карбиды сферической и продолговатой формы длиной не более 20 мкм. Их объемная доля при увеличении цементации с 8-ми до 12-ти часов возросла с 35 до 50 %, а толщина заэвтектоидной зоны возрастает с 0,3 до 0,4 мм. Микротвердость поверхностного слоя у образца после 12-ти часов ХТО достигла 7500 МПа, что на 1000 МПа выше, чем у образца после 8-часового насыщения. Общая толщина цементованных слоев оказалась на уровне около 2,0 мм.

2. В нитроцементованных слоях избыточная карбонитридная фаза в обоих случаях составила около 25 %. Однако увеличение длительности процесса с 6-ти до 12-ти часов показало диффузию углерода и азота на большую глубину – с 0,05 до 0,2 мм. Зависимости распределения микротвердости оказались достаточно близкими. Микротвердость поверхности составила 6800–7000 МПа. Общая толщина нитроцементованных слоев (1,0–1,1 мм) меньше в 2 раза по сравнению с цементованными (2,0 мм).

3. Присутствие небольшого количества титана в химическом составе стали 18ХГТ позволяет формировать модифицированные слои с более развитой карбидной и карбонитридной фазами, чем у стали 16CrMnS5, что может существенно повлиять на их износостойкость.

#### Литература

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г. В. Борисенко [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Микроструктура и микротвердость термодифузионно-упрочненных слоев конструкционной стали 16CrMnS5 / И. Н. Степанкин [и др.] // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. / 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, 2021. – С. 84–88.
3. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
4. Прженосил, Б. Нитроцементация : пер. с чешского / Б. Прженосил. – Л. : Машиностроение, 1969. – 212 с. : ил.



## СЕКЦИЯ III ЭНЕРГЕТИКА

---

### ВЛИЯНИЕ СВЕТОДИОДНОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ФОРМУ КРИВОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

А. С. Мазурова

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

Научные руководители: О. Г. Широков, Т. В. Алфёрова

Пятая часть производимой в мире электрической энергии расходуется на освещение улиц населенных пунктов, промышленных предприятий, предприятий торговли и т. д. Такие большие затраты электроэнергии связаны в основном с применением устаревших источников света. Однако прогресс в создании новых высокоэффективных источников света дает возможность кардинального решения проблемы расхода электроэнергии на освещение.

В связи с постоянным ростом потребностей людей в использовании искусственного освещения остро стоит вопрос о высокоэффективных источниках света, которые смогли бы не только удовлетворить спрос на качественное освещение, но и обеспечить минимальные затраты электроэнергии.

В настоящее время стала популярной тема светодиодных светильников. Именно это направление в освещении считается наиболее перспективным [1].

Светодиодные лампы, или как их еще обозначают, LED-лампы, – это современный этап в развитии осветительной техники. Еще несколько лет назад они были редкостью, а в настоящее время приобрести их можно в любом объекте торговли, продающем светотехнику [2].

Светодиодные лампы имеют три основных преимущества [3]:

– *низкое энергопотребление*. Светодиодные лампы намного экономичнее своих предшественников. Потребление электроэнергии у таких светильников в десять раз меньше, чем у моделей, оснащенных лампами накаливания;

– *срок службы*. Светодиодные лампы способны проработать до 11-ти лет непрерывно;

– *безопасность*. В отличие от люминесцентных ламп, светодиоды не содержат в себе ртути и прочих вредных металлов. Даже лампы накаливания более опасны своей стеклянной колбой.

Однако недостатков у данных ламп больше [3]:

– *стоимость*. Среди прочих ламп светодиодные не только самые экономичные, но и самые дорогие. Стоимость светильников с такими лампами, как и самих ламп, в несколько раз превышает цену на люминесцентные;

– *срок службы*. Между заявленными 100000 часами работы и реальным сроком службы таких ламп есть определенный нюанс. В процессе работы таких светильников происходит так называемая «деградация» кристаллов в светодиодной лампе. После определенного срока лампы начинают светить все слабее, а потом и вовсе перестают работать. В результате реальный срок работы таких ламп сокращается вдвое;

– *спектр свечения*. Особый световой спектр светодиодов нравится далеко не каждому и может вызывать определенный дискомфорт;

– *четкая направленность светового потока*. Для качественного освещения комнаты понадобится больше светильников, оснащенных светодиодами, чем в случае с другими лампами. Существуют модели со специальными рассеивающими фильтрами, но в таком случае страдает интенсивность светового потока;

– *плохая совместимость с электросетями*. Не секрет, что напряжение в электросети достаточно часто подвергается перепадам. Системы охлаждения и специальные источники питания для светодиодных светильников необходимы. Без этих элементов лампы портятся быстрее. В свою очередь, данные системы очень чувствительны к перепадам напряжения в электросети.

В настоящее время светодиоды позиционируют себя как экологически чистые приборы, не требующие утилизации.

Целью данной работы является определение влияния светодиодной осветительной нагрузки на форму кривой потребляемого электрического тока и напряжения.

В работе использовались светодиодные лампы следующих фирм: Feron, Smartbuy, ETR и Philips.

**Оценка электромагнитной совместимости светодиодных источников света [4].** Несомненно, применение светодиодных источников света (СД ИС) обеспечивает существенное снижение электропотребления. Однако применение светодиодов сопровождается рядом особенностей, связанных с наличием в кривой потребляемого ими тока высших гармоник. Это связано с тем, что СД ИС представляют собой нелинейную электрическую нагрузку с нелинейностью характеристик самих СД ИС и применением в качестве источника питания светодиодов электронных преобразователей. Суммарный эффект таких нагрузок выражается в искажении кривой тока, потребляемого из сети, и протекании высших гармоник по всем элементам системы электроснабжения, что отрицательно воздействует на все оборудование, сокращая срок его службы.

Проблемы, создаваемые гармониками:

– дополнительный нагрев и выход из строя конденсаторов, трансформаторов, электродвигателей, кабелей и т. п.;

– ложные срабатывания автоматических выключателей и предохранителей;

– наличие третьей гармоники и ее производных (9, 12 и т. д.) в нейтрали может потребовать увеличения сечения ее проводника;

– гармонический шум (частые переходы через 0) может служить причиной неправильной работы компонентов систем контроля;

– повреждение чувствительного электронного оборудования;

– интерференция систем коммуникации.

В соответствии с [5] суммарный коэффициент гармонических составляющих (total harmonic distortion, thd)  $THD_Y$  обозначает отношение среднеквадратичного значения суммы всех гармонических составляющих  $Y_{H,h}$  до порядка  $h_{max}$  к среднеквадратичному значению основной составляющей  $Y_{H,1}$ :

$$THD_Y = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left( \frac{Y_{H,h}}{Y_{H,1}} \right)^2}. \quad (1)$$

При необходимости символ  $Y$  заменяют символом  $I$  для тока и символом  $U$  для напряжения,  $h_{\max}$  принимают равным 40, если иное значение не установлено в международных стандартах, устанавливающих нормы эмиссии гармоник.

В соответствии с [5] суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  рассчитывается по формуле

$$K_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{40}} \left( \frac{U_{H,h}}{U_{H,1}} \right)^2}. \quad (2)$$

В соответствии с [5] суммарный коэффициент гармонических составляющих тока  $THD_I$  рассчитывается по формуле

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{40}} \left( \frac{I_{H,h}}{I_{H,1}} \right)^2}. \quad (3)$$

Световое оборудование с разрядными лампами, имеющее активную потребляемую мощность, не превышающую 25 Вт, должно соответствовать одному из приведенных ниже требований [5]:

– значения гармонических составляющих тока на 1 Вт мощности ТС не должны превышать норм гармонических составляющих тока, установленных в [5];

– значение гармонической составляющей тока 3-го порядка, выраженное в процентах от составляющей тока на основной частоте, не должно превышать 86 %, соответствующее значение гармонической составляющей пятого порядка не должно превышать 61 %.

Кроме того, форма кривой потребляемого тока должна быть такой, чтобы ток достигал 5 % пикового значения прежде фазового угла, равного  $60^\circ$ , достигал пикового значения прежде фазового угла  $65^\circ$  и не падал ниже 5 % прежде фазового угла  $90^\circ$  (за  $0^\circ$  принято значение фазового угла, соответствующего прохождению напряжения основной частоты через 0). Пороговое значение тока, равное 5 % наивысшего абсолютного значения в измерительном окне, и значения фазовых сдвигов получают в течение периода, включающего это абсолютное пиковое значение [5].

Если световое оборудование с разрядными лампами имеет встроенное устройство регулирования силы света, измерения проводят только в условиях полной нагрузки.

Выполнено экспериментальное исследование гармоник тока и напряжения для светодиодных ламп. Анализ полученных осциллограмм напряжений и токов показал следующее (рис. 1).

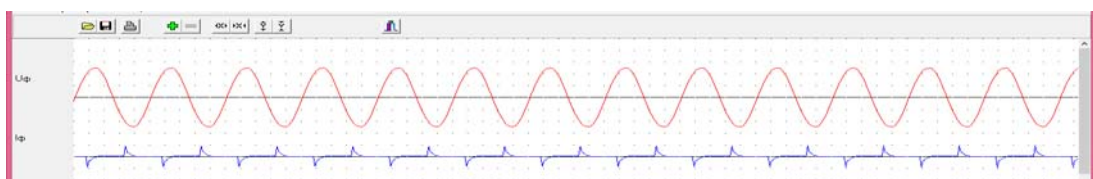


Рис. 1. Осциллограмма напряжения и тока при работе светодиодной лампы Feron

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  у всех ламп незначительный: лампа Feron,  $K_U = 0,031$  %; лампа Smartbuy,  $K_U = 0,042$  %; лампа ETR,  $K_U = 0,044$  %; лампа Philips,  $K_U = 0,031$  %. Полученные данные не превышают максимальные значения нормированные в ГОСТ 32144–2013.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока  $THD_I$  у всех ламп составляет: лампа Feron,  $THD_I = 68,91$  %; лампа Smartbuy,  $THD_I = 70,64$  %; лампа ETR,  $THD_I = 74,11$  %; лампа Philips,  $THD_I = 68,23$  %. ГОСТ 32144–2013 не нормирует суммарный коэффициент гармонических составляющих тока  $THD_I$  в процентном отношении.

#### Литература

1. Евминов, Л. И. Сравнительный анализ различных источников света и оценка электромагнитной совместимости безэлектродных (индукционных) и светодиодных источников света / Л. И. Евминов, В. С. Кизева // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 1.
2. Светодиодные лампы. Их преимущества и сфера использования. – Режим доступа: <https://www.maxcom.by/article/2018/05/28/svetodiodnye-lampy-ih-preimushchestva-i-sfera-ispolzovaniya>. – Дата доступа: 15.03.2022.
3. Преимущества и недостатки светодиодных ламп. – Режим доступа: [https://lu.ru/stati/preimuwestva\\_i\\_nedostatki\\_svetodiodnyh\\_lamp/](https://lu.ru/stati/preimuwestva_i_nedostatki_svetodiodnyh_lamp/). – Дата доступа: 15.03.2022.
4. Оценка режимов осветительных электрических сетей объектов ЖКХ со светодиодными источниками света / Ф. П. Говоров [и др.] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011. – № 11 (186). – С. 92–97.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ30804.3.2–2013 (IEC 61000-3-2:2009) Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. (IEC 61000-3-2:2009, MOD). – М. : Стандартинформ, 2014.

## АНАЛИЗ ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Е. В. Таранко, З. В. Ковганов

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель Н. А. Попкова

В современном мире все больше внимания уделяется минимизации влияния человека на окружающую среду. В сфере энергетики остро стоит вопрос, в пользу какого источника электроэнергии делать выбор. Исследовав различные виды производства электрической энергии, можно прийти к выводу, что атомная энергетика позволяет получать максимальное количество электроэнергии, используя минимальный объем топлива, при этом избегая выделения вредных побочных продуктов. Помехой перехода на ядерную энергию является отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), которое впоследствии рассматривают как радиоактивные отходы (РАО). Целью настоящего исследования стал поиск оптимального пути сокращения влияния ОЯТ на окружающую среду. В ходе исследования были поставлены задачи:

- 1) выявить преимущества и недостатки ядерных топливных циклов (ЯТЦ);
- 2) изучить возможность повторного использования компонентов ОЯТ;
- 3) сравнить методики обращения с ОЯТ разными странами;
- 4) рассчитать остаточное тепловыделение ядерного топлива.

Атомная электрическая станция (АЭС) производит электрическую энергию за счет энергии расщепления атомов урана. Тепловая энергия, высвобождающаяся при делении, используется для создания пара, который вращает турбину для выработки электроэнергии без вредных побочных продуктов, которые выделяет ископаемое топливо. Если рассматривать альтернативные источники энергии, которые практически не загрязняют атмосферу, можно заметить, что они уступают АЭС по единичной установленной мощности. Кроме того, солнечная энергия, необходимая для работы солнечных панелей, не поступает на их поверхность круглосуточно, а скорость ветра не всегда соответствует требуемым значениям, позволяющим эффективно вырабатывать энергию. АЭС требуют относительно небольшой объем топлива, занимают мало места, а при правильном использовании являются безопасными.

Но все же, последствия функционирования ядерного реактора существуют, и на них нельзя закрывать глаза. В результате его работы образуется ОЯТ. Некоторые страны опасаются его транспортировки, хранения и утилизации. В связи с этим в Италии, Испании, Бельгии, Швейцарии осуществляется политика отказа от ядерной энергетики. Однако там, где работа этой отрасли налажена, решается вопрос, как поступить с ядерными отходами. Существует два подхода к ОЯТ:

1. США, Канада, Финляндия, Швеция относят извлеченное из реактора ядерное топливо к радиоактивным отходам и оставляют его в специальных хранилищах.

2. Россия, Франция, Япония, Индия, Англия рассматривают ОЯТ как потенциальное энергетическое сырье и разрабатывают технологии переработки и повторного использования.

В разомкнутом цикле извлеченное из реактора топливо поступает на хранение или захоронение. Захоронение – заключительный этап обращения с радиоактивными отходами. Он нужен для того, чтобы обеспечить безопасность для человека и окружающей среды; отходы размещаются там, где они гарантированно будут изолированы. Существуют различные варианты захоронения, которые зависят от объемов, характеристик отходов, особенностей законодательства страны и геологической структуры территории.

Две страны, решившие реализовывать программы окончательного геологического захоронения, – Финляндия и Швеция – вообще не рассматривают возможность извлечения из ОЯТ, рассматривая их как радиоактивные отходы, постепенно избавляясь от них. Например, в Швеции ОЯТ сначала находится в промежуточном хранилище на глубине 30 м под водой около 40 лет. Затем ОЯТ должно быть поднято и перемещено на инкапсуляцию, а после этого – в геологическое хранилище для окончательного захоронения. Уже там ОЯТ будет находиться 100 тысяч лет.

В Финляндии ОЯТ из реактора перемещают в резервуары, где тепловыделяющие сборки (ТВС) охлаждаются от 1 года до 5 лет, а после этого они доставляются во временное хранилище. Тепловыделяющие сборки в процессе транспортировки всегда полностью погружены в воду, которая служит для охлаждения ОЯТ и защиты окружающей среды от радиации. В итоге радиоактивные отходы будут помещены в расположенное в коренной породе долговременное хранилище, где имеются отдельные бункеры для отходов среднего и низкого уровня активности.

Изначально в ядерном топливе содержится 2 изотопа урана:  $^{238}\text{U}$  – 97 %,  $^{235}\text{U}$  – 3 % (рис. 1) [2]. После его облучения в реакторе образуются высокоактивные отходы, которые составляют около 3 %. При распаде количество урана-235 в составе топлива снижается до 1 %. То есть ОЯТ представляет собой источник ценных изото-

пов урана и плутония. Так как запасы природного урана не бесконечны, возникла идея использовать ОЯТ повторно, но для этого необходимо применить особые технологии и перейти к замкнутому ядерному топливному циклу.

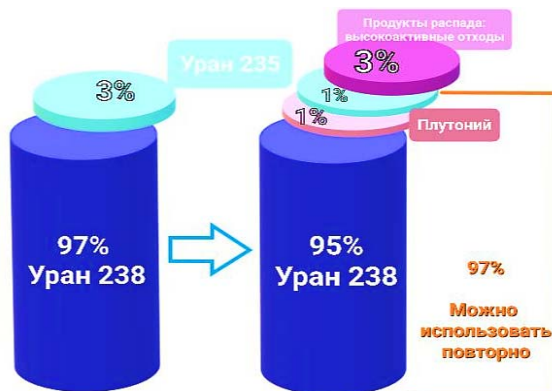


Рис. 1. Состав ядерного топлива до (слева) и после (справа) использования

Повторное использования ОЯТ расширяет топливную базу атомной энергетики и существенно снижает объем радиоактивных отходов. Самые передовые исследования в данной области осуществляются корпорацией «Росатом» в России, чтобы в перспективе полностью замкнуть топливный цикл. Предполагается, что добытое из урановой руды и отработавшее в реакторе топливо будет многократно перерабатываться и снова использоваться на АЭС.

На данный момент российские специалисты предлагают частичную переработку ОЯТ-реакторов на тепловых нейтронах. Созданы следующие технологии: MOX-топливо (от англ. Mixed-Oxide fuel) и REMIX-топливо (от англ. Regenerated Mixture). MOX-топливо получают смешиванием выделенного из ОЯТ плутония с природным ураном. Это позволяет экономить уран – его используется на 12 % меньше. Изготовление REMIX-топлива несколько отличается: оно производится из уран-плутониевой смеси ОЯТ, куда добавляют обогащенный уран. Данная технология позволит уменьшить потребление природного урана на 20–25 %. Обе технологии позволяют извлечь из ядерного топлива почти на 30 % больше энергии, чем в однократном топливном цикле. Очевидно, что сократится и объем отходов, будет быстрее спадать их активность.

Выше упоминалось, что ОЯТ должно некоторое время храниться в бассейнах выдержки. Это необходимо, так как после остановки реактора даже вне цепной реакции продолжается тепловыделение за счет распада накопленных продуктов деления. Такая особенность ОЯТ создает технически сложные проблемы. Чтобы с ними справиться, нужно произвести расчет остаточного тепловыделения по следующей формуле:

$$\frac{W(t)}{W_0} = 0,002(t^{-0,2} - (t + t_0)^{-0,2}),$$

где  $W(t)$  – тепловая мощность кассет после прекращения реакции деления в активной зоне реактора, кВт;  $W_0$  – тепловая мощность кассет в активной зоне реактора, кВт;  $t$  – время выдержки кассет после прекращения реакции деления в активной зоне реактора, лет;  $t_0$  – время работы кассет в активной зоне реактора, лет.

Рассмотрим пример на реакторе ВВЭР-1000. Его тепловая мощность составляет 3000 МВт, при этом в активной зоне находится 163 тепловыделяющих кассеты. Срок, на протяжении которого происходит постоянная выработка тепла, составляет 3 года для каждой кассеты. Каждый год заменяется 54–55 кассет с тепловой мощностью 1000 МВт (треть активной зоны реактора). В таблице приведена тенденция уменьшения выделения тепла выгруженных кассет после их работы в реакторе с течением времени.

**Зависимость тепловой мощности отработавшего ядерного топлива  
от времени выдержки кассет**

$t_0$ , лет	0,5	1	2	5	8	15	25	50	100
$W$ , кВт	740,7	484,3	291,5	130,1	81,4	41,7	23,5	10,6	4,7

В результате исследования мы пришли к выводу, что результаты работы АЭС, хотя и представляют экологическую опасность, при правильном использовании могут принести пользу. Особенно в условиях исчерпания топливно-энергетических ресурсов переработка ОЯТ как никогда актуальна.

Литература

1. Готовский, М. А. Ядерная энергетика : учеб. пособие / М. А. Готовский. – СПб. : СПбГТУРП, 2007. – 55 с.
2. Japan as a Plutonium Superpower // The Asia-Pacific Journal: Japan Focus. – 2007. – Режим доступа: <https://apjif.org/-Gavan-McCormack/2602/article.html>. – Дата доступа: 28.03.2022.

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ: ПРОБЛЕМЫ,  
РЕШЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ БЕЗОПАСНОСТИ**

**Д. Е. Коновалов А. В. Ковзик**

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

Научный руководитель Г. И. Селиверстов

Система контроля и управления доступом (СКУД) сама по себе не закрывает все проблемы безопасности предприятий и организаций, вопреки мнению большинства, СКУД дает возможность для решения некоторых проблем. При закупке готового комплекта систем безопасности и пропуска, нужно быть готовыми к неизбежным проблемам и сложностям. Смело можно сказать, что основная проблема – подключение и работа с интерфейсом. Однако есть множество других вопросов, на которые стоит обратить внимание и решать их соответственно. Итак, выделим некоторые проблемы, связанные со СКУД.

**Безотказная работа и доступность.** Большинство предприятий и организаций работают в режиме нон-стоп, соответственно, оборудование для обеспечения контроля доступа и безопасности должно удовлетворять требования предприятия. Система контроля и управления доступом охватывает огромное количество людей. И в традиционных системах безопасности необходимо практически на постоянной основе поддерживать связь между системой и пользователем, для максимального исключения простоев в рабочем процессе, прибегая к методам рассылки сетевых уведомлений или СМС с целью информирования сотрудников.

**Скорость работы системы.** Обычные системы безопасности функционируют посредством чипов и карт, что отнимает много рабочего времени. Также имеет место быть человеческий фактор (забывчивость чипа/карты или потеря). Это осложняет процесс прохода сотрудников к рабочим местам (переоформление пропуска, записи в журналах и другое).

**Несанкционированный доступ, взлом.** Система контроля и управления доступом уязвима к несанкционированному доступу. Самой частой проблемой являются принудительные поправки в таблицах и отчетах. К сожалению, такое практикуется уже долгие годы на предприятиях и в организациях.

**Уязвимость СКУД.** Некоторые сотрудники могут самовольно вносить изменения в систему доступа и тем самым нарушать правила внутреннего распорядка. Например, приходиться/уходить в неположенное время, а также находиться там, куда доступ воспрещен. Система контроля и управления доступом – это целая система разграничения и иерархии доступа для разных подразделений, отделов и групп сотрудников. К классическим системам безопасности (КСБ) относят двери либо турникеты с электронными замками, RFID – чипы (брелки и браслеты), считыватели, контроллеры, персональные компьютеры или современные платы на базе Arduino и системы управления с базами данных. К недостаткам КСБ относят следующие: утрата карты, скорость считывания, клонирование данных с карты с возможностью передачи третьим лицам, внесение изменений в отчеты и файлы системы.

Альтернативой вышеупомянутым системам было использование биометрических считывателей, которые дороже в цене, но минусов в них не меньше. Можно отметить и еще один вариант – приложения для смартфонов. Преимущество мобильного доступа в том, что смартфоны практически не теряют и всегда носят с собой.

**Сбор данных.** При выборе СКУД предприятия чаще всего обращают внимание лишь на базовые функции. Крайне удобно и просто агрегировать данные с проходной – сколько людей пришло на предприятие, кто сейчас присутствует и где. Если выйти за рамки традиционных систем ограничения доступа, сценарии использования СКУД могут удивить своим разнообразием функций и отчетов. Например, система безопасности может использоваться для оплаты обедов в столовых и кафе предприятия. Еще одна необходимая функция, о которой, конечно же, вспоминают в последнюю очередь, – это разграничение доступа. Это усложняется, когда у вас несколько корпусов, особенно разбросанных в разных точках города или даже области. Целесообразно управлять правами удаленно, а не через администраторов и операторов.

**СКУД на базе облачного сервиса как решение.** В результате выше изложенного стало известно, что большинство предприятий используют облачные хранилища для видеонаблюдения. Расширив эти возможности и применив их к СКУД, получим систему, которую уже используют в современном мире: вместо пропуска идентификация по лицу – не нужны карты, чипы и отпечатки на входе; учет рабочего времени – со сбором данных о входе, выходе и нахождении сотрудников в определенных местах; возможность получать сообщения при появлении всех или конкретных сотрудников предприятия; выгружать все необходимые отчетные документы, связанные со СКУД.

Таким образом, решением проблем с локальными системами стало применение облачных СКУД, которые в свою очередь позволяют выполнять полностью все те же функции, что и обычные системы, однако имеют более широкий функционал и повышенную систему безопасности. Бесконтактный доступ при помощи интеллектуальных систем распознавания лиц, также практически отсутствуют уязвимости, которые имеют локальные базы данных. Современные облачные СКУД могут выдавать интуитивно понятные отчеты о рабочем времени и понятный список прохода и нахождения сотрудников на работе.



Просуммируем основные возможности облачной системы безопасности с распознаванием лиц: большая вместимость в базу (около 100 000 человек); быстрый анализ проходящих (до 10 лиц на кадр); время хранения данных в базе; скорость распознавания; неограниченное количество камер для подключения к системе. При всем этом такую систему сложно обмануть.

#### Литература

1. Ворона, В. А. Системы контроля и управления доступом / В. А. Ворона, В. А. Тихонов. – М. : Горячая линия Телеком, 2010. – 272 с.
2. Тарасов, Ю. Контрольно-пропускной режим на предприятии. Защита информации / Ю. Тарасов // Конфидент. – 2002. – № 1.
3. Ярочкин, В. И. Информационная безопасность : учеб. для вузов / В. И. Ярочкин. – 3-е изд. – М. : Академический проект : Трикста, 2005.

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА С ИНДУКТИВНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ СВЯЗЬЮ

**В. В. Павлов, Д. М. Горносталь**

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

Научный руководитель Л. Г. Бычкова

В радиотехнике широко применяется способ выделения полезных сигналов с помощью частотно-избирательных линейных цепей. Такие цепи пропускают лишь колебания с частотами, которые лежат в относительно узкой полосе вокруг некоторой центральной частоты. Простейшей узкополосной частотно-избирательной системой является колебательный контур (рис. 1, а).

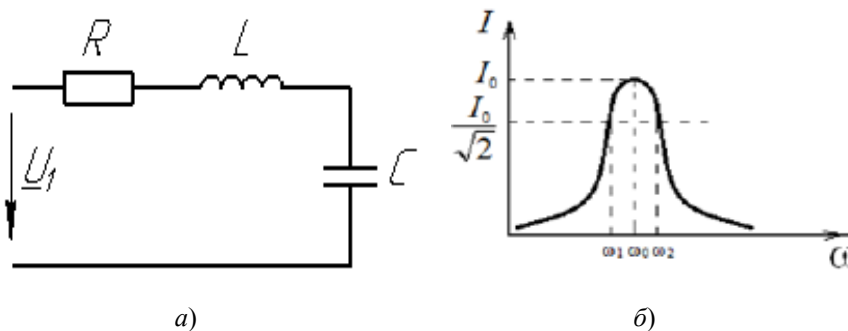


Рис. 1

Свойство контура выделять и усиливать сигналы определенных частот, близких к резонансной, называется избирательностью. Принято условно говорить, что цепь пропускает частоты, при которых  $I > \frac{1}{\sqrt{2}} I_0$ . В этом случае можно говорить о границе полосы пропускания  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  (рис. 1, б). Для выделения полосы частот, соответствующих диапазону частот звуковых колебаний, используют многоконтурные устройства, в которых удается получить форму амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), близкую к идеальной (прямоугольной). Простейшим многоконтурным частотно-избирательным фильтром является система двух связанных колебательных

контуров. Контуров называются связанными, если имеет место переход энергии из одного контура в другой. Связь между контурами может осуществляться через электрическое поле (благодаря емкости) или через магнитное поле (благодаря индуктивной связи). Наиболее часто в радиотехнике применяется трансформаторная связь.

Цели исследования – теоретическое и практическое исследование особенностей частотных характеристик колебательного контура с индуктивной переменной связью; разработка программы, схемы, подбор данных для учебно-исследовательской работы.

**Теоретический расчет частотных характеристик.** Найдем значения для частотных характеристик  $I_1(\omega)$  и  $U_{C2}(\omega)$  и резонансные частоты с учетом сопротивления вторичного контура (рис. 2).

$$\underline{I}_2 = \frac{jK_\phi R \underline{U}_1}{\left( R + j\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right)^2 + K_\phi^2 R^2}.$$

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 \pm \sqrt{k^2 - d^2}}}.$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{R + \frac{\omega^2 M^2 R}{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} - \frac{\omega^2 M^2 \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \right)}.$$

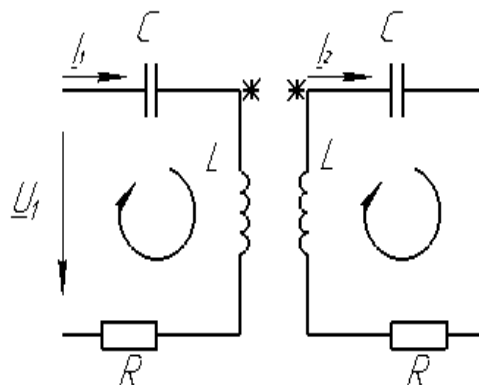


Рис. 2

На рис. 3, а представлена частотная зависимость входного тока с учетом и без учета сопротивления вторичной обмотки. На рис. 3, б частотная зависимость  $U_{C2}(\omega)$ , рассчитанная при различных значениях факторах связи. Расчет выполнен с помощью среды MathCad.

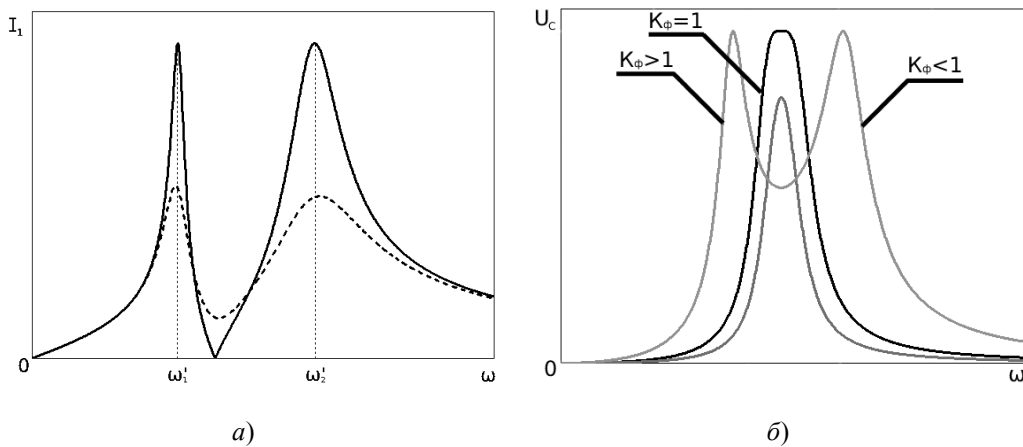


Рис. 3

- На основе вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:
- в теоретических расчетах необходимо учитывать сопротивление вторичной обмотки;
  - при значении фактора связи меньше единицы в контуре имеет место только один резонанс напряжений на частоте, равной  $\omega_0$ ;
  - значение фактора связи, равное единице, позволяет получить форму частотной характеристики, близкую к прямоугольной;
  - при значении фактора связи больше единицы, имеет два явно выраженных максимума («двугорбая зависимость»).

Задание на эксперимент: 1) собрать схему в соответствии с рис. 3. Исходные данные:  $L_D = 44,8$  мГн,  $L_F = 44,8$  мГн,  $C_D = 103,6$  нФ,  $C_F = 100$  нФ; 2) снять частотную характеристику тока для двух значений фактора связи:  $k = 0,695$ ,  $K_\phi > 1$ :  $R = 100$  Ом;  $K_\phi < 1$ :  $R = 1$  кОм (рис. 4); 3) по полученным данным построим графики зависимости  $U_{c2}(f)$ , для случаев  $K_\phi > 1$  и  $K_\phi < 1$  (рис. 5).

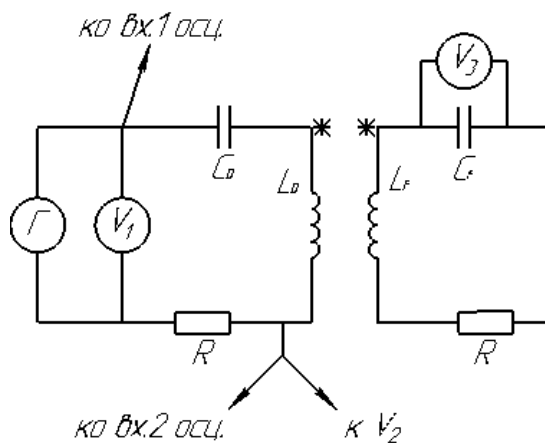


Рис. 4

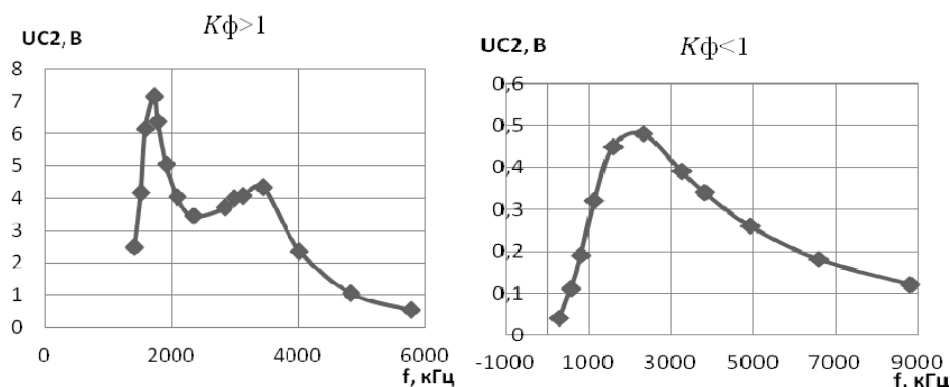


Рис. 5

Таким образом, при рассмотрении теории связанных колебательных контуров принято не учитывать активное сопротивление вторичной обмотки. Теоретические расчеты, выполненные нами, показали, что активное сопротивление вторичного контура необходимо учитывать, иначе это приводит к искажению результатов.

В данной статье продемонстрировано влияние фактора связи на форму частотных характеристик, предложены схема и программа эксперимента, выполнен подбор данных.

#### Литература

1. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов: в 3 т. / К. С. Демирчян [и др.]. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – Т. 1. – 463 с.
2. Добротворский, И. Н. Теория электрических цепей : учеб. для техникумов / И. Н. Добротворский. – М. : Радио и связь, 1989. – 472 с.
3. Косых, Т. Б. Связанные колебательные контуры. Методическая разработка к одноименной задаче «Практикума колебаний» кафедры физики колебаний / Т. Б. Косых, Ю. И. Кузнецов. – М. : изд-во физ. фак. МГУ, 2013. –16 с.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АУДИТ. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

М. Н. Сычевский

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

Научный руководитель Г. А. Рудченко

Энергетический аудит как инструмент повышения энергоэффективности широко применяется в отечественной и зарубежной практике.

Энергетический аудит – это техническое инспектирование энергогенерирования и энергопотребления предприятия с целью определения возможности экономии энергии и предоставления предприятию помощи в осуществлении мероприятий, обеспечивающих экономию энергоресурсов на практике.

Задачи энергоаудита состоят в обнаружении источников нерациональных энергозатрат и неоправданных потерь энергии, в разработке на основе технико-экономического анализа рекомендаций по их ликвидации, предложении программы экономии энергоресурсов и рационального энергоиспользования, а также в определении очередности реализации предложенных мероприятий с учетом объемов затрат и сроков окупаемости.

В Республике Беларусь обязательному энергетическому обследованию подлежат предприятия, учреждения, организации, если годовое потребление ими топливно-энергетических ресурсов составляет более 1,5 тыс. т у. т. В Российской Федерации есть организации, осуществляющие производство и транспортировку воды, природного газа, тепловой энергии, электрической энергии, добычу природного газа, нефти, угля, производство нефтепродуктов, переработку природного газа, нефти, транспортировку природного газа, нефти, нефтепродуктов; организации, совокупные годовые затраты которых на потребление энергоресурсов (исключая ГСМ) превышают 50 млн р.;

Периодичность обследований в Республике Беларусь и Российской Федерации – один раз в 5 лет. В странах ЕС – один раз в 2–3 года.

В настоящее время энергоаудиты как внутренние, так и внешние являются одним из признанных и надежных инструментов энергоменеджмента, инструментом проверки результатов управленческой деятельности в области энергосбережения и энергоэффективности. На всех континентах мира сегодня разрабатываются и принимаются национальные и профессиональные стандарты, регламентирующие не только проведение самих энергоаудитов, но и предаудиторскую, и постаудиторскую деятельность. Причем инициативу в этом вопросе проявляют как организации, представляющие бизнес, включая национальные организации по стандартизации и профессиональные объединения, так и правительственные структуры, регулирующие органы.

Основные нормативные правовые документы, регулирующие энергетическое обследование организаций в Республике Беларусь:

1. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29.07.2006 № 964 «Об энергетическом обследовании организаций».

2. СТБ 1776–2007 Энергетическое обследование потребителей топливно-энергетических ресурсов.

3. СТБ 1691–2006 Энергетическое обследование потребителей топливно-энергетических ресурсов. Требования к организациям.

4. ТКП 5.1.13–2006 Национальная система подтверждения соответствия. Порядок сертификации экспертов-энергоаудиторов.

Что касается других стран, в Ирландии – это новейшее «Руководство для внутренних аудиторов» (I.S.EN 16001:2009 “Internal Auditor’s Guide”), разъясняющее европейский стандарт на системы энергоменеджмента и изданное авторитетной ирландской неправительственной организацией Sustainable Energy Ireland (SEI). Во Франции вместо англоязычного термина “energy audit” применяется термин “diagnostic energetique” («энергодиагностика»), который включен в документ по стандартизации ВР X30-120 и акты национального законодательства: Декрет № 2006–1147 от 14 сентября 2006 г. и Строительный кодекс (Code of Construction and Housing, статьи R.134-1, R.134-5). Аналогичная ситуация и в Италии, где в новейшем стандарте UNI CEI 11339:2009 и Законодательном Декрете № 115/08 от 30 марта 2008 г., который, как и во Франции, представляет собой имплементацию европейской Директивы № 2006/32/ЕС, используется схожий термин “diagnosi energetica”. В Германии энергоаудит осуществляется в рамках схожей процедуры, называемой по-немецки “Energieberatung” и стандартизованной Союзом немецких инженеров (Verein Deutscher Ingenieure, VDI) в профессиональном стандарте VDI 3922:1998 “Energieberatung für Industrie und Gewerbe” («Энергоконсалтинг для промышленности и бизнеса»).

Результаты и последствия энергоаудита:

1. Определение реального потенциала энергосбережения и оценка эффективности использования обследуемой организацией топливно-энергетических ресурсов на основе анализа материальных и энергетических потоков.

2. Определение возможных путей экономии энергоресурсов.

3. Разработка мероприятий по энергосбережению на пятилетие с технико-экономическим обоснованием их эффективности, указанием сроков окупаемости, планируемых источников и объемов финансирования, сроков выполнения этих мероприятий.

4. Выработка предложений по переходу на прогрессивные нормы расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Стоит отметить, что к особенностям европейской системы стандартизации энергоменеджмента следует отнести то, что действие стандартов нацелено на реализацию конкретных количественных показателей энергоэффективности. Европейские стандарты основаны на методологии, известной как “Plan-DoCheck-Act” (PDCA, что в переводе на русский язык означает «Планируй-Выполни-Проверь-Изменяй»).

Одним из отличий энергоаудита в Европе также является его ориентация на покупателей рынка недвижимости. Данные, полученные в ходе контрольных замеров аудита и отраженные в энергопаспорте жилого дома, позволяют потенциальному покупателю сделать правильный выбор. В Германии (после объединения) была попытка энергопаспортизации объектов недвижимости, но работа была свернута. Оказалось, что сводить документы некому. Ограничились использованием данных паспортизации при определении категорийности жилого фонда, уровня обеспеченности инженерией, ветхости и т. д.

Энергетические обследования в республике имеют ряд особенностей:

1. Энергетическое обследование предприятий, учреждений, организаций, расположенных на территории Республики Беларусь, проводится в целях оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и обеспечения их экономии.

2. Энергетическое обследование потребителей топливно-энергетических ресурсов в Республике Беларусь является обязательным, независимо от формы собственности юридического лица.

3. Проведение обязательных энергетических обследований организаций Республики Беларусь определено Законом Республики Беларусь от 15.07.1998 № 190-3 «Об энергосбережении».

При схожести задач энергоаудита, отличительная особенность энергоаудита в Беларуси следующая.

При представлении программы энергосбережения на пятилетие в обязанности энергоаудитора входит указать источники и объемы финансирования. При этом экономический эффект в Беларуси считается не в деньгах, а в реально сэкономленном топливе. Инвестиционные энергоаудиты в республике не проводятся, поскольку к заключению энергоаудитора прикладывается технико-экономическое обоснование со сроками окупаемости, и это считается достаточным.

Принципиально важным является то, что энергоаудитор обязан дать предложения по прогрессивным нормам расхода ТЭР, а также по переходу на новые источники энергии с перспективой на ближайшие пять лет.

Основные направления по энергосбережению рекомендуемые по результатам энергоаудитов в Беларуси:

1. Внедрение новых энергоэффективных технологических процессов производства продукции во всех отраслях экономики.
2. Внедрение когенерационных установок для совместной выработки тепловой и электрической энергии.
3. Преобразование котельных в мини-ТЭЦ, в том числе на местные виды топлива.
4. Утилизация тепловых вторичных энергоресурсов.
5. Повышение эффективности работы тепловых сетей, оптимизация схем теплоснабжения. Передача тепловых нагрузок от ведомственных котельных на ТЭЦ, децентрализация теплоснабжения с ликвидацией длинных теплотрасс.
6. Внедрение энергосберегающих осветительных приборов, систем автоматического регулирования освещения.
7. Автоматизация технологических процессов и внедрение автоматизированных систем управления потребления ТЭР.

## СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

Д. А. Светличный

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

Научный руководитель А. В. Шаповалов

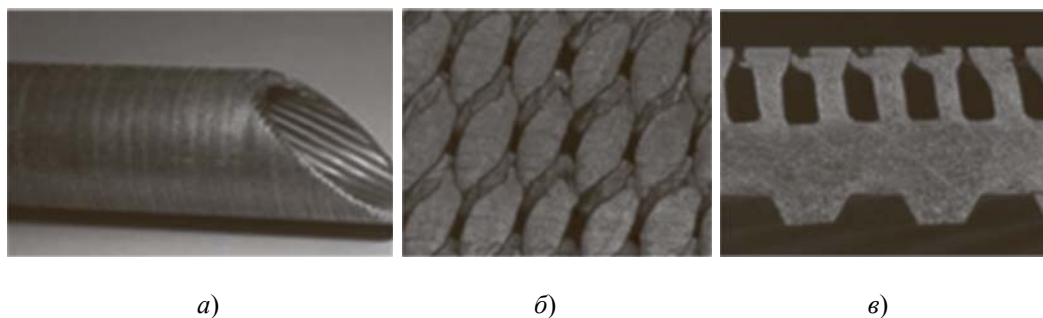
Цель работы – изучить способы интенсификации теплообмена в теплопередающих устройствах путем модернизации теплообменных поверхностей.

В современных условиях и в перспективе один из важных путей повышения экономичности энерготехнологических установок – совершенствование теплообменного оборудования с помощью внедрения эффективных способов интенсификации теплообмена.

Посредством интенсификации теплообмена увеличивается количество тепла, передаваемого через единицу поверхности теплообмена, и, соответственно, уменьшаются массогабаритные показатели теплообменного оборудования; достигается более выгодное соотношение между передаваемым количеством тепла и мощностью оборудования; улучшаются общие характеристики энерготехнологических установок.

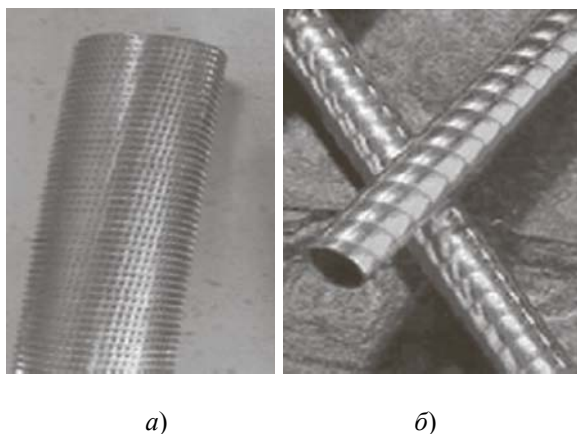
Доступными при этом являются способы создания микроструктурированных двух- и трехмерных поверхностей с применением накатки, фрезерования, резания и прочих методов механической обработки материалов

**Применение коммерческих интенсифицирующих поверхностей и авторских поверхностей, полученных механической обработкой.** В ходе работы были изучены результаты экспериментального исследования пузырькового кипения хладона R123 на интенсифицирующей поверхности – горизонтально ориентированной трубе с трехмерной микроструктурой, произведенной европейской компанией Wolverine Tube, Inc. (рис. 1, а–в). Наименование трубы и характеристики ее микроструктуры авторами не указаны. Сообщается об увеличении теплоотдачи при кипении на модифицированной трубе по сравнению с эталонной гладкой от шести до десяти раз.



*Рис. 1.* Снимки экспериментальной трубы:  
*а* – сегмент трубы, демонстрирующий ее наружную и внутреннюю поверхности;  
*б* – увеличенное изображение наружной микроструктурированной поверхности;  
*в* – увеличенное изображение поперечного разреза стенки трубы

Проводились также экспериментальные исследования теплообмена при испарении пленок, стекающих по пакету из шести горизонтальных модифицированных труб в условиях вакуума. Были протестированы новые интенсифицирующие трубы двух типов: Turbo-SAB (с количеством штырьков 19 и 26 шт./дюйм) и Korodense при изменении пленочного числа Рейнольдса  $Re$  от 10 до 110 (рис. 2, *а*, *б*). Режим пузырькового кипения не рассматривался. Сообщается, что трубы, имеющие помимо внешней, также внутреннюю структуру (т. е. Korodense), показали наилучшие результаты по теплоотдаче при испарении. В работе также предложены корреляции для расчета коэффициента теплоотдачи и величин интенсификации для модифицированных труб, описывающие полученные опытные данные с точностью  $\pm 30\%$ .

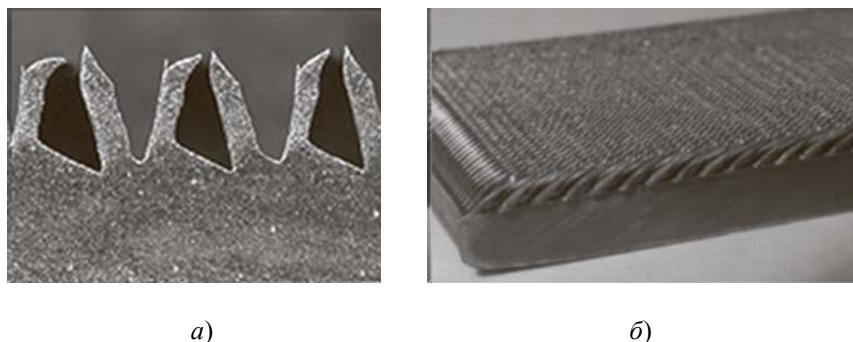


*Рис. 2.* Интенсифицирующие трубы:  
*а* – Turbo-SAB (19 шт./дюйм); *б* – Korodense

В качестве конкурентоспособного метода создания интенсифицирующих теплообменных поверхностей можно назвать метод деформирующего резания (МДР) – метод, разработанный российскими учеными для создания микроструктурированных поверхностей. Это доступный и эффективный метод прецизионной механической обработки пластичных материалов, основанный на подрезании поверхностного слоя материала заготовки и последующей его деформации с формированием макро- и микрорельефа в виде ребер, шипов, ячеек или резьбовых профилей. Он дает возможность создавать сложные поверхности для интенсификации теплообмена при



кипения (рис. 3, *a*) с увеличением площади обрабатываемой поверхности до 12 раз, а с учетом нового патента и вплоть до 48 раз, позволяя создавать сверхплотные микроштырьковые структуры с количеством штырьков до 400 шт./мм<sup>2</sup> (рис. 3, *б*).



*Рис. 3.* Сложные структуры поверхности:  
*a* – микроструктурированная поверхность кипения, полученная методом деформирующего резания; *б* – сверхплотная микроштырьковая структура, полученная методом деформирующего резания

На кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» проводятся экспериментальные исследования работы замкнутых двухфазных теплопередающих устройств. Создан экспериментальный стенд и разработана методика работы двухфазных пародинамических термосифонов с внутренними кольцевыми вставками и термосифонов классической конструкции без внутренних циркуляционных вставок, заправленных разными теплоносителями.

На основании проведенного обзора существующих методов интенсификации теплообмена теплопередающих поверхностей выделены два варианта модернизации экспериментальной установки.

Первый вариант интенсификации процесса теплообмена при парообразовании в испарителе термосифона. Теплообмен в зоне парообразования может быть увеличен за счет изменения величины кольцевого зазора при изменении диаметров внутренних трубок испарителя (материал новых внутренних трубок испарителя – медь, наружные диаметры внутренних труб определяют значение кольцевого зазора в испарителе от 3 до 6 мм, длина внутренних труб – 1 мм).

Второй вариант интенсификации процесса теплообмена при конденсации в термосифонных элементах. Наружное поперечное оребрение наружной поверхности конденсатора позволит увеличить отводимый тепловой поток без увеличения подводимого теплового потока к испарителю устройства. Данный тип оребрения выбран в связи с возможностью работы термосифона при разных углах наклона. Другие виды оребрения для данной конструкции будут нецелесообразны. В зоне конденсации для развития теплопередающей поверхности использовано наружное поперечное оребрение поверхности конденсатора. Из листа латуни толщиной 15 мм при помощи лазерной резки было вырезано 202 кольца, после чего кольца были припаяны на конденсатор. Шаг оребрения – 2 мм, высота ребер – 1,6 см.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бессонный, А. Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения : справочник / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш ; под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессоного. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.

2. Дзюбенко, Б. В. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б. В. Дзюбенко, Ю. А. Кузма-Китча, А. И. Леонтьев. – М. : ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. – 539 с.
3. Володин, О. А. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях / О. А. Володин, Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 2. – С. 280–312.
4. Chen, T. An Experimental Investigation of Nucleate Boiling Heat Transfer from an Enhanced Cylindrical Surface / T. Chen // Appl. Therm. Eng. – 2013. – Vol. 59, iss. 1–2. – P. 355.

## ИЗУЧЕНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

В. А. Панасик

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

Научный руководитель О. Г. Широков

Целью исследования является изучение пусковых характеристик светодиодных источников света.

Получение пусковых характеристик светодиодных источников света выполнялось с помощью имитатора сетевых импульсных помех (ИСИП), изготовленного по схеме, представленной в [1].

Регистрация значений напряжений и токов светодиодных источников света при изучении пусковых характеристик источников света производилась с помощью комплекса регистрации параметров электрических сигналов (КРПЭС).

Схема исследования пусковых характеристик светодиодных источников света, представленная на рис. 1, содержит ИСИП – имитатор сетевых импульсных помех; ТТ – измерительный трансформатор тока; ИПТ – измерительный преобразователь тока; ИПН – измерительный преобразователь напряжения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

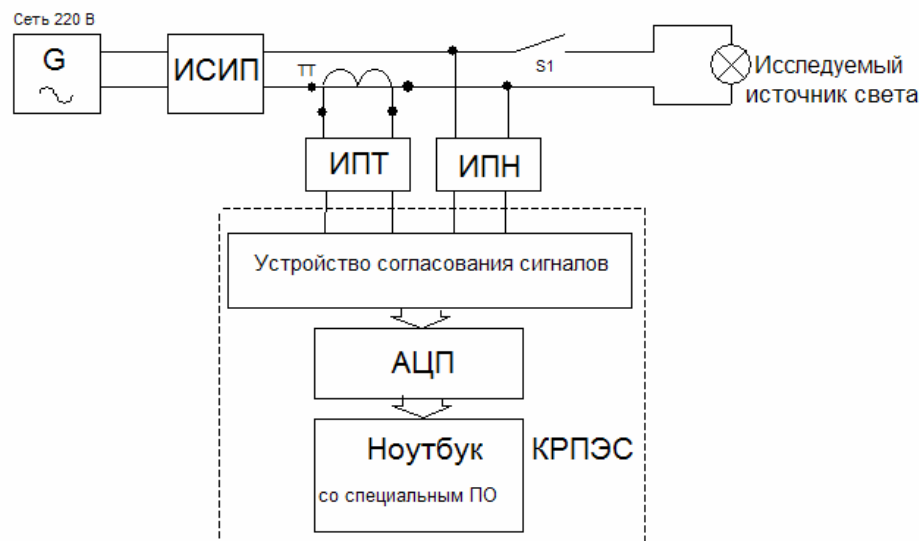


Рис. 1. Схема исследования пусковых характеристик светодиодных источников света

Объектами исследования для изучения пусковых характеристик источников являлись светодиодные лампы Feron (7W); Smartbuy (7W); Led bulb (7W); Philips (7W); АБВлайт (6W).

При подаче напряжения на источники света с помощью устройства коммутаций и нормализации сигнала осуществлялась регистрация пусковых характеристик светодиодных источников света и данная информация выводилась в виде осциллограммы на экране ПК.

Осциллограммы напряжения и тока пусковых характеристик источников света представлены на рис. 2, а, б.

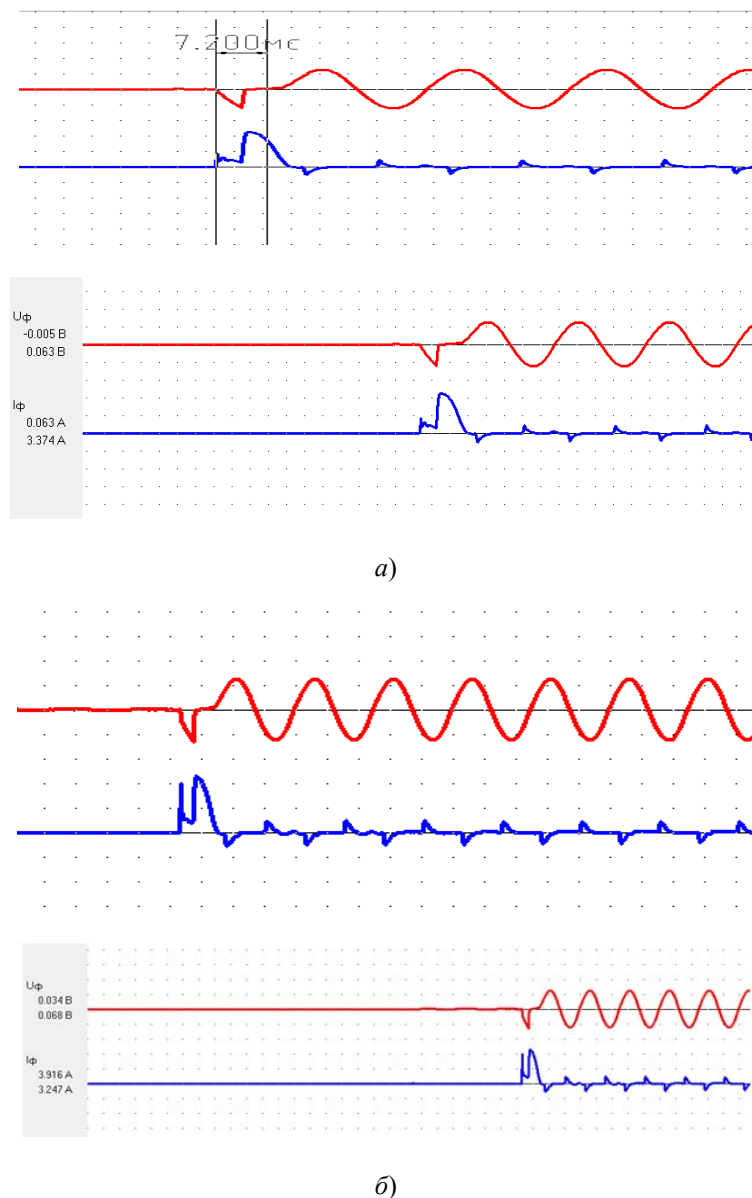


Рис. 2. Пусковые характеристики светодиодных источников света: а – светодиодная лампа Feron (7W); б – светодиодная лампа Philips (7W)

Определено, что у светодиодных источников присутствует пусковой ток. Пусковой ток осветительного прибора со светодиодными источниками света – это токовый импульс или импульсы фиксированной длительности с амплитудными значениями, многократно превышающими величину рабочего тока, возникающие при включении ограничителей перенапряжений в сеть электропитания.

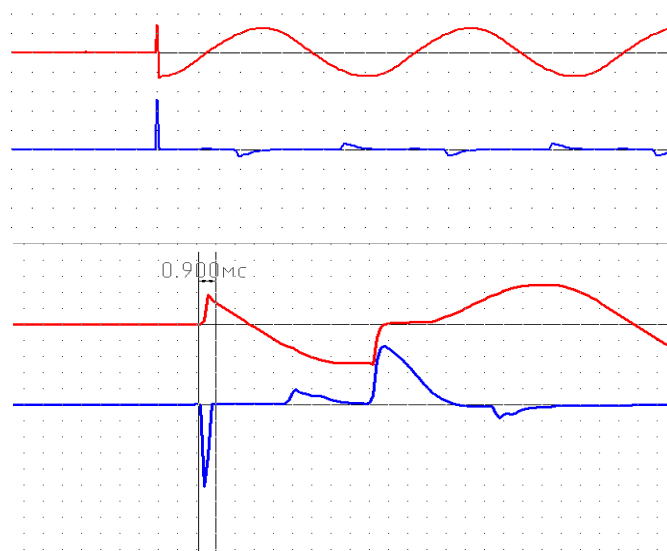


Рис. 3. Пусковые характеристики светодиодных источников света

На практике даже маломощные светодиодные лампы могут создавать значительные пусковые токи кратностью до 300 раз [2]. На величину пускового тока влияет момент включения осветительного прибора, соответствующий фазе изменения напряжения сети питания. Пусковой ток будет максимален в случае включения на максимуме напряжения и минимален – при включении в зоне перехода через нулевое значение (рис. 3).

#### Литература

1. Озолин, М. Имитатор сетевых импульсных помех / М. Озолин // Радио. – 2006. – № 4. – С. 22.
2. Электрические характеристики ОП со светодиодными источниками света. – Режим доступа: <https://led-e.ru/led-supply/elektricheskie-harakteristiki/>.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАПИТАЛЬНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

А. В. Байдилов

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

Научный руководитель Т. Н. Никулина

Задача экономически эффективного нагрева воды, которая используется в качестве теплоносителя в системах водяного отопления и горячего водоснабжения, была и остается актуальной независимо от способа осуществления этих процессов, конструкции системы отопления и источников получения тепла.

Огромное разнообразие современных новинок в этой сфере – котлов, радиаторов, насосов, генераторов – любого из нас заставят задуматься над тем, посредством каких критериев выбрать оптимальный для себя вариант и чему именно отдать предпочтение.

Сейчас доступны различные источники тепловой энергии: нефть, уголь, газ, дерево и электричество. У всех имеются свои преимущества, но, взвесив все критерии, такие как низкая стоимость капитальных вложений, хорошая управляемость, практически абсолютная чистота, большой комфорт и довольно скромные эксплуатационные расходы, легко прийти к выводу, что отопление с использованием теплового насоса – это выбор сегодняшнего и завтрашнего дня.

Для сравнительного анализа принято помещение с параметрами:

- город Минск;
- площадь помещения – 200–250 м<sup>2</sup>;
- тепловые потери – 12 кВт;
- месячный расход горячей воды – 16–20 м<sup>3</sup>, т. е. за год каждый тепловой насос должен будет вырабатывать 28100 кВт · ч тепловой энергии на нагрев горячего водоснабжения (ГВС);
- минимальная температура холодного периода года –26 °С;
- продолжительность отопительного периода – 7188 ч.

Для проведения сравнительного анализа эксплуатационных затрат приняты системы отопления на основе воздушного теплового насоса ZUBADAN, грунтового теплового насоса «Дроид» и системы отопления на основе электрического котла. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

### Эксплуатационные затраты

Показатель	Система отопления на основе теплового насоса ZUBADAN	Система отопления на основе теплового насоса «Дроид»	Система отопления на основе электрического котла
Годовые затраты электроэнергии, кВт · ч	12676	8172	28141

*Примечание.* Собственная разработка.

Исходя из приведенных расчетов, видно, что годовые затраты электроэнергии системы отопления на основе тепловых насосов в несколько раз ниже затрат системы отопления на основе электрического котла.

Капитальные затраты также являются немаловажным аспектом при выборе теплового насоса. Необходимо учитывать стоимость не только основного и дополнительного оборудования, но и стоимость монтажа теплового насоса и котельной. Капитальные затраты приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Капитальные затраты, условные единицы

Оборудование и ремонтные услуги	Тепловой насос ZUBADAN	Тепловой насос «Дроид»
Воздушный тепловой насос	12600	–
Грунтовой тепловой насос	–	18522

Окончание табл. 2

	Тепловой насос ZUBADAN	Тепловой насос «Дроид»
Бойлер косвенного нагрева	2520	–
Фундамент, ветроснегозащита, конденсатоотвод	2520	–
Грунтовый контур	–	8820
Монтаж теплового насоса	1260	–
Монтаж котельной	2520	3150
<i>Итого</i>	21420	30492

*Примечание.* Собственная разработка.

Целью экономических расчетов является экономическое обоснование целесообразности и эффективности выбранного оборудования с учетом действующих тарифов на электрическую энергию. Действующие тарифы сведены в табл. 3.

Таблица 3

## Тарифы на электроэнергию

Тариф	Рублей за 1 кВт · ч
Одноставочный тариф на электрическую энергию, обеспечивающий полное возмещение экономически обоснованных затрат	0,2552
Одноставочный тариф на электрическую энергию в жилых домах (квартирах)	0,1973

*Примечание.* Собственная разработка.

Исходя из приведенных тарифов, был произведен сравнительный расчет экономической эффективности геотермального и воздушного насоса. Таким образом, приведенные годовые затраты грунтового теплового насоса для первого тарифа составили 7023,28 рублей, для воздушного – 7303,73 рублей. Для второго тарифа приведенные годовые затраты грунтового теплового насоса составили 7496,77 рублей, для воздушного – 8045,88 рублей. Приведенные затраты сведены на рис. 1.

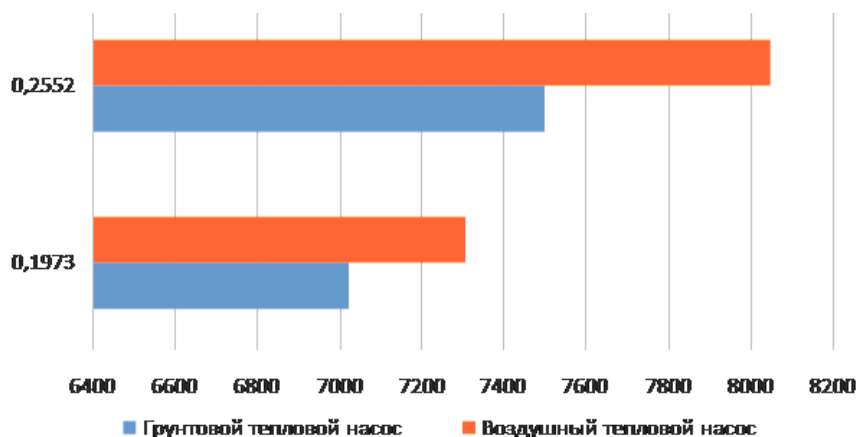


Рис. 1. Приведенные затраты

Исходя из приведенных данных, можем сделать вывод об эффективности использования систем отопления на основе грунтовых тепловых насосов, по сравнению с системами отопления на основе воздушных тепловых насосов и электрических котлов.

#### Литература

1. Воздушные тепловые насосы. – 2022. – Режим доступа: [https://aqua-therm.ru/articles/articles\\_218.html](https://aqua-therm.ru/articles/articles_218.html). – Дата доступа: 01.02.2022.
2. РУП «Минскэнерго» Филиал «Энергосбыт». – 2022. – Режим доступа: <https://www.energo-sbyt.by/ru/info-potrebitelyam/fiz-l/tarify>. – Дата доступа: 01.02.2022.
3. Тепловые насосы. – 2022. – Режим доступа: <https://mastehkom.by/therm.ru/info/vozdushnyj-ili-geotermalnyj-teplovoj-nasos-dlya-minska-chast-1-stoimost-ili-effektivnost>. – Дата доступа: 01.02.2022.

### **ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ОДНОФАЗНОГО КОНДЕНСАТОРНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

**М. А. Вегера, И. Д. Костюченко, К. Е. Коршунов**

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

Научные руководители: А. В. Козлов, М. П. Тиличенко

Автономные инверторы (АИ) находят все более широкое применение в таких областях как питание потребителей переменного тока в устройствах, где единственным источником энергии является аккумуляторная батарея (например, бортовые вторичные источники питания), а также резервное питание ответственных потребителей при возможном отключении сети переменного тока (электросвязь, вычислительная техника); электропривод с асинхронными и синхронными двигателями, где инвертор служит источником регулируемых напряжения и частоты; резервные и аварийные системы электроснабжения для домов, офисов, производственных помещений и медицинских учреждений при отклонении электроэнергии; возможность аварийного запуска автомобилей, тяжелых грузовиков, прогулочных катеров; системы автономного электроснабжения на основе альтернативного источника электроэнергии такого рода как солнечные панели, ветровой генератор, гидрогенератор, а также во многих других областях

Достоинства АИ в том, что эта установка проста и надежна – она имеет малую потребляемую мощность – не более 16 Вт (1Вт в режиме ожидания), бесшумна, имеет КПД до 96 %, малогабаритна. Работает практически с любым электрооборудованием, включая электромоторы, холодильники, телевизоры, компьютеры, лазерные принтеры, кассовые аппараты и другое.

Разработанный и спроектированный АИ работает в соответствии с блок-схемой (рис. 1), был собран на отечественных комплектующих, что значительно дешевле в сравнении с известными аналогами на импортных компонентах.

Автономный инвертор позволяет регулировать частоту вращения ротора однофазного асинхронного двигателя (АД) в зависимости от частоты управляющих импульсов и при этом наблюдать на двухканальном осциллографе форму импульсов управления, форму импульсов на силовых ключах и на выходе инвертора, а также регулировать частоту вращения в зависимости от частоты управляющих импульсов однофазных АД и трехфазных АД (ТАД) с пусковым конденсатором.

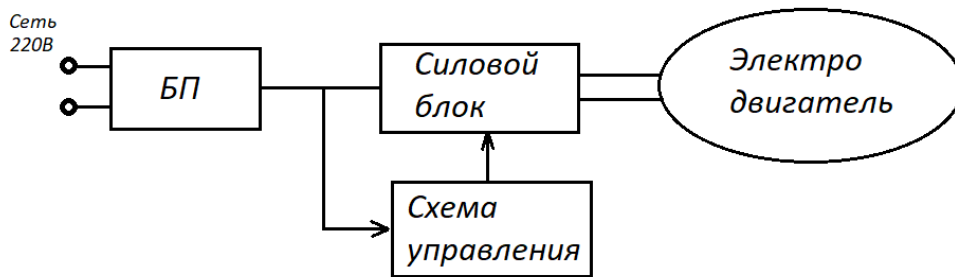


Рис. 1. Блок схема автономного инвертора для управления однофазного конденсаторного асинхронного электродвигателя

Схему автономного инвертора можно усовершенствовать исходя из целей его использования [1], [3].

Схема управления АИ представлена на рис. 2.

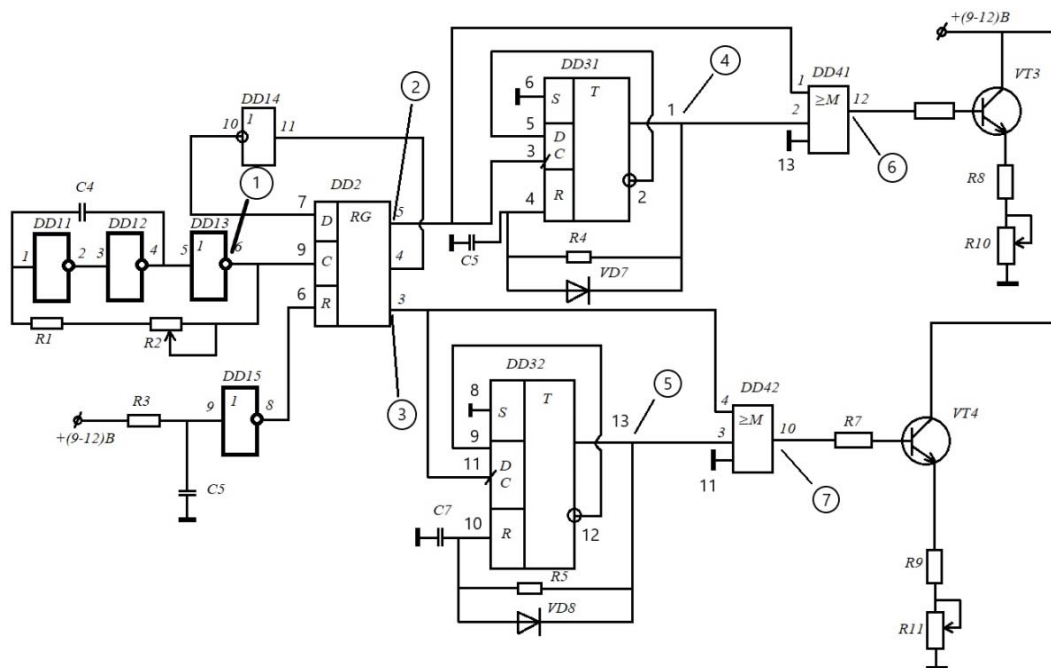


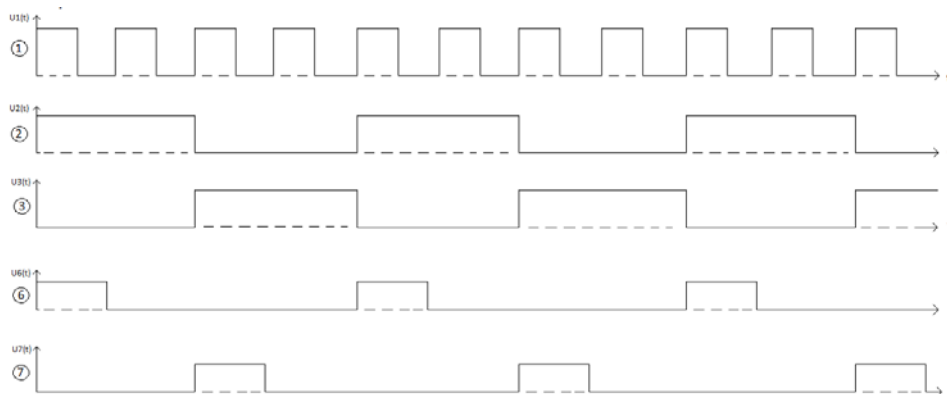
Рис. 2. Схема управления автономного инвертора для управления однофазного асинхронного двигателя

На элементах DD11 DD12 DD13 микросхемы K561LN2 реализован задающий генератор с регулируемой частотой. Элементы DD14 DD15 и микросхема DD2 работают в режиме симметричного мультивибратора со скважностью  $Q = T_n / t_{и} = 2$ . Прямоугольные импульсы с выходов 5 и 3 микросхемы сдвигового регистра DD2 типа K561IP2 поступают на стробирующие входы 3, 11 микросхемы DD3 типа K561TM2 и на входы 1 и 4 микросхемы DD4 типа K561LP13. Микросхема DD3 содержит два D-триггера, работающие в режиме одновибраторов вырабатывающих импульсы фиксированной длительности  $t_{и}$  на выходах 1 и 13.

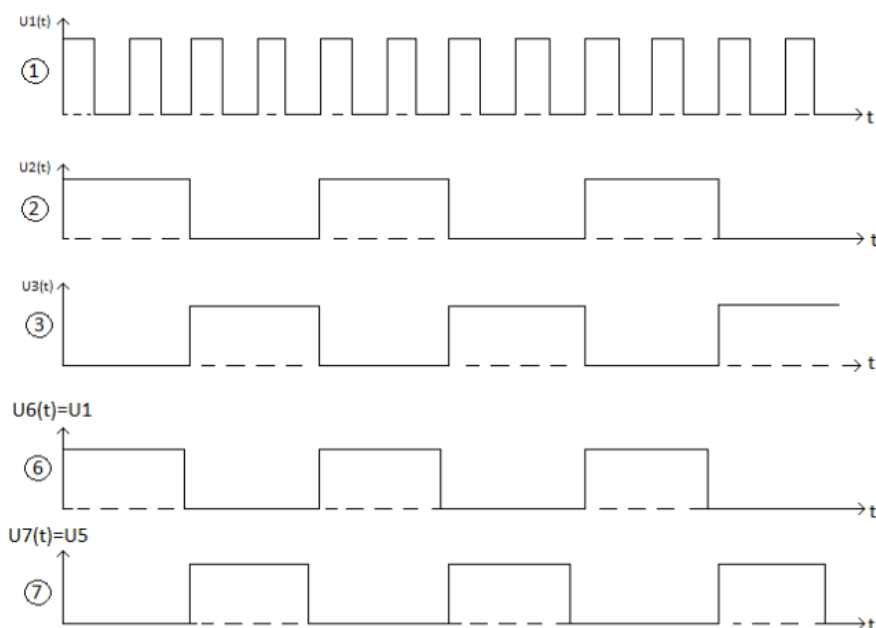


Параметры элементов  $C$  и  $R$  одновибраторов выбираются так чтобы скважность импульсов на выходах 10 и 12 микросхемы DD4 была близка к 2, тогда при уменьшении частоты задающих импульсов скважность  $Q$  будет увеличиваться за счет увеличения длительности паузы, что позволяет таким образом уменьшать действующее значение напряжения на выходе инвертора.

Временные диаграммы напряжений в контрольных точках схемы управления для двух частот  $f_n/2$  и  $f_n$  приведены на рис. 3, а, б [2].



а)



б)

Рис. 3. Временные диаграммы импульсов схемы управления:

$$a - f = f_n/2; \quad б - f = f_n$$

Экспериментальные данные были получены для однофазного конденсаторного асинхронного двигателя. Автономный инвертор позволяет одновременно регулировать частоту и действующее значение напряжения, подводимого к статору АД, что обеспечивает плавный запуск двигателя.

Разработанная нами схема АИ значительно дешевле промышленных по компонентам. Основными компонентами нашего АИ являются конденсаторы, выпрямители на основе диодов, транзисторы типа *n-p-n* и трансформаторы. По данной теме планируется продолжить работу с целью доработки устройства, позволяющего управлять частотой трехфазного асинхронного двигателя без пускового конденсатора, а также планируется доработка устройства с целью удаления трансформатора, а частотное регулирование – изменять с одновременным регулированием напряжения.

#### Литература

1. Зельдин, Е. А. Импульсные устройства на микросхемах / Е. А. Зельдин. – М. : Радио и связь, 1991. – 160 с.
2. Гольденберг, Л. М. Импульсные устройства / Л. М. Гольденберг. – М. : Радио и связь, 1981. – 224 с.
3. Усманходжаев, Н. М. Методы регулирования скорости однофазных конденсаторных асинхронных двигателей / Н. М. Усманходжаев. – М. : Энергия, 1980. – 120 с.

### ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ СМЕСЕВЫХ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ

В. П. Никитенко

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Задачи интенсификации теплообмена и обоснованное проектирование конденсаторов имеют первостепенное практическое значение. Несмотря на большое количество работ по теплообмену при конденсации озонобезопасных хладагентов, их результаты не полностью отражают процессы теплообмена на развитых поверхностях. Поэтому основные размеры и параметры теплопередающих поверхностей ряда теплообменных аппаратов, которые применяются в различных энергетических установках промышленности, не могут быть определены без достаточных сведений в этой области. Недостаточно также сведений о практических исследованиях процессов конденсации маслофреоновых смесей. Недостаточно полно исследованы специфические особенности теплообмена и гидродинамики, связанные с влиянием параметров и оребрения поверхности.

Имеющихся данных недостаточно для определения оптимальных геометрических параметров ребер и межреберного расстояния, которые в значительной степени определяются свойствами рабочей жидкости и давлением в системе.

Для обоснованного выбора рабочего тела необходимы сведения о термодинамических свойствах различных хладагентов. Хладагенты, отвечающие всем необходимым требованиям, найти практически невозможно, поэтому в каждом отдельном случае выбирают хладагент с учетом конкретных условий работы холодильной системы, предпочтение необходимо отдавать таким, которые удовлетворяют принципиальным и оптимальным требованиям. Использование имеющихся в литературе обобщенных уравнений для расчета теплоотдачи конденсирующихся хладагентов без экспериментальных подтверждений неправомерно, так как различны теплофизические свойства рабочих тел и специфические условия работы конденсаторов.

Анализ литературных данных показывает, что на теплообмен при конденсации существенное влияние оказывают свойства вещества, давление и свойства системы «пар–поверхность охлаждения».

Хладагент должен обладать определенными теплофизическими и физико-химическими свойствами, от которых зависит конструкция холодильной машины.

Альтернативными веществами могут быть чистые вещества и смеси.

**Особенности термодинамики смесей хладагентов.** Различают зеотропные (неазеотропные) и азеотропные смеси.

Азеотропная смесь – смесь двух или более жидкостей с таким составом, который не меняется при кипении, т. е. состав равновесных жидкой и паровой фаз совпадают. Точка на фазовой диаграмме, которая соответствует равенству составов жидкости и пара, называется азеотропной точкой.

Термодинамическое поведение смеси азеотропного состава подобно поведению чистого вещества, так как состав паровой и жидкой фаз одинаков, а давление в точках росы и кипения совпадают.

Зеотропные смеси – смеси, в которых равенство составов равновесных жидкой и паровой фаз не выполняется ни при каком соотношении количеств компонентов. Зеотропы, т. е. отдельно кипящие системы, при заданных температуре или давлении в состоянии равновесия имеют различные составы жидкости и пара во всем интервале концентраций [1].

Концентрация паровой и жидкой фаз зеотропной смеси в условиях термодинамического равновесия различаются, т. е. конденсация при постоянном давлении происходит при падении температуры от точки С до В (рис.1).

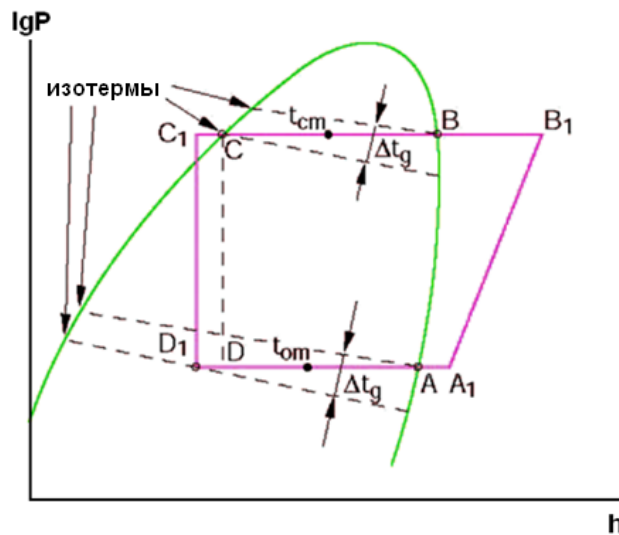


Рис. 1. Поведение зеотропных смесей при конденсации и кипении:  
 $\Delta t_g$  – температурный глайд;  $t_{cm}$  – средняя температура конденсации;  
 $t_{om}$  – средняя температура испарения

Температуру конденсации определяют как среднюю температуру  $t_{к.ср}$  между температурой точки росы В (температура начала процесса конденсации при постоянном давлении нагнетания  $p_n$ ) и температурой С жидкости на выходе из конденсатора. Разность температур фазового перехода при постоянном  $p = const$  получила

название температурный глайд. Значение температурного глайда зависит от состава рабочего тела и является важным технологическим параметром. Умеренный температурный глайд для хладагента 410 имеет 6–7 °С. Хладагент 410А имеет температурный глайд 0,2 °С, он близок к квазиазетропному, что упрощает заправку систем, исключает фракционирование при утечках.

Переохлаждение жидкости вычисляют как разность между действительной температурой жидкости и температурой точки конца конденсации  $t_{к2}$  при давлении нагнетания  $p_n$ . Важно при регулировании давления учитывать температурный глайд. Температурный глайд – решающий фактор при определении размеров теплообменных аппаратов.

Азеотропные хладагенты обладают малым значением глайда. Их использование в холодильной и климатической технике является предпочтительным.

Таким образом, при потерях давления увеличивается температурный глайд, если пренебрегать данным параметром при составлении теплового баланса, это может привести к занижению размеров теплообменных аппаратов.

Недостатки зетропных смесей:

- снижение интенсивности теплообмена в конденсаторах и испарителях холодильных машин;
- возможность изменения состава при появлении утечек в контуре холодильной системы, что влияет на пожаробезопасность и холодопроизводительность установки.

Преимущество зетропных смесей заключается в изменении состава рабочего тела циркуляции его по контуру холодильной установки, может привести к возрастанию холодопроизводительности и холодильного коэффициента по сравнению с такими характеристиками чистого хладагента.

Особенности азеотропных хладагентов:

- постоянная температура кипения, которая не изменяется с течением времени;
  - стабильный состав смеси и в жидком, и в парообразном состоянии;
  - высокая устойчивость к разложению на составляющие. Данные хладагенты более предпочтительны для использования в холодильной и климатической технике.
- Причиной тому является малое значение температурного глайда.

Сложность процесса теплообмена при конденсации, его зависимость от многих факторов и отсутствие полной физической модели и математического описания процесса делают эксперимент наиболее надежным средством получения данных.

#### Литература

1. Бабакин, Б. С. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе / Б. С. Бабакин, В. И. Стефанчук, Е. Е. Ковтунов. – М. : Колос, 2000.
2. Кутателадзе, С. С. Анализ теплообмена при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности / С. С. Кутателадзе, И. И. Гогонин, Н. И. Григорьева // ИФЖ. – 1983. – Т. 44, № 6.
3. Кутателадзе, С. С. Формулы и графики для расчетов общего коэффициента теплоотдачи в вертикальных подогревателях при пленочной конденсации медленно движущегося насыщенного пара / С. С. Кутателадзе, А. Н. Шренцель // Советское котлотурбинное. – 1938. – № 4.
4. Слепян, Е. Исследование теплоотдачи при конденсации пара фреона – 12 на гладкой и ребристых трубах / Е. Слепян // Холодил. техника. – 1952. – № 1.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

А. Е. Шуст

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Одной из приоритетных задач энергосбережения является эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Повышение термодинамической эффективности генерации энергии различных видов необходимо рассматривать как один из возможных путей решения этой задачи.

Для утилизации тепловых отходов продуктов сгорания газотурбинных установок, топлива с низкой теплотворной способностью, а также для утилизации вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, находят свое применение тригенерационные турбоустановки на органическом цикле Ренкина (ОЦР). Одной из таких установок является тригенерационная турбоустановка с производством жидкой и газообразной углекислой кислоты.

Продукты сгорания поступают в установку абсорбер–дессорбер, где получается чистый  $\text{CO}_2$ . Полученная углекислая кислоты при помощи инжектора подается в ресивер. Из ресивера сжатый в компрессоре диоксид углерода подается в теплообменник, охлаждается, дросселируется в регулирующем вентиле и сепарируется в сепараторе. Часть полученной жидкой кислоты подается на склад. Вторая часть поступает на вторую ступень дросселирования и сепарируется. Часть полученной жидкой кислоты используется для получения холода и конденсации рабочего тела в конденсаторе турбоустановки на органическом цикле Ренкина. Получение холода в установке (тригенерация энергии) осуществляется в испарителях. Это приводит к повышению энергетической эффективности установки.

Можно предположить, что если вместо охлаждения в конденсаторе жидкой углекислотой использовать сторонний источник, например, в виде контура охлаждения с градирней, либо холодной воды, поступающей на объект из поверхностных или подземных источников, то можно значительно снизить расходы углекислоты, а как следствие – и потери эксергии в цикле.

Эксергетический анализ показал, что применение внешнего источника охлаждения конденсатора установки позволяет снизить затраты электрической энергии на привод компрессора до 2,97 %.

В качестве внешнего источника охлаждения предложено использовать либо систему оборотного водоснабжения с градирней либо холодную воду, поступающую на объект из поверхностных или подземных источников.

Все более широкое применение в малой энергетике находят схемы на ОЦР, в котором в качестве рабочих тел обычно используются органические вещества (класс соединений, в состав которых входит углерод, за исключением карбидов, карбонатов, оксидов углерода и цианидов) с более низкой чем у воды температурой кипения. Наиболее перспективными областями применения ОЦР-установок служат солнечная и геотермальная энергетика, утилизация тепловых отходов, продуктов сгорания газотурбинных установок, утилизация вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, а также сжигание топлива с низкой теплотворной способностью (щепа, биогаз, мусор и т. д.).

Применение ОЦР обусловлено следующими его достоинствами: довольно низкие допустимые температуры низкокипящего рабочего тела (НКРТ) перед турбиной, простота конструкции ОЦР-установок, низкая стоимость, высокая надежность, простота автоматизации, невысокая скорость вращения турбины и т. д. Установки такого типа могут применяться не только в рамках когенерации, но и в тригенерационных схемах для производства электричества, тепла и холода, а источником энергии в них могут служить высокотемпературные вторичные энергетические ресурсы (ВЭР).

Принцип работы схемы следующий: из конденсатора жидкое рабочее тело насосом подается в теплообменник, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, парообразуется и перегревается.

Далее рабочее тело поступает в турбину, где совершает механическую работу по вращению вала турбины, связанного муфтой с генератором электрического тока. Затем НКРТ охлаждается в теплообменнике и поступает в конденсатор, где и конденсируется.

Установлено влияние теплофизических свойств (критического давления и удельной теплоты конденсации) на эффективность рабочего тела в сверхкритическом органическом цикле Ренкина. Так, с увеличением критического давления рабочего тела эффективность ОЦР при термодинамически оптимальных параметрах снижается, а с увеличением удельной теплоты конденсации – растет. Сравнивая низкокипящие рабочие тела по их теплофизическим свойствам (критической температуре, критическому давлению и удельной теплоте конденсации), можно определять рабочие тела, обладающие наиболее высокой термодинамической эффективностью для применения в ОЦР.

Органический цикл Ренкина является альтернативой классическому паротурбинному циклу. Его применение предпочтительнее (с технико-экономической точки зрения) при температурах рабочего тела перед турбиной 250 °С и ниже [1], [2]. Это обусловлено снижением эффективности паротурбинного цикла при столь низких значениях температуры рабочего тела, сложностью конструкции и, как следствие, более высокой стоимостью установки. Так, установка на ОЦР (с учетом всех сопутствующих расходов на монтаж, проектирование и т. д.) обойдется в 800–900 долл./кВт, тогда как стоимость паротурбинной установки соизмеримой мощности – от 1000 долл./кВт. Проведенные исследования для схем на органическом цикле Ренкина показали, что в ОЦР также существуют свои оптимальные параметры рабочего тела перед турбиной (температура и давление), при которых эксергетический КПД достигает максимального значения. Аналогичные результаты характерны и для ОЦР с промежуточным перегревом рабочего тела

Таким образом, целью исследования является изучение влияния промежуточного перегрева на эксергетическую эффективность технических условий на ОЦР для различных НКРТ при термодинамически оптимальных параметрах.

Принцип работы: из конденсатора жидкое низкокипящее рабочее тело насосом подается в теплообменный аппарат, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, испаряется и перегревается. Далее поступает в турбину, где совершает механическую работу вращения вала, связанного муфтой с генератором электрического тока. В схеме с промежуточным перегревом НКРТ, пройдя часть высокого давления (ЧВД) турбины, снова попадает в котел-утилизатор, где повторно перегревается и поступает в часть низкого давления (ЧНД) турбины. После совершения работы в турбине НКРТ,

будучи еще в перегретом состоянии, охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения при данном давлении в теплообменном аппарате, и направляется в конденсатор, где и конденсируется.

Классификация рабочих тел по стоимости: с низкой (Н) стоимостью – не более 5 бел. руб./л, средней (С) – 5–15 бел. руб./л, высокой (В) – более 15 бел. руб./л. При этом средний расход хладагента на выработку 1 кВт · ч электроэнергии в ОЦР значительно (примерно в 10 раз) превосходит аналогичный расход водяного пара в классическом цикле Ренкина и зависит от теплофизических свойств НКРТ. Таким образом, при выборе рабочего тела необходимо обращать внимание не только на его эффективность, но и на стоимость.

Анализ полученных результатов показывает, что использование промежуточного перегрева в ОЦР приводит к повышению эксергетической эффективности цикла. В среднем прирост эксергетического КПД составляет 4,28 %, а для некоторых рабочих тел значительно превосходит данный результат (например, 8,14 и 6,56 % для R717 и R32, соответственно), что обусловлено их теплофизическими свойствами.

### **ПРИМЕНЕНИЕ ЗАМКНУТЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ СИСТЕМ В ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛА**

**Д. А. Бекаревич, Е. В. Соловей, Н. М. Кидун**

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

Научный руководитель А. В. Шаповалов

**Трансформация тепла.** Под термином «трансформация теплоты» понимается процесс снижения и/или повышения температуры исходной теплоты в комплексах, состоящих из тепловых машин, работающих в режиме прямого и обратного термодинамических циклов. Различают три системы трансформации теплоты: холодильная машина, понижающий и повышающий термотрансформаторы.

**Замкнутые двухфазные теплопередающие системы.** Двухфазное теплопередающее устройство представлено в виде замкнутого герметичного контура, частично заполненного теплоносителем, включающее соединенный паропроводом и конденсаторопроводом испаритель и расположенный над ним змеевиковый конденсатор; при этом испаритель также выполнен в виде змеевика, а в конденсаторопроводе на входе в испаритель установлен гидравлический затвор, представленный в виде сопла либо пористой структуры. При этом гидравлическое сопротивление затвора больше или равно суммарному гидравлическому сопротивлению испарителя, паропровода и конденсатора. Это придает циркуляции теплоносителя однонаправленное движение и снижает пульсации в контуре циркуляции, характерные для такого рода двухфазных теплопередающих устройств.

Предлагаемая конструкция устройства позволяет собирать тепло от рассредоточенных в пространстве или на поверхности источников тепловыделения с небольшой плотностью теплового потока, накапливая на выходе из испарителя требуемую величину теплового потока, необходимую для быстрого запуска устройства в нестационарных условиях, позволяет пространственно разделять источник и сток тепла, что, вместе с отсутствием движущихся деталей в системе охлаждения, создает положительный эффект, обусловленный увеличением термодинамической эффективности при повышении эксплуатационной надежности всего устройства в целом.

**Абсорбционная машина непрерывного действия закрытого типа.** В абсорбционной машине непрерывного действия происходит постоянная циркуляция хладагента и абсорбента. Так же как и в машине периодического действия, хладагент и абсорбент разделяются дистилляцией, для чего раствор нагревается в кипятильнике, затем хладагент конденсируется в конденсаторе, а освобожденный от хладагента абсорбент подается в абсорбер. Жидкий хладагент поступает в испаритель, где испаряется, а затем пары хладагента удаляются из испарителя благодаря разрежению, создаваемым абсорбером.

Для облегчения циркуляции в систему может быть добавлен буферный газ, как правило, водород. За счет буферного газа давление в системе постоянно, испарение происходит за счет изменения парциального давления, что позволяет упростить циркуляцию хладагента. Такая система позволяет обходиться без движущихся частей, обеспечивая циркуляцию абсорбента с помощью термосифона – трубки, внутри которой жидкость поднимается вверх за счет кипения. Такая система применяется в бытовых абсорбционных холодильниках, устанавливаемых в автодомах. В промышленных холодильниках могут применяться многоступенчатые холодильные машины, позволяющие утилизировать низкопотенциальное тепло, либо получать более низкие температуры.

На схеме Бромид-Литиевой абсорбционной холодильной машины для охлаждения воды охладитель состоит из двух камер:

– верхняя камера – генератор. Это горячая камера с относительно высоким давлением;

– нижняя камера – испаритель и абсорбер. Это холодная камера с очень низким давлением (2 мбар).

Под действием тепла в генераторе из раствора бромида лития выделяются пары воды (хладагента), которые переносятся в конденсатор. Водяной пар конденсируется, отдавая тепло воде охлаждающего контура. Охлажденная вода поступает в испаритель, где при низком давлении закипает при температуре  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$  и забирает тепло от охлаждаемого контура чиллер-фанкойла. Насос прокачивает воду на форсунки, что способствует более интенсивному теплообмену. В других типах АБХМ охлаждаемый контур не обрызгивается, а погружается в ванну хладагента.

Оставшийся концентрированный раствор бромида лития через растворный теплообменник/гидравлический затвор переходит в абсорбер. Для улучшения абсорбции раствор разбрызгивается форсунками и поглощает водяной пар из испарителя. Процесс абсорбции связан с выделением теплоты, которая отводится охлаждающим контуром в абсорбере. Полученный раствор воды и бромида лития перекачивается в генератор через регулятор/теплообменник, и цикл повторяется снова.

**Аккумулялирующие батареи.** На промышленных предприятиях в случае, если возникает необходимость обработки воздуха, например, при наличии пыли или взвесей масла, прибегают к использованию аккумулялирующих батарей без ребер. В качестве материала труб используется нержавеющая и углеродистая сталь с толщиной листа от 1,5 до 3 мм. Тестирование осуществляется путем пропускания внутри труб батареи, погруженной в ванну с водой, сжатого воздуха при давлении, которое варьирует от 10 до 30 бар; эта операция позволяет выявить отклонения (потери), обусловленные некачественной сваркой или дефектами материала.

Аккумулялирующие батареи, в отличие от других систем, использующих принцип перекрестных потоков, позволяют восстанавливать в основном явную теплоту. В то же время любая скрытая теплота превращается в явную, передаваемую более



холодной батарее. В замкнутом контуре промежуточный теплоноситель с помощью насоса циркулирует между двумя или более тепловыми или обменными батареями. В качестве теплоносителя, в зависимости от рабочих температур, может служить вода, антифриз или диатермическая жидкость. Полное физическое разделение двух потоков и последующее исключение любой опасности загрязнения делают данную систему пригодной для применения в различных отраслях промышленности.

Достоинства резервных батарей:

- высокое качество;
- возможность получения тепла от нескольких источников, находящихся на расстоянии друг от друга;
- отсутствие загрязнения между двумя воздушными потоками.

Недостаток резервных батарей заключается в наличии промежуточной жидкости, которая позволяет получить доход, едва превышающий 55 %.

**Пластинчатый теплообменник.** Рекуперативными называются такие теплообменные аппараты, в которых теплообмен между теплоносителями происходит через разделительную стенку. При теплообмене в аппаратах такого типа тепловой поток в каждой точке поверхности разделительной стенки сохраняет постоянное направление.

В большинстве рекуперативных теплообменников теплота передается непрерывно через стенку от теплоносителя к другому теплоносителю. Такие теплообменники называются теплообменниками непрерывного действия.

Рекуперативные теплообменники строятся по методу передачи тепла по поверхностной схеме. По схеме исполнения они бывают прямо- и противоточными, перекрестными, по конструкции – с трубками, с пластинами, ребристые, ребристо-пластинчатые. Материал изготовления – пластик, металл, а также конструкция с применением мембран. По поставленной мастером задаче подогреватели производятся как газовые, воздушные и жидкостные испарители, конденсирующие пары устройства и т. д.

Независимо от вида исполнения, теплообменники производятся на основании нормативов ГОСТ 15518–1987, которых в первую очередь придерживаются пластиночные устройства. Рекуператоры, как известно, эффективнее регенераторов. Классификация по исполнению подразумевает матричные, пластиночные, смесительные и спиральные агрегаты.

Матричные выполняют теплообмен между жидкостью и газом путем взаимодействия этих сред между собой. Пластиночная модель передает тепло через металлические или графитовые пластины. Смесительное устройство осуществляет теплообмен между средами, который происходит благодаря их соприкосновению и смешиванию.

Рекуперативный пластинчатый теплообменник DUOTERM RCP обеспечивает возможность получения тепла как в явном, так и в скрытом виде. Теплообменник DUOTERM RCP состоит из участков теплообмена, выполненных в виде плоских алюминиевых пластин, чередующихся с рифлеными алюминиевыми листами, которые вмонтированы в алюминиевый корпус. Рекуперативные теплообменники DUOTERM RCP имеют большую поверхность теплообмена, полученную путем уменьшения расстояния между рифлеными пластинами, что позволяет получить большое количество дополнительно накопленного тепла.

Достоинства рекуперативного теплообменника:

- низкое загрязнение двух воздушных потоков;
- легкая очистка.

Недостатки рекуперативного теплообменника:

- два потока воздуха должны находиться близко друг к другу;
- скрытая теплота передается только тогда, когда температура поверхности рекуперативного теплообменника падает ниже точки росы;
- конденсация одного из воздушных потоков приводит к появлению влаги.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: ЭТАПЫ, НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ**

**Д. Г. Пархомчук**

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

Научный руководитель Г. А. Рудченко

Важнейшим приоритетом государственной энергетической политики в Республике Беларусь, наряду с устойчивым обеспечением страны энергоносителями, является создание условий для функционирования и развития экономики при максимально эффективном использовании топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Республика Беларусь не располагает собственными значительными запасами ископаемых ТЭР и вынуждена до 84 % ТЭР импортировать из-за рубежа. Использование местных видов топлива в топливно-энергетическом балансе Беларуси находится на уровне 16–17 %, в основном за счет древесного топлива и торфа. В республике потребление топливно-энергетических ресурсов находится на уровне 35 млн т у. т. в год или 3,5 т на человека. По сравнению с развитыми странами (США, Канада, Япония, Австрия, Германия, Швеция), в Республике Беларусь энергоемкость ВВП в два раза выше. Поэтому стратегической целью деятельности в области энергосбережения является снижение энергоемкости ВВП и, как следствие, снижение зависимости республики от импорта ТЭР, что может быть достигнуто за счет:

- повышения эффективности использования энергоносителей в результате внедрения новых энергосберегающих технологий, оборудования, приборов и материалов, утилизации вторичных энергоресурсов;
- структурной перестройки отраслей экономики и промышленности;
- оптимизации топливного баланса республики с увеличением доли местных видов топлива, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Республиканским органом государственного управления, уполномоченным Правительством Республики Беларусь для проведения государственной политики в сфере энергосбережения, является Комитет по энергоэффективности при Совете Министров Республики Беларусь. Основными задачами Комитета являются: проведение государственной политики в сфере энергосбережения; осуществление государственного надзора за рациональным использованием топлива, электрической и тепловой энергии.

Основными принципами государственного управления в сфере энергосбережения являются:

- осуществление государственного надзора за рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов;
- международное сотрудничество в сфере энергосбережения;
- создание системы финансово-экономических механизмов, обеспечивающих экономическую заинтересованность производителей и пользователей в эффективном

использовании топливно-энергетических ресурсов, вовлечении в топливно-энергетический баланс нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, а также в инвестировании средств в энергосберегающие мероприятия;

– повышение уровня самообеспечения республики местными топливно-энергетическими ресурсами;

– осуществление государственной экспертизы энергетической эффективности проектных решений;

– реализация демонстрационных проектов высокой энергетической эффективности.

Программными документами, определяющими пути реализации потенциала экономики энергоресурсов в Республике Беларусь, являются республиканские программы по энергосбережению, утверждаемые в установленном законодательством порядке Правительством Республики Беларусь на 5 лет. Ежегодно определяются приоритетные направления в сфере энергосбережения на текущий момент и ближайшую перспективу, разрабатываются и выполняются региональные и отраслевые программы мероприятий по энергосбережению (см. таблицу). В результате выполнения этих программ конкретные энергосберегающие технологии и оборудование внедряются в народное хозяйство республики и обеспечивают энергосберегающий эффект.

#### Этапы и направления развития энергосбережения в Республике Беларусь

Этапы	Направления
1990–1995 гг.	Создан межведомственный республиканский орган – Государственный комитет по энергосбережению и энергетическому надзору
1996–2000 гг.	Принятие государственной программы «Энергосбережения» и Закона об энергосбережении; модернизация и повышение эффективности котельных
2001–2005 гг.	Принята республиканская программа «Энергосбережения» на 2001–2005 гг.; снижение энергоемкости ВВП и в результате этого – снижение зависимости республики от импорта топливно-энергетических ресурсов
2006–2010 гг.	Принята республиканская программа «Энергосбережения» на 2006–2010 гг.; организационно-экономические направления; технические направления
2011–2015 гг.	Принята республиканская программа «Энергосбережения» на 2011–2015 гг.; снижение энергоемкости ВВП Республики Беларусь на 50 % по отношению к уровню 2005 г. и увеличение доли местных видов топлива в балансе котельно-печного топлива до 28 %
2016–2020 гг.	Принята республиканская программа «энергосбережения» на 2016–2020 гг.; сдерживание роста валового потребления топливно-энергетических ресурсов при экономическом развитии страны; дальнейшее увеличение использования местных топливно-энергетических ресурсов, в том числе возобновляемых источников энергии
2021–2025 гг.	Принята республиканская программа «Энергосбережения» на 2021–2025 гг.; интеграция БелАЭС в энергобаланс и режим энергосистемы страны; повышение управляемости и надежности Энергосбережения и энергоэффективности; экономически обоснованное использование возобновляемых источников энергии и местных видов топлива; формирование условий для демонополизации и рыночных отношений

В результате выполнения комплекса мер по повышению энергоэффективности отраслей экономики снижение энергоемкости ВВП в 1999 г. относительно 1995 г. составило 22,4 %. При росте ВВП в 1999 г. относительно 1995 г. на 28,3 % валовое потребление топливно-энергетических ресурсов (без учета сырья) в республике в 1999 и 2000 г. практически остается на уровне 1995 г.

Суммарную экономию ТЭР в республике в сопоставимых условиях с 1996 по 2000 г. можно оценить на уровне 6,8 млн т у. т., в том числе более 4 млн т у. т. – за счет проведения энергосберегающих мероприятий и более 2 млн т у. т. – за счет дополнительных мер. Доля использования местных видов топлива в топливном балансе республики в 2000 г. относительно 1995 г. возросла с 16,9 до 18,5 %.

За период 1996–2000 гг. создана структура и основные элементы непрерывной системы образования в области энергосбережения, открыта новая специальность «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент», в ведущих технических вузах республики образованы кафедры соответствующего профиля, налажена система научно-технической информации и пропаганды.

В 2001–2005 гг. ежегодно формировались и реализовывались региональные и отраслевые программы энергосбережения. В целях реализации Республиканской программы энергосбережения на 2001–2005 гг. и усиления работы по повышению эффективности использования ТЭР принято Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 27 декабря 2002 г. № 1820 «О дополнительных мерах по экономному и эффективному использованию топливно-энергетических ресурсов». В результате их выполнения в отраслях экономики республики были внедрены энергоэффективные технологии, основное и вспомогательное энергосберегающее оборудование, эффективные теплообменники, регулируемые электроприводы, были установлены системы автоматического регулирования потребления ТЭР, осуществлялась передача нагрузок на ТЭЦ от ведомственных котельных, замена неэкономичных котлов и другого оборудования на более эффективное, перевод котлов на местные виды топлива и горючие отходы производства и т. д.

Экономия ТЭР за счет снижения энергоемкости ВВП в 2004 г. по отношению к 2000 г. составила 9,2 млн т у. т., в том числе за счет внедрения технических мероприятий согласно государственной статистической отчетности по форме 1-энергосбережение сэкономлено более 3,5 млн т у. т.

Доля МВТ в балансе КПТ увеличилась с 17,2 % в 2006 г. до 20,3 % в 2009 г., в 2010 г. планируется 20,5 %. В рамках реализации Республиканской программы энергосбережения на 2006 – 2010 гг. проводилась активная работа по пропаганде рационального использования ТЭР.

В 2006–2010 гг. в республике велась активная работа по приведению нормативно-правовой базы в соответствие с актуальными задачами энергосбережения

В 2011–2015 гг. доля местных ТЭР в котельно-печном топливе увеличилась с 20,7 до 29,5 %.

В структуре местных ТЭР доля возобновляемых источников энергии составляет около 46 %. В структуре возобновляемых источников энергии доля щепы увеличилась с 12,8 до 22,7 % (на 223 тыс. т у. т.).

Объем экономии составил 4,1 млн т у. т.

В 2016–2020 гг. доля местных ТЭР в валовом потреблении ТЭР достигла 16,5 % и увеличилась на 2,3 %. Доля ВИЭ в валовом потреблении ТЭР достигла 7,1 % и увеличилась на 1,5 %.

Экономические показатели развития Республики Беларусь последних лет не только подтверждают правильность выбранной правительством политики в отношении эффективного использования энергоресурсов, но и убеждают, что альтернативы ей нет.

За последние годы значительный экономический подъем достигнут при незначительном увеличении потребления энергоресурсов, а также природного газа, абсолютная величина энергоемкости внутреннего валового продукта снижена на 28,2 % при росте ВВП почти в 1,5 раза. Это очень хорошие результаты, которых еще не было в мировой теории и практике экономического развития. Безусловно, основной вклад в увеличение ВВП вносится такими «прорывными» направлениями, как машиностроение, металлургия, химическая промышленность, которые являются также и наиболее энергоемкими отраслями.

Общий потенциал энергосбережения в республике оценивается на уровне 30 % валового потребления ТЭР. Основные пути его реализации: структурная перестройка экономики (около 30 %), научно-технический прогресс (около 50 %), совершенствование организационных и экономических механизмов стимулирования энергосбережения (около 20 %).

#### Литература

1. Департамент по энергоэффективности. Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by/?fcjebimgdbaiekf>.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ РАБОТАЮЩИХ НА ДИМЕТИЛОВОМ ЭФИРЕ И УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

А. С. Ованесян, И. А. Пасюкевич

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

Цель исследования – оценить эффективность теплообменных аппаратов работающих на диметиловом эфире и углекислом газе

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) обосновать использование демитилового эфира (ДМЭ) и углекислого газа в теплообменных аппаратах холодильных (ХУ) и теплонасосных установок (ТНУ);
- 2) построить циклы ХУ и ТНУ хладагентов RE170, R12, R744, R134a;
- 3) сравнить циклы теплонасосных и холодильных установок для предлагаемых хладагентов RE170, R744 и заменяемых R12, R134a.

Диметиловый эфир – одно из первых рабочих тел холодильных машин, появившихся более 100 лет назад, его использовали Линде, Гаррисон, Толье и затем ДМЭ был вытеснен аммиаком. В 1863 г. Чарльз Теллер испытал компрессор, работающий на ДМЭ. В 1948 г. Фюннер опубликовал первую диаграмму состояния “In p– i” ДМЭ. В 1955 г. Планк привел данную диаграмму в работе и предложил уравнения по расчету основных термодинамических свойств (см. табл. 1). Позже на их основе Бадылькес предлагает свои уравнения по расчету термодинамических свойств ДМЭ.

Таблица 1

#### Свойства демитилового эфира

Обозначение	RE170	R12
Температура плавления	-138,5°C	-155,95°C
Температура кипения	-24,9°C	-29,74°C

Окончание табл. 1

Обозначение	RE170	R12
Плотность при нормальных условиях	2,1098 кг/м <sup>3</sup>	1,486 кг/м <sup>3</sup>
ODP	0	0,9
Критическая температура	+127,0 °C	+112,0°C
GWP за 100 лет	0	8500
Критическая плотность	0,272 г/см <sup>3</sup>	0,579г/см <sup>3</sup>

Область применения: для метилирования ароматических аминов; для получения диметилсульфата; в качестве пропеллента для аэрозольных баллонов; в качестве растворителя и экстрагента; как хладагент; как топливо для газовой сварки и резки; в качестве многоцелевого топлива.

На рис. 1 представлен цикл холодильной и теплонасосной установки.

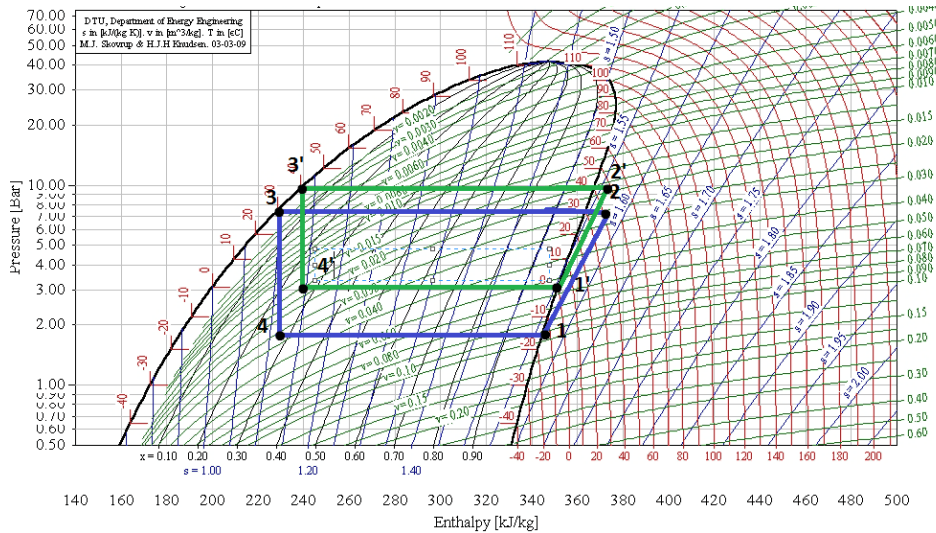


Рис. 1. Цикл холодильной и теплонасосной установки (RE170)

В табл. 2 представлены основные расчетные характеристики ХУ и ТНУ для RE170 и R12.

Таблица 2

### Основные расчетные характеристики работы холодильных установок и теплонасосных установок для RE170 и R12

Хладагент	Показатель						
	Удельная массовая холодопроизводительность, $q_0$ , кДж/кг		Удельная работа сжатия $l_k$ , кДж/кг		Холодильный коэффициент $\varepsilon = q_0/l_k$		COP = $\varepsilon + 1$
	ХУ	ТНУ	ХУ	ТНУ	ХУ	ТНУ	
RE170	125	117	20	18	6,25	6,5	7,5
K12	126	119	21	19	6	6,26	7,26

Углекислый газ (хладагент R744) – достаточно инертный при нормальных условиях двухатомный газ без цвета, вкуса и запаха. Химическое название R744 – диоксид углерода. Химическая формула  $\text{CO}_2$  (диоксид углерода). Относится к группе гидрофторуглеродов (HFC). Дешевое нетоксичное, негорючее и экологически чистое ( $\text{ODP} = 0$ ,  $\text{GWP} = 1$ ) вещество. Стоимость диоксида углерода в 100–120 раз ниже, чем R134a. Хладагент R744 может служить альтернативным хладагентом. Содержится в атмосфере и биосфере Земли, имеет следующие преимущества: низкая цена, простое обслуживание, совместимость с минеральными маслами, электроизоляционными и конструкционными материалами.

В табл. 3 представлены свойства углекислого газа.

Таблица 3

Свойства углекислого газа

Обозначение	R744	R134a
Температура кипения	–93,85	–26,06
ODP	0	0
GWP за 100 лет	1	1430
Класс опасности	A1	A1
Критическая температура, °C	31,1	101,08
Молярная масса, г/моль	44,0	102,03
Плотность при н. у. кг/м <sup>3</sup>	1,977	1,293
Теплота испарения, КДж/кг	94,53	217,2

Область применения: используется в качестве хладагента и рабочего тела в теплоэнергетических установках (в холодильниках, морозильниках, солнечных электрогенераторах и т. д.).

Хладагент R744 может заменять хладагент R134a, так как холодопроизводительность у него больше; в отличие от многих других аналогов, он не воспламеняется.

На рис. 2 представлен цикл холодильной установки R744.

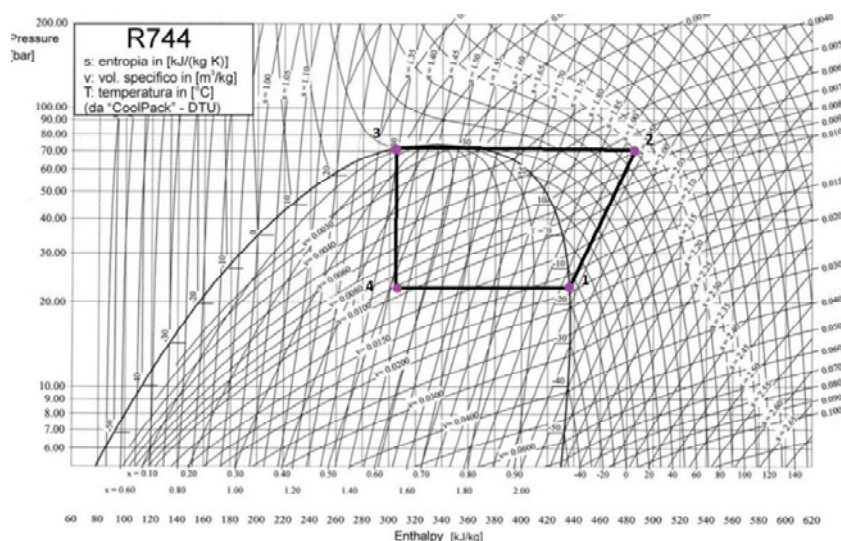


Рис. 2. Цикл холодильной установки (R744 – углекислый газ)

На рис. 3 представлен цикл холодильной установки R134a.

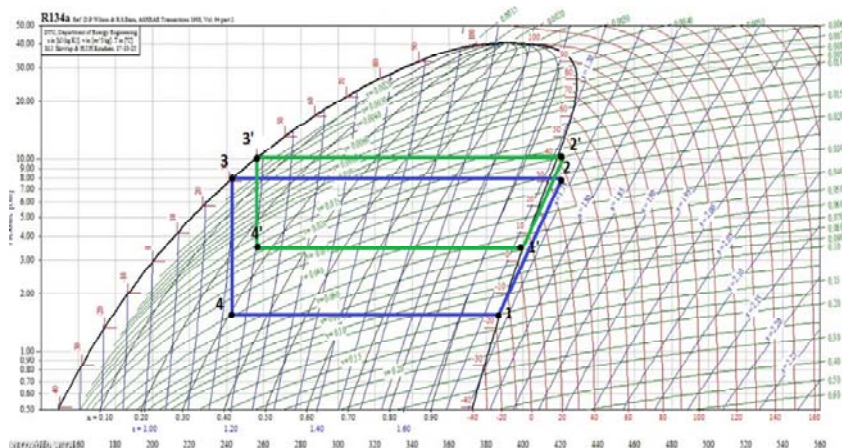


Рис. 3. Цикл холодильной и теплонасосной установки (R134a)

В табл. 4 представлены основные расчетные характеристики работы ХУ и ТНУ для R744 и R134a.

Таблица 4

#### Основные расчетные характеристики работы холодильных установок и теплонасосных установок для R744 и R134a

Хладагент	Показатель						
	Удельная массовая холодопроизводительность, $q_0$ , кДж/кг		Удельная работа сжатия $l_k$ , кДж/кг		Холодильный коэффициент $\varepsilon = q_0/l_k$		COP = $\varepsilon + 1$
	ХУ	ТНУ	ХУ	ТНУ	ХУ	ТНУ	
R744	120	–	48	–	2,8	–	–
R134a	102	141	40	28	2,55	5,04	6,04

В результате исследования мы обосновали использование диметилового эфира и углекислого газа в теплообменных аппаратах ХУ и ТНУ; построили циклы RE170, R12, R744, R134a; сравнили циклы ХУ и ТНУ для предлагаемых хладагентов RE170, R744 и заменяемых R12, R134a соответственно; выяснили, что хладагенты R744, RE170 не уступают заменяемым хладагентам.

### ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕГОНКИ НА СВОЙСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

А. А. Ковальчук

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

Вторичная перегонка – это разделение фракций, полученных при первичной перегонке, на более узкие фракции, каждая из которых затем используется по собственному назначению.



Одной из причин, обуславливающих необходимость вторичных процессов, является то, что прямая перегонка дает только тот выход светлых нефтепродуктов, который обусловлен природными свойствами нефти. Не менее важной причиной является и то, что прямая перегонка нефти не может дать бензин удовлетворительного качества.

Цель исследования – анализ влияния вторичной перегонки на свойства печного бытового топлива и его смеси с этанолом.

Экспериментальное исследование фракционного состава проводилось согласно ГОСТ 2177–99 на установке АРН-ЛАБ-03 (рис. 1). Топливо в перегонном кубе (2) подогревалось нагревательным элементом (1), после достижения температуры кипения, которая фиксировалась с помощью термометра (4), пар поднимался и по насадке каплеуловителя попадал в конденсатор, где охлаждался и уже в виде дистиллята стекал в приемную колбу (5). Температура подогревательного элемента регулировалась колесом (6).



Рис. 1. Схема установки АРН-ЛАБ-03:

- 1 – нагревательный элемент; 2 – перегонный куб;  
3 – насадка Вюрца/каплеуловитель; 4 – термометр;  
5 – приемная колба; 6 – регулятор температуры нагревателя

В таблице представлены основные характеристики печного бытового топлива.

#### Основные характеристики печного бытового топлива

Показатели	Значения
Фракционный состав:	160
10 % перегоняется при температуре, °С, не ниже	
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	45
Цвет	Красновато-коричневый
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	930
Содержание механических примесей	Отсутствует

Для выявления изменений свойств печного бытового топлива было добавлено 5 мл этанола (рис. 2).

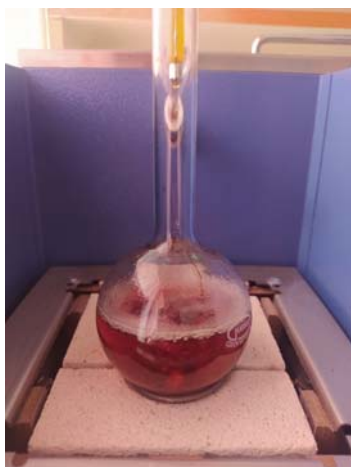


Рис. 2. Процесс кипения топлива

По полученным экспериментальным данным были построены кривые разгонки для печного бытового топлива и его смеси с этанолом, показывающие зависимость объема дистиллята (в процентах) от температуры кипения (рис. 3).

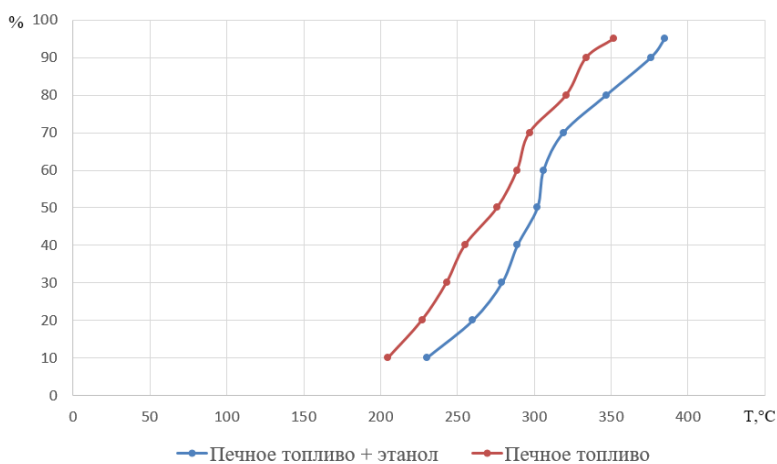


Рис. 3. Кривые разгонки

Из рис. 3 видно, что имеются значительные отличия в температурах кипения для данных видов топлива. Температура начала кипения и выкипания 10 % объема характеризуют пусковые свойства топлива. С понижением этих температур облегчается запуск холодного двигателя при низких температурах окружающей среды. Однако чрезмерное уменьшение температуры начала кипения нежелательно в связи с возможным образованием паровых пробок в системе питания.

Температура 50 % объема выкипания оказывает влияние на быстроту прогрева холодного двигателя, расход топлива для этой цели и приемистость двигателя. Понижение этой температуры способствует быстрому перегреву двигателя при меньшем расходе топлива и значительному улучшению приемистости.

Температуры 90, 97,5 % объема и конец кипения характеризуют полноту испарения топлива. При повышении этих температур полнота испарения топлива уменьшается, нарушается распределение его по цилиндрам двигателя, увеличивается расход топлива, разжижается смазка и ускоряется износ двигателя.

Были определены основные свойства топлив до перегонки и полученного дистиллята (рис. 4).

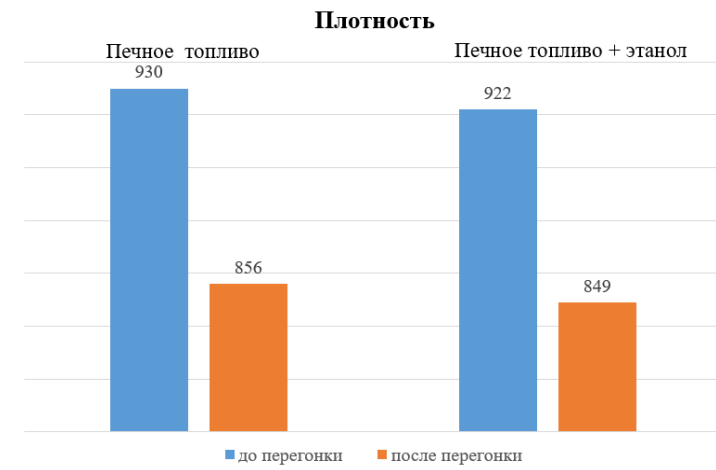


Рис. 4. Плотность печного топлива

Диаграммы на рис. 4 показывают незначительное изменение плотности печного бытового топлива после добавления этанола.

### **ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СЛУЖБ ПРЕДПРИЯТИЯ**

**К. Е. Коршунов**

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

Научный руководитель А. А. Капанский

Цель исследования – демонстрация возможностей современных средств для информатизации вспомогательных производственных процессов инженерно-технических служб предприятия.

Для достижения цели была поставлена следующая задача: показать предметную область и структуру взаимодействия элементов информатизации на базе ПК «Офис инженера».

Создание инновационной экономики не представляется возможным без повсеместного использования информационных систем на основе программно-аппаратных комплексов. Для решения прикладных задач в промышленности наблюдается тенденция развития электронного управления, происходит внедрение САД-систем и САЛС-технологий, систем распознавания и обработки данных на основе облачных технологий.

Важным этапом в переходе Республики Беларусь к цифровой экономике стало обсуждение проекта Стратегия «Наука и технологии 2018–2040» на II съезде ученых Республики Беларусь, где были выявлены возможные перспективы развития экономики.

ООО «Центр инжиниринга», при содействии экспертов ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ» и ГГТУ им. П. О. Сухого, разработал программный комплекс (ПК) «Офис инженера», включающий в себя информационную систему (ИС) «Оборудование» и аналитическую систему (АС) «Статистика». ПК «Офис инженера» позволяет частично автоматизировать повседневные функции инженеров предприятия.

Комплекс позволяет решать повседневные задачи, стоящие перед специалистами инженерных служб территориально-распределенного предприятия.

**Информационная система (ИС) «Оборудование».** Информационная система «Оборудование» позволяет создавать иерархическую модель предприятия практически любой сложности, включая все структурные подразделения и дочерние организации. Модель строится на основе гибкой классификации объектов учета. На базе такой модели достигается автоматизация нескольких процессов, присущих большинству инженерно-технических служб:

- ведение технического учета оборудования и связь данных с бухгалтерским учетом основных средств предприятия;
- планирование проведения ремонтных работ и мониторинг исполнения планов-графиков планово-предупредительных ремонтов;
- работа с данными о поставщиках оборудования и закупками.

В приложениях ИС «Оборудование» реализована гибкая настройка прав пользователей, разделяющая области ответственности пользователей и администраторов системы. Так, пользователям системы доступны для редактирования только ветви модели, представляющие предприятия, цеха или подразделения, на которых они являются ответственными за содержание хозяйства (технологического парка, конструкций и т. д.).

На рис. 1 представлен редактор объекта учета.

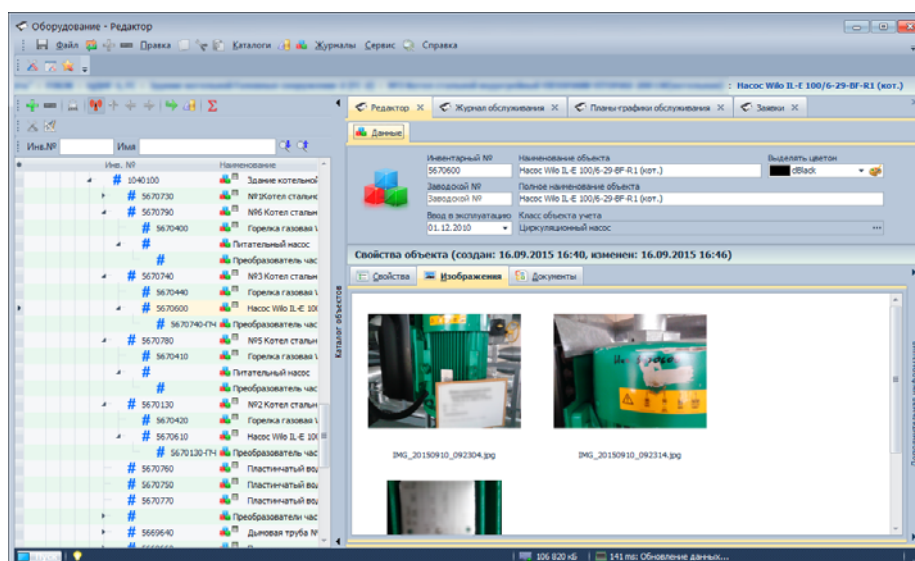


Рис. 1. Редактор объекта учета

**Аналитическая система (АС) «Статистика».** Для организаций, имеющих разветвленную структуру подразделений, филиалов и дочерних предприятий, процесс составления сводной отчетности должен учитывать их юридическую принадлежность,

а также принятую систему взаимных расчетов. При формировании отчетов по всей структуре предприятия и обработке большого объема данных ответственным специалистам легко допустить ошибку при проведении расчетов или при группировке многочисленных пунктов таблиц и ячеек.

АС «Статистика» служит для:

- заполнения и проверки статистических, ведомственных и отраслевых отчетов;
- централизованного сбора и контроля данных (отчетов);
- автоматизированного формирования сводной отчетности предприятия;
- ведения учета потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) по направлениям (на производство продукции, выполняемые работы/услуги);
- ведения журнала теплотворных способностей по видам потребляемого топлива;
- ежемесячного учета выработки/генерации тепловой и электрической энергии;
- сверки балансов отпуска/поставок ТЭР.

В АС «Статистика» реализован общий принцип проверки достоверности данных. Пользователи выбирают отчетный период, вводят данные и подписывают их внутренней подписью системы (рис. 2). Далее данные проверяются «администраторами» АС. Если не были выявлены ошибки, данные считаются действительными, иначе производится «разблокировка данных» и отчет корректируется пользователями. Если процесс подписания данных завершен, наименование организации в структуре предприятий подсвечивается заданным (зеленым) цветом.

Наименование показателя	Код строки	С начала года				
		котельно-печное топливо, т усл. топлива		тепловая энергия, Гкал	электрическая энергия, тыс.кВт.ч	и др.
		всего	из него местные виды топлива и отходы			
A	B	1	2	3	4	5
Истрасходовано, всего	110	1 505.5	1 503.4	0.6	37 736.7	86
из него на производственные нужды	111	1 487.9	1 487.9	0	37 589.6	86
на производство тепловой и электрической энергии	112	1 405.2	1 405.2	0	X	
потери в магистральных сетях	113	X	X	X	0	0
Отпущено другим организациям	120	X	X	X	8 209.5	3 671
Отпущено (продано) населению	130	143.3	143.3	0	0	0
Произведено собственными энергостанциями (тепловая энергия отпущенная; электрическая энергия выработанная)	140	X	X	X	9 115.6	1
из них за счет использования:						
тепловых вторичных энергетических ресурсов (далее – ВЭР), ВЭР избыточного давления	141	X	X	X	0	0
энергии воды, ветра, солнца, геотермальных источников	142	X	X	X	4.9	

Рис. 2. Аналитическая система «Статистика». Статистический отчет

В заключение стоит отметить, что перспективным решением является создание общей программно-информационной платформы на предприятии с возможностью интеграции различных программных модулей, которые позволят эффективно работать с ежегодно растущим потоком информации и учитывать изменение организационных и научно-методических подходов при решении инженерно-технических задач.

В дальнейшем планируется доработка программных комплексов, а также их объединение.

#### Литература

1. Коршунов, Е. А. Программные средства для информатизации вспомогательных производственных процессов инженерно-технических служб предприятия / Е. А. Коршунов, А. С. Фиков, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2020. – № 4. – С. 18–21.
2. Патапенко, Д. Н. Автоматизация сбора и контроля данных периодической отчетности с помощью специализированного программного обеспечения / Д. Н. Патапенко, Е. А. Коршунов, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2020. – № 9. – С. 30–32.

## ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛА ПО СХЕМЕ КАЧЕРА БРОВИНА

**М. С. Веромеев**

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

Научный руководитель О. И. Проневич

Со времени создания трансформатора Тесла прошло уже более 100 лет интерес к этому прибору не угасает, и находятся все более интересные области и его применения. Хотя в наше время трансформатор Тесла чаще всего используется для создания спецэффектов (кино, сцена, красочные шоу, презентации), его применение не исчерпываются этим. Он служит для генерации мощных высокочастотных электромагнитных колебаний, которые успешно применяются для беспроводной передачи данных, в медицине (дарсонвализация), для поиска течей в вакуумных системах (искровой те-чеискатель), для демонстрационно-познавательных целей и другое).

Цель исследования – создание и использование для демонстрации различных электромагнитных и электрофизических явлений на занятиях физики.

Трансформатор Теслы основан на использовании резонансных стоячих электромагнитных волн в катушках. Его первичная обмотка содержит небольшое число витков и является частью искрового колебательного контура, включающего в себя также конденсатор и искровой промежуток. Вторичной обмоткой служит прямая катушка провода. При совпадении частоты колебаний колебательного контура первичной обмотки с частотой одного из собственных колебаний (стоячих волн) вторичной обмотки вследствие явления резонанса во вторичной обмотке возникнет стоячая электромагнитная волна и между концами катушки появится высокое переменное напряжение.

Работу резонансного трансформатора можно объяснить на примере обыкновенных качелей. Если их раскачивать в режиме принудительных колебаний, то максимально достигаемая амплитуда будет пропорциональна прилагаемому усилию. Если раскачивать в режиме свободных колебаний, то при тех же усилиях максимальная амплитуда вырастает многократно. Так и с трансформатором Теслы – в роли качелей выступает вторичный колебательный контур, а в роли прилагаемого усилия – генератор. Их согласованность («подталкивание» строго в нужные моменты времени) обеспечивает первичный контур или задающий генератор (в зависимости от устройства).

Схема классического трансформатора приведена на рис. 1.

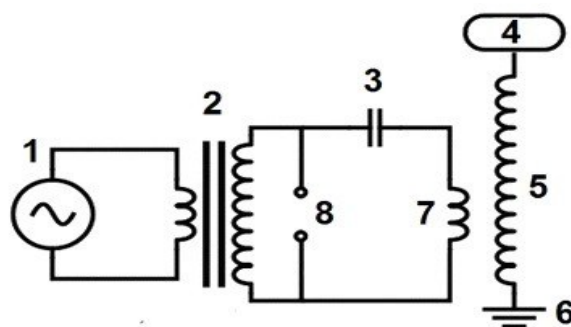


Рис. 1. Устройство классического трансформатора Тесла:  
 1 – источник питания (аккумулятор с прерывателем); 2 – низкочастотный входной трансформатор (катушка Румкорфа); 3 – конденсатор колебательного контура; 4 – выход (терминал); 5 – вторичная обмотка; 6 – заземление; 7 – первичная обмотка; 8 разрядник с искровым промежутком

В современных трансформаторах Тесла основной элемент трансформатора – первичный и вторичный колебательный контуры – остается неизменным, но одна из его частей – генератор высокочастотных колебаний может иметь различную конструкцию, причем редко используются разрядники с искровым промежутком.

Среди многочисленных современных конструкций трансформатора Тесла, нами для сборки была выбрана схема, приведенная на рис. 2 [1]. Данная схема известна как качер Бровина, так как она была изобретена В. И. Бровиным в процессе постройки электромагнитного компаса [2]. Преимуществами данной конструкции являются простота конструкции, малые габариты, высокая доступность деталей, стабильность схемы. Выбранная конструкция включает  $V1$  – транзистор КТ847;  $C1$  – конденсатор 0,068 пФ, 1000 В;  $R1$  и  $R2$  – сопротивления 2,2 кОм и 150 Ом, соответственно.

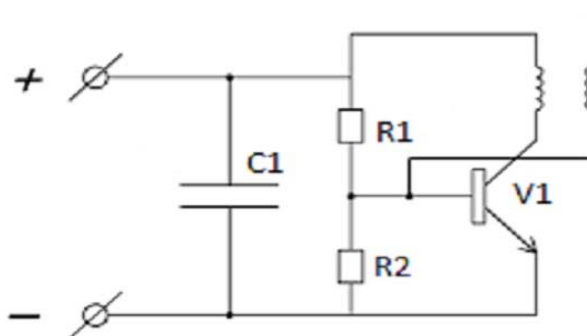


Рис. 2. Схема, использованная при изготовлении действующего макета, пояснения по тексту

При подаче напряжения резисторный делитель создает небольшой потенциал на затворе, происходит открытие транзистора, и большой ток протекает через транзистор и первичную обмотку. В это время на вторичной обмотке наводится электродвижущая сила (ЭДС), которая закрывает транзистор, ЭДС исчезает, так как ток через первичную обмотку не течет. Далее делитель вновь открывает транзистор и все повторяется. В таком режиме транзистор представляет собой твердотельный разрядник, работающий в режиме обратимого пробоя.

Действующий макет трансформатора Тесла был изготовлен следующим образом. В качестве каркаса вторичной обмотки использовали ПВХ-трубу диаметром 50 мм. Для намотки вторичной обмотки использовали эмалированный медный провод диаметром 0,4 мм. Витки провода располагали строго параллельно без наложений, что обеспечивает отсутствие пробоев между витками и паразитных коронных разрядов. Был получен соленоид длиной 600 мм, содержащий 950 витков. Что касается первичной обмотки, то известны три ее варианта: плоская спираль, короткая винтовая и коническая обмотка. Первая обеспечивает максимальную электрическую прочность, но в ущерб величине индуктивной связи. Вторая создает наилучшую связь, обеспечивает максимальный КПД, но чем она длиннее, тем больше вероятность пробоя между ее верхним концом и вторичной обмоткой. Коническая обмотка – это промежуточный вариант, позволяющий получить наилучший баланс между индуктивной связью и электрической прочностью, однако она наиболее сложна в расчетах или требует долгого экспериментирования для выбора числа витков и их диаметров. Поэтому для нашего трансформатора была выбрана винтовая обмотка как самая простая. Ее изготовили из алюминиевого монтажного провода диаметром 3 мм. Диаметр первичной обмотки – 100 мм, число витков – 7. Она располагалась коаксиально со вторичной обмоткой и удерживалась в заданном положении за счет жесткости провода. Был взят готовый корпус из пластика, внутри которого расположились конденсатор и два транзистора, спаянных параллельно.

Общий вид изготовленного трансформатора Тесла приведен на рис. 3.



Рис. 3. Действующий макет качера

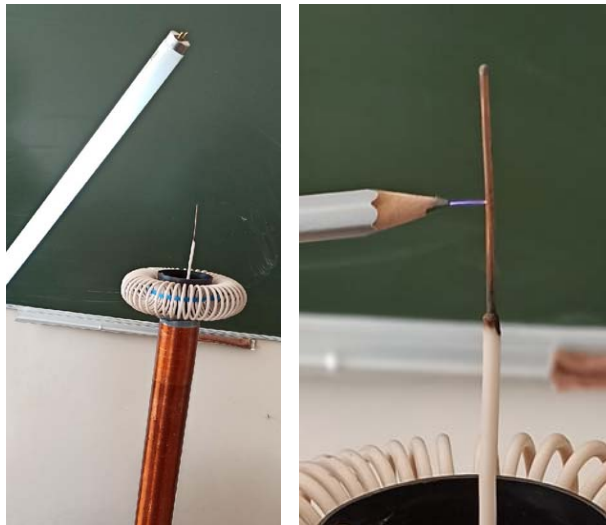


Рис. 4. Демонстрация искрового разряда и распространения электромагнитных волн в окружающем пространстве

Действующий макет трансформатора был использован на занятиях по физике в разделе «Электричество и магнетизм» для демонстрации следующих физических явлений:

- коронный разряд – свечение воздуха в электрическом поле высокого напряжения (рис. 4);
- искровой разряд – пучок ярких, быстро исчезающих искровых каналов;
- стримеры – устойчивые светящиеся разветвленные каналы, которые уходят непосредственно в воздух;



- дуговой разряд – возникает при поднесении к выходу трансформатора заземленного предмета, это наиболее мощный из электрических разрядов;
- распространение электромагнитных волн в окружающем пространстве – свечение газоразрядных ламп на различном расстоянии от трансформатора (рис. 4);
- образование стоячей электромагнитной волны вдоль вторичной обмотки трансформатора – перемещая маленькую газоразрядную лампочку вдоль оси катушки вторичной обмотки, можно определить места, где свечение максимально (пучности), а где минимально (узлы) стоячей волны.

Таким образом, изготовить трансформатор Тесла достаточно высокой мощности можно из доступных и недорогих материалов и электронных приборов. Трансформатор Тесла является отличным наглядным пособием для изучения электромагнитных явлений на занятиях по физике.

#### Литература

1. Качер Бровина. – Режим доступа: <https://x-faq.ru/index.php?topic=118.4280>. – Дата доступа: 24.03.2022.
2. Катушка Тесла. – Режим доступа: <http://fb.ru/article/145931>. – Дата доступа: 25.03.2022.

## ЦИФРОВИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Д. В. Подушкин

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

Научный руководитель Г. А. Рудченко

Цифровизация для энергетического сектора означает, что стратегия развития компаний и предприятий будет выстраиваться вокруг инновационных технологий, а также вокруг систем децентрализованной генерации энергии. По причине повсеместной электрификации предприятий, в том числе предприятий, обеспечивающих коммунальные нужды, постепенно отпадет необходимость создания масштабной инфраструктуры. В ближайшее время должно смягчиться законодательство для отраслей, которые используют новейшие технологии, в том числе финансирование разработок систем, работающих на альтернативных источниках энергии, а также требования к интеллектуальным системам учета [1].

Цифровизация – важнейшее условие для повышения или сохранения уровня конкурентоспособности экономики в мире. На данный момент существует необходимость масштабных изменений в сфере энергетики и направлении общего развития промышленности Беларуси. Однако успешное достижение целей программы сталкивается с рядом проблем.

Цель цифровизации – изменение подходов и переход компании, а также предприятий на управление путем внедрения цифровых технологий и анализа большого массива данных.

Цифровизация позволит предприятиям и энергетическим компаниям увеличить доходы на 3–4 % в краткосрочной перспективе (см. таблицу).

**Возможные положительные последствия цифровизации для общества**

Новые	Улучшенные
Появление экономического и социального эффекта	Повышение качества жизни
Появление человекозамещающих управляющих систем	Рост производительности общественного труда
Возникновение новых бизнес-моделей	Повышение прозрачности экономических операций и обеспечение возможности их мониторинга
Обеспечение доступности в продвижении товаров и услуг	–

Однако сложность систем, построенных с помощью цифровизации, приведет к тому, что лидирующие компании в данной сфере сфокусируются на получении осязаемого результата в краткосрочной перспективе. В результате будет получен необходимый толчок для развития более долгосрочных инициатив. При проведении цифровизации в энергетике работа ведется по трем направлениям.

**1. Цифровизация текущей операционной модели.**

Наиболее продвинутые компании заново создают процессы бэк-офиса для осуществления необходимого уровня автоматизации. Наиболее важные области будут включать следующие решения:

- роботизация и автоматизация процессов;
- цифровизация систем взаимодействия с потребителем;
- повышение использования всех доступных данных при принятии решений;
- цифровизация систем управления персоналом;
- обновление ИТ-инфраструктуры.

Кроме автоматизации текущих процессов, построения многовекторной системы коммуникации с потребителем, цифровизация подразумевает изменение системы процессов организации – от сокращения страниц документации до автоматизации принятия решений. В распределении электроэнергии первичными для цифровизации выступают процессы, которые повторяются многократно: подключение новых потребителей, обслуживание сетей, управление инвестициями, данными по обслуживанию оборудования, потерями в сети.

**2. Использование современных методов аналитики.**

Источники и данные должны быть взаимосвязаны, а ответственность за сбор и хранение закреплена внутри компаний – с наличием CDO (Chief Data Officer).

**3. Изучение новейших технологий.**

Разрабатывать новые проекты и следить за технологическим прогрессом, анализировать достоинства и недостатки, оценивать эффективность технологических решений и вводить их в промышленную эксплуатацию, также следует сотрудничать с финансовыми и телекоммуникационными компаниями, чтобы расширить собственный рынок продуктов и источников дохода.

Сейчас на пути к цифровизации Беларуси стоит ряд затрудняющих ее и требующих незамедлительного решения факторов:

- рост технологических требований. Цифровизация требует повышение надежности, качества, скорости и возможности передачи электроэнергии;
- экологические нормы требуют постоянного снижения антропогенного воздействия на природу;

– устаревшая инфраструктура, зависимость от топливных ресурсов, низкий уровень технологического развития промышленности Беларуси, а также нуждаемость промышленности в больших объемах инвестиций;

- повышение цен на электроэнергию и зависимость от импортных технологий;
- слабая взаимосвязь ключевых участников рынка;
- нехватка квалифицированных кадров снижает производительность труда.

Все вышеперечисленные факторы сделают неконкурентоспособной экономику и промышленность Республики Беларусь, если не будут оперативно приняты меры для их решения:

- увеличение масштаба использования альтернативных источников энергии;
- децентрализованный подход к производству различных видов энергии;
- внедрение технологии умных сетей (smart grids);
- цифровизация энергетического сектора и, в целом, инфраструктуры;
- внедрение Интернета вещей (Internet of Things);
- переход к новой конфигурации систем – Internet of Energy;
- создание новой энергетической платформы, на основе цифровых технологий;
- внедрение современных методов аналитики;
- развитие сервисов для клиентов на основе цифровых технологий.

Smart Grid – это полностью саморегулирующаяся и самообновляющаяся электроэнергетическая система с сетевой топологией, включающей все источники генерации, магистральные и распределительные сети и все виды потребителей электроэнергии, управление которыми осуществляется с помощью единой сети информационно-управляющих устройств и систем реального времени [3].

Преимущества, связанные с интеллектуальной сеткой, включают в себя:

- более эффективную передачу электроэнергии;
- более быстрое восстановление электричества после нарушений электроснабжения;
- снижение эксплуатационных и управленческих затрат на коммунальные услуги и, в конечном счете, снижение затрат на электроэнергию для потребителей;
- снижение пикового спроса, что также поможет снизить тарифы на электроэнергию;
- расширение интеграции крупномасштабных систем возобновляемой энергетики;
- улучшение интеграции систем производства электроэнергии между потребителями и владельцами, включая системы возобновляемых источников энергии;
- укрепление безопасности [4].

Для сохранения уровня конкурентоспособности на мировом рынке, и в частности странах СНГ, цифровую трансформацию энергетической системы необходимо провести до 2025 г.

В мире постепенно будет происходить переход на цифровизацию промышленности и энергетики. Это позволит Республике Беларусь повысить уровень конкурентоспособности на мировом рынке, однако для этого предстоит побороть целый ряд проблем.

#### Л и т е р а т у р а

1. Цифровая трансформация в энергетике. Проблемы и перспективы развития. – Режим доступа: <http://smartenergysummit.ru/novosti/czifrovaya-transformacziya-v-energetikeproblemyi-i-perspektivyi-razvitiya/>. – Дата доступа: 25.02.2021.
2. Цифровая экономика. – Режим доступа: <https://medium.com/cemi-ras/>. – Дата доступа: 26.05.2020.
3. IEEE Xplore. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/>. – Дата доступа: 10.10.2020.
4. Цифровизация и энергия. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-andenergy>.

## ПЕЧНОЕ БЫТОВОЕ ТОПЛИВО – НОВЫЙ ВИД РЕЗЕРВНОГО ТОПЛИВА В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Е. В. Соловей, И. О. Шамело

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

Научный руководитель О. Ю. Морозова

В статье рассматриваются виды и особенности печного бытового топлива, а также проводится сравнительный анализ преимуществ его использования в качестве резервного либо аварийного источника топливоснабжения на энергетических объектах Беларуси по сравнению с используемым для этих целей мазутом.

Печное бытовое топливо – это продукт нефтепереработки, который получают из дизельных фракций нефти вторичной перегонки. Такой способ изготовления обуславливает относительно невысокие затраты на его производство. Оба нефтеперерабатывающих завода в Республике Беларусь – Мозырский и Новополоцкий – производят данный вид топлива

Печное бытовое топливо изготавливается на специальном высокотехнологичном оборудовании, которое позволяет регулировать требуемые свойства и показатели. После изготовления данный вид топлива необходимо хранить в специальных герметичных резервуарах, чтобы оно не испарялось и не теряло своих свойств. Обычно для этого используются небольшие баллоны или бочки.

В качестве основы для производства печного бытового топлива может быть использовано также и дизельное топливо, однако при этом будет получено топливо, которое обладает специфическими свойствами, например, имеющее очень низкую температуру вспышки, за счет чего существует необходимость в добавлении присадок, синтезированных из этилена и винилацетата. Подобная разновидность топлива может быть использована в стационарных отопительных системах, но не для промышленных объектов.

В целом, печное бытовое топливо по ряду показателей можно классифицировать на разные виды. Выделяют следующие марки: тяжелое, среднее, легкое. Соответствие той или иной марке определяется по ряду показателей, среди которых температура горения, вязкость, температура застывания, а также теплоемкость и наличие примесей.

В зависимости от того, сколько серы в качестве примеси входит в состав топлива, оно может быть малосернистым – часть серы не превышает 0,5 % и сернистым – часть серы составляет 0,5–1,1 %.

Кроме того, печное бытовое топливо может быть темным или светлым.

Темное топливо используется в основном для бытовых нужд. Оно может быть использовано в небольших энергоустановках. Темное печное бытовое топливо считают прямой альтернативой газу, так как оно обладает целым комплексом преимуществ – оно очень экономично и энергоэффективно за счет того, что обладает высокой калорийностью, и для достижения определенной температуры его требуется небольшое количество. В случае, если при производстве темного вида печного бытового топлива используется дизельное топливо, мазут, отработанное машинное масло, бензол и воду в четко определенных пропорциях, то показатели теплоотдачи значительно вырастают. Ко всем этим достоинствам стоит добавить и то, что этот вид топлива обладает низкой температурой замерзания, – начинает замерзать только при температурах  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже. Одним из главных плюсов темного печного бытового топлива является его низкая цена.

Светлое топливо также может использоваться в жилых зданиях, однако больше применяется в промышленных условиях: на нем могут работать крупные генераторы, его можно использовать и в сельском хозяйстве. Такой сферой распространения светлое печное бытовое топливо обязано своей повышенной теплоотдаче.

Основными характеристиками печного бытового топлива являются коксуюемость, кислотность, зольность, кинематическая вязкость, температура вспышки, плотность.

Известно, что в энергосистеме Республики Беларусь основным видом топлива является природный газ, а резервным либо аварийным до недавнего времени был мазут. Однако данный вид топлива даже при использовании в течение непродолжительного времени, которое составляет согласно нормативным документам, от 5 (работа объекта в аварийном режиме) до 10 (в качестве резервного варианта использования) суток, приводит ко множеству неблагоприятных последствий.

Первым и самым ощутимым для экологической среды последствием при сжигании мазута является значительный выброс диоксида серы в окружающую среду, который строго нормируется экологическими нормами и правилами (ЭкоНиП) в зависимости от мощности энергоустановки, а также срока введения ее в эксплуатацию, но даже для самых неблагоприятных вариантов показатель выброса диоксида серы, согласно указанному нормативному документу, не должен превышать 0,85 %. В случае использования в качестве топлива для котельных установок мазута показатель выброса серы был значительно превышен и составлял в отдельных случаях более 2,5 %, что превышает требуемую норму более чем в 3 раза.

Проведенные расчеты показывают, что при переходе на печное бытовое топливо, выбросы в атмосферу диоксида серы значительно снижаются. В частности, общая масса выбросов за предполагаемых 10 дней использования печного бытового топлива в качестве резервного источника топливоснабжения уменьшится в 70 раз. При этом процентное содержание выброса не будет превышать регламентируемых ЭкоНиП нормативов и будет составлять не более 0,5 % для светлого печного бытового топлива марки В, предлагаемого к использованию на теплоэнергетических объектах.

Еще одним из неблагоприятных эффектов использования мазута, который крайне негативно отражается как на окружающей среде, так и на энергетическом оборудовании, является его высокая зольность, которая выше, чем у предлагаемого к использованию печного бытового топлива в 7 раз. Количество сажи, образующееся в топке в результате недожога топлива, которое осаждается на элементах оборудования и выбрасывается в атмосферный воздух, за 10 суток сжигания топлива составит для мазута порядка 350 кг, а для печного бытового топлива будет ниже почти в 2 раза и составит около 180 кг.

Сравнительный анализ приведенных показателей позволяет сделать вывод, что переход на печное бытовое топливо позволит уменьшить содержание в окружающей среде выбросов сажи и золы, а также поможет снизить процессы загрязнения и предотвратить преждевременный выход из строя технологического оборудования объектов энергетики за счет меньшей (более чем в 3 раза) вязкости печного бытового топлива.

Еще одним фактором, который позволяет сделать выбор в пользу печного бытового топлива по сравнению с мазутом, является тот факт, что в силу специфики мазута, а именно его застывании при температуре ниже +25 °С, существует необходимость использования значительного количества тепла на разогрев мазута и поддержание его температуры на определенном уровне. Для печного бытового топлива такой необходимости нет, так как его температура застывания составляет не выше -5 °С летом и не выше -15 °С зимой. Таким образом, могут быть значительно сни-

жены затраты на так называемые «собственные нужды» объекта и можно добиться значительной экономической эффективности при переходе на новый вид резервного топлива.

Что касается ценовой политики, то цена мазута марки М-100, используемого в настоящее время на энергетических объектах, примерно в 1,5 раза ниже цены на предлагаемое к использованию печное бытовое топливо, но экономическая эффективность, все же, будет ощутима за счет экономии тепловой энергии на постоянный подогрев мазута, уменьшения износа и выхода из строя оборудования по причине его загрязнения выбросами сажи и золы и, следовательно, трат на его ремонт либо замену, а также на экономии финансовых средств на экологические выплаты по компенсации выбросов диоксида серы в окружающую среду.

Технология перехода на печное бытовое топливо энергетических объектов в целом не является слишком трудоемкой и затратной. В идеальном варианте, который предполагает отсутствие физического износа ранее используемого оборудования мазутного хозяйства, оно может быть использовано для печного бытового топлива в части емкостей для хранения, а также для другого технологического оборудования, но с необходимостью замены форсунок и исключением из системы элементов, используемых для подогрева и поддержания в подогретом состоянии мазута. Существует возможность использования здания мазутонасосной станции для размещения требуемого количества насосного оборудования и фильтров очистки топлива с соответствующей запорно-регулирующей и предохранительной арматурой.

Выбор насосного оборудования, фильтров, запорной арматуры требуется осуществлять в соответствии с требованиями действующих нормативно-технической документации и технических нормативных правовых актов, с учетом требований промышленной безопасности и охраны труда. Предполагается осуществить очистку внутренних поверхностей, не демонтируемых трубопроводов мазутного хозяйства, нулевой емкости от остатков мазута для обеспечения возможности использования печного бытового топлива, что также позволит снизить финансовые вложения на реконструкцию. В случае, когда физический износ оборудования не позволяет использовать прежнее оборудование, оно должно быть демонтировано и заменено на новые элементы.

Задача перевода энергетических объектов с мазута в качестве резервного либо аварийного вида топлива на печное бытовое поставлена в проектом документе «Схема теплоснабжения г. Гомеля на 2025 год с перспективой до 2030 года», разработанном проектным научно-исследовательским республиканским предприятием «БелНИПИЭнергоПром», который последовательно реализуется на энергетических объектах Гомельской энергосистемы с перспективой внедрения на других объектах Республики Беларусь [1].

Выполнив сравнительный анализ печного бытового топлива и мазута, можем сделать вывод, что переход на печное бытовое топливо:

- обеспечит соответствие выбросов диоксида серы и других вредных веществ экологическим нормативам, регламентируемым ЭкоНиП;
- позволит существенно снизить экономические и энергетические затраты на разогрев топлива и поддержание топливного хозяйства;
- обеспечит увеличение срока службы и безопасности использования оборудования за счет исключения использования топлива, обладающего высокой вязкостью;
- будет использовать незначительные финансовые вложения на модернизацию существующих элементов котельного оборудования.

## Литература

1. Шаповалов, А. В. Реконструкция топливного хозяйства Гомельского теплофикационного комплекса / А. В. Шаповалов, Н. З. Заглубоцкий, О. Ю. Морозова // 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. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2020. – С. 210–212.

**КАПЕЛЬНИЦА КЕЛЬВИНА****А. Ю. Рабков***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. А. Ревенок

Капельница Кельвина, изобретенная шотландским ученым Уильямом Томсоном (лордом Кельвином) в 1867 г., представляет собой разновидность электростатического генератора. Кельвин назвал это устройство своим капельным конденсатором. Аппарат по-разному называют: гидроэлектрическим генератором Кельвина, электростатическим генератором Кельвина или грозой лорда Кельвина. Устройство использует падающую воду для создания разницы напряжений за счет электростатической индукции, возникающей между соединенными противоположно заряженными системами. В конечном итоге это приводит к разряду электрической дуги в виде искры.

Цель исследования – выбор наиболее оптимальной установки капельницы Кельвина, ее изготовление и использование для демонстрации принципов электростатики.

В обычных условиях тела содержат одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов, т. е. они не заряжены, или электрически нейтральны.

Согласно электронной теории, различные электрические свойства тел объясняются присутствием в них электронов и их движением, а явления заряжения и разряжения тел сводятся к перераспределению в них электронов без изменения их общего числа. А это значит, что в любой замкнутой (электрически изолированной) системе алгебраическая сумма электрических зарядов остается постоянной при любых взаимодействиях внутри нее.

Явление электризации через влияние в проводниках с точки зрения электронной теории легко объясняется существованием в них свободных электронов. При поднесении к проводнику положительного заряда электроны к нему притягиваются и накапливаются на ближайшем конце проводника. На нем оказывается некоторое число «избыточных» электронов, и эта часть проводника заряжается отрицательно. На удаленном конце образуется недостаток электронов и, следовательно, избыток положительных ионов: здесь появляется положительный заряд. Накопленные таким образом заряды называются индуцированными.

Проводники могут заряжаться также под действием света. Явление заключается в том, что под действием света электроны могут вылететь из проводника в окружающее пространство, благодаря чему проводник заряжается положительно. Это явление получило название фотоэлектрического эффекта, или фотоэффекта.

Во всех случаях мы фактически имеем дело со статическим электричеством.

Статическое электричество – совокупность явлений, связанных с возникновением, сохранением и релаксацией свободного электрического заряда на поверхности или в объеме диэлектриков или на изолированных проводниках.

Обычно носители зарядов обеих полярностей распределены в материале равномерно, поэтому он электрически нейтрален. Разрушение этого нейтрального состояния и локальное накопление частиц одной полярности приведет к тому, что тело станет заряженным. Статическое электричество определяется как явление, вызываемое электрическим зарядом в состоянии покоя. Такие заряды возникают при переносе электронов (или других видов носителей заряда) с одной части тела в другую (поляризация) или же при переходе заряда от одного тела к другому (переносимый заряд) [1].

При статической электризации во время технологических процессов, сопровождающихся трением, размельчением твердых частиц, пересыпанием сыпучих материалов, переливанием диэлектрических жидкостей (нефтепродуктов и т. п.) на изолированных от земли металлических частях оборудования, возникает относительно земли разность потенциалов (напряжение) порядка десятков киловольт.

Под разностью потенциалов между двумя точками поля понимают отношение работы, которую совершают электрические силы при перемещении электрического заряда из одной точки поля в другую, к величине этого заряда.

Капельница Кельвина представляет собой электростатический генератор, который может генерировать электричество высокого напряжения за счет капель воды.

Первоначально между двумя емкостями существует небольшая разность потенциалов, так как эти емкости изолированы друг от друга. Вытекая из верхней емкости, капля имеет электрический заряд, полярность которого определяется электростатическим полем нижнего кольца. Предположим, что правая емкость имеет небольшой отрицательный заряд (рис. 1). Тогда левое кольцо также имеет положительный заряд, потому что оно соединено с этой емкостью. Заряд на левом кольце будет притягивать положительные заряды в воде в левый поток за счет кулоновского электростатического притяжения. Когда капля отрывается от конца левого потока, она несет с собой положительный заряд. Когда положительно заряженная капля воды падает в свою емкость (левую), она придает этой емкости и прикрепленному к ней кольцу (правому) положительный заряд.

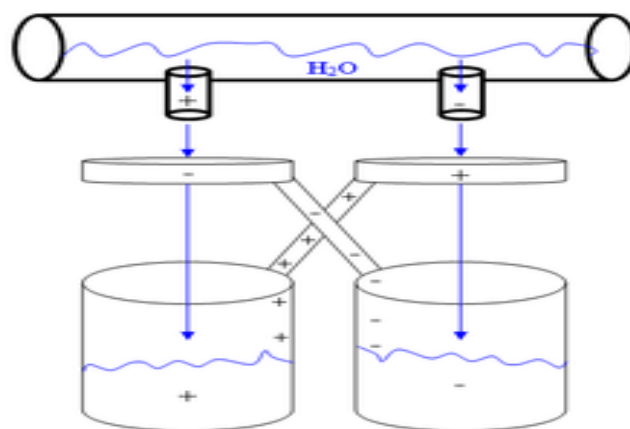


Рис. 1. Схема установки капельницы Кельвина



Тогда, если правое кольцо имеет положительный заряд, оно аналогичным образом притягивает отрицательный заряд в правый поток. Когда капли отрываются от конца этого потока, они переносят отрицательный заряд в отрицательно заряженную емкость, делая эту емкость еще более отрицательно заряженной [2].

Таким образом, отрицательные заряды притягиваются кольцом к правому потоку и стекают в отрицательно заряженную правую емкость. Положительные заряды притягиваются к левому потоку и каплют в положительно заряженную левую емкость. Этот процесс разделения зарядов, происходящий в воде, называется электростатической индукцией. Чем выше заряд, который накапливается в каждой емкости, тем выше электрический потенциал на кольцах и тем эффективнее процесс электростатической индукции. Во время индукционного процесса возникает электрический ток, который течет в виде положительных или отрицательных ионов в воде линий подачи. Как только начинается процесс разделения зарядов, положительная обратная связь относительно быстро создает большую разность потенциалов. Напряжение вскоре достигает такой степени, что капельница разряжается, создавая искру между проводящими стержнями. Затем заново начинается процесс разделения зарядов и продолжается цикл электростатической генерации.

В усовершенствованной установке возможно преобразование статического заряда, накапливаемого капельницей в переменный электрический ток, что, в свою очередь, позволяет использовать капельницу Кельвина для практических нужд.

Экспериментальная установка состоит из резервуара в виде бутылки с водой. Вода из этого резервуара течет по резиновым трубкам, скорость потока которой может контролироваться роликовым зажимом. Каждый поток воды проходит через медные кольца перед падением в жестяные банки, в которых собирается заряд. Банки и кольца соединены проводами.

Общий вид собранной капельницы Кельвина показан на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Вид и работа капельницы Кельвина

В результате исследования была собрана действующая модель Капельницы Кельвина и установлено, что на вырабатываемую ею разность потенциалов влияют: место разрыва струи на капли, качество обработки поверхностей, диаметр верхних банок, расстояние между нижними и верхними банками, время работы установки.

Таким образом, капельницу Кельвина можно изготовить из доступных материалов. Накопление заряда происходит не очень быстро, после разряда через 1–2 мин заряд восстанавливается.

#### Литература

1. Жилко, В. В. Физика : учеб. пособие для 11-го кл. учреждений, обеспечивающих получение общ. среднего образования, с русским яз. обучения / В. В. Жилко, А. В. Лавриненко, Л. Г. Маркович. – 2-е изд. – Минск : Народная асвета, 2004. – 382 с.
2. Капельница Кельвина. – Режим доступа: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/kelvin-water-dropper>.

## ИЗУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

А. Г. Речиц

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

Научный руководитель И. И. Злотников

В настоящее время вопросам использования возобновляемых источников энергии уделяется все больше внимания. Среди таких источников солнечная энергия по своим масштабам, экологической чистоте и повсеместной распространенности является наиболее перспективной. С экономической точки зрения именно солнечная энергетика выглядит привлекательнее всех остальных альтернативных источников энергии (энергия рек, ветра, морских приливов и другое). Несмотря на многочисленность способов преобразования солнечной энергии, на данный момент наиболее широко используется ее тепловое действие в солнечных установках различной конструкции.

Главным компонентом любой солнечной установки является солнечный коллектор, а самый распространенный вид солнечного коллектора – плоский коллектор, который представляет собой теплоизолированный контейнер, в котором находится металлическая теплопринимающая пластина (абсорбер), в которой циркулирует теплоноситель (обычно вода). Открытая сторона контейнера, которая обращена к солнцу, закрыта прозрачной пластиной (стекло, пластик и другое) и образует так называемое тепловое зеркало, пропуская солнечные лучи внутрь коллектора, но отражая обратно инфракрасное излучение с поверхности абсорбера. Поверхность абсорбера должна иметь черный цвет для максимального снижения отражения солнечных лучей. Согласно источнику [1], наиболее часто поверхность абсорбера окрашивают черными красками различных марок с добавлением сажи. Черное покрытие, кроме высокой поглощающей способности к солнечному излучению, должно обладать высокой адгезией, стойкостью к воздействию солнечного света, повышенной влажности, переменных температур, должно обеспечивать защиту металлической поверхности абсорбера от коррозии и атмосферного воздействия. Применяемые покрытия абсорбера должны обладать выраженной селективностью: иметь высокий коэффициент поглощения в коротковолновом диапазоне (длина волн менее 2 мкм) и низкую излучательную способность в инфракрасной области (длина волн более 2 мкм) [1], [2].

Целью исследования является изучение свойств некоторых перспективных светопоглощающих покрытий для солнечных коллекторов.

Для изготовления экспериментальных образцов брали алюминиевую фольгу марки АД1 толщиной 0,1 мм на которую наносили следующие черные покрытия:

1. Лак БТ с добавлением сажи. Такие покрытия отличаются простотой нанесения, дешевизной и широко применяются для окраски абсорберов солнечных коллекторов для нагрева воды [1]. Кроме того, такие покрытия хорошо защищают металлическую поверхность абсорбера от воздействия неблагоприятных атмосферных факторов.

2. Лакокрасочное покрытие для солнечного коллектора, разработанное на кафедре «Физика и электротехника» на основе нефтяного битума с добавлением оксида меди [3]. Данное покрытие обладает более высокими показателями преобразования солнечной энергии в тепловую по сравнению с предыдущим.

3. Оксидно-керамическое черное светопоглощающее покрытие, полученное методом микроплазменного анодирования алюминиевой фольги по технологии разработанной в предыдущем исследовании и описанной в работе [4].

Для оценки эффективности светопоглощающих покрытий определяли показатель селективности – отношение поглощательной способности черной поверхности к ее излучательной способности. Для проведения экспериментов была изготовлена лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 1. В качестве источника световой энергии использовали медицинский рефлектор Минина 1, снабженный лампой накаливания 2 мощностью 75 Вт. Спектр ламп накаливания с вольфрамовой нитью наиболее близок к спектру солнечного излучения. Свет от рефлектора падал на белый светоотражающий экран 3 с квадратным отверстием размером  $30 \times 30$  мм, за которым устанавливали исследуемый образец с черным покрытием 4. Под действием излучения рефлектора образец нагревался, а температуру на его обратной стороне измеряли электрическим термометром 6. Для исключения тепловых потерь обратную сторону образца закрывали теплоизоляцией 5.

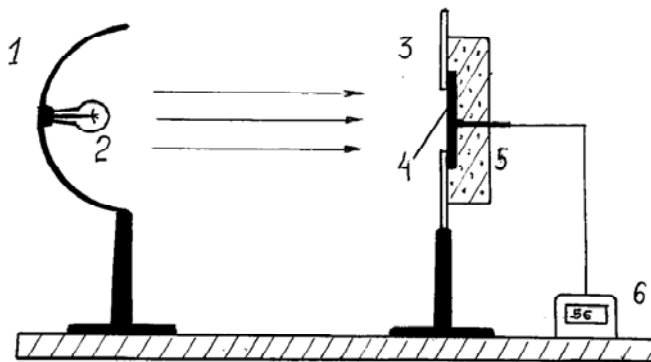


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
1 – медицинский рефлектор Минина; 2 – лампа накаливания;  
3 – светоотражающий экран; 4 – исследуемый образец;  
5 – теплоизоляция; 6 – электрический термометр

Возможность проведения таких опытов основывается на следующих теоретических предпосылках.

Если обозначить мощность излучения рефлектора, падающего на единицу поверхности исследуемого образца во всем диапазоне длин волн через  $P$ , а поглощательную способность черной поверхности образца через  $\alpha_c$ , то интенсивность поглощенного излучения будет равна  $P_{\text{пол}} = \alpha_c P$ . Под действием излучения рефлектора образец будет нагреваться до тех пор, пока не достигнет равновесной

температуры  $T$ , при которой мощность поглощенного и испускаемого с единицы поверхности излучения  $P_{\text{исп}}$  равны. По закону Стефана-Больцмана  $P_{\text{исп}} = \varepsilon\sigma T^4$ , где  $\varepsilon$  – излучательная способность образца в инфракрасном диапазоне. Следовательно,  $\alpha_c P = \varepsilon\sigma T^4$ . Тогда отношение  $\alpha_c / \varepsilon = \sigma T^4 / P$  будет характеризовать селективность покрытия. Так как мощность излучения рефлектора  $P$  является постоянной в данном эксперименте, то равновесная температура  $T$  образца является мерой степени селективности покрытий и, следовательно, их эффективности при применении в солнечном коллекторе. В приведенном выводе отражением света пренебрегали, так как все рассматриваемые образцы покрытий имеют высокий коэффициент поглощения (более 82 %). На основе литературных данных [4] мощность излучения рефлектора во всем диапазоне длин волн электромагнитного излучения, падающего на единицу поверхности исследуемого образца, установленного на расстоянии 50 см от него, принималась примерно равной  $P = 45 \text{ Вт/м}^2$ . Хотя эта оценка является приближенной, но так как в данном эксперименте все образцы испытывались при абсолютно одинаковых условиях, то полученные величины показателя селективности могут служить объективным сравнительным параметром эффективности исследуемых покрытий. Все испытания проводились при температуре окружающей среды  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коэффициент поглощения света (отношение величины поглощенной световой энергии к величине световой энергии, падающей на поверхность) полученных покрытий определяли с помощью фотометра отражения модели ФО-1. Результаты испытаний исследуемых покрытий приведены в таблице.

#### Свойства светопоглощающих покрытий

Тип покрытия	Коэффициент поглощения света, %	Равновесная температура, К	Показатель селективности
Лак БТ [1]	82–84	298	9,9
По патенту 19482 [3]	90–94	307	11,2
Оксидно-керамическое [4]	90–92	313	12,1

Как следует из полученных результатов, наилучшими характеристиками обладает черное оксидно-керамическое покрытие, хотя и остальные покрытия обладают достаточно высокими показателями селективности и могут успешно применяться в гелиоустановках по преобразованию солнечной энергии в тепло. Согласно источнику [1] наилучшие солнечные коллекторы имеют показатели селективности 12 и более и характеризуются высоким КПД преобразования солнечного излучения в тепло, не менее 60 %. Кроме высокой поглощающей способности, оксидно-керамическое покрытие, в отличие от двух остальных, обладает очень высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред и неблагоприятных атмосферных факторов (влажность, воздействие солнечного света, перепады температуры) и очень хорошо защищает металлический абсорбер коллектора от коррозии. Такие покрытия могут наноситься или непосредственно на рабочую поверхность абсорбера или на алюминиевую фольгу, которой затем покрывают нужные участки поверхности. Единственным препятствием к широкому применению таких покрытий является их сравнительно высокая стоимость, что связано с большими затратами электроэнергии при их нанесении на поверхность изделий из алюминия и его сплавов.

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

- оксидно-керамические черные светопоглощающие покрытия, полученные методом микроплазменного анодирования поверхности алюминия, обладают высоким коэффициентом поглощения солнечного света и высоким показателем селективности;
- для практического применения таких покрытий необходимо снизить энергозатраты при их нанесении, что возможно за счет выбора оптимальных токовых режимов и разработки новых составов электролитов для проведения процесса микроплазменного анодирования.

#### Литература

1. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
2. ГОСТ 28310–89. Коллекторы солнечные. Общие технические условия.
3. Лакокрасочная композиция для солнечного коллектора : пат. 19482 Респ. Беларусь / И. И. Злотников, П. А. Хило ; заявитель ГГТУ им. П. О. Сухого // Афіцыйны бюл. – 2015. – № 5.
4. Речиц, А. Г. Изучение технологии микроплазменного анодирования / А. Г. Речиц // 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. Ч. 1. – Гомель, 2021. – С. 72–75.
5. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – 6-е изд. – М. : Физматлит. – 2010. – 848 с.

## СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ В ТУРКМЕНИСТАНЕ

А. Матьякубов

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Научный руководитель К. А. Сарыев

Концентрированные солнечные станции (КСС) – это технология концентрации солнечных лучей в одной точке для получения большой температуры (до 1000 °С) [1].

Концентрированные солнечные тепловые станции (КСТС) являются одним из основных направлений развития использования солнечной энергии, но, к сожалению, являются и одним из тех видов, которые развиваются очень медленно по сравнению с фотоэлектрическими солнечными и ветряными станциями, хотя их КПД в несколько раз превышает КПД фотоэлектрических солнечных и ветряных станций. Это происходит по нескольким причинам, которые заключаются в их технологическом процессе получения тепла и в преобразовании в электрическую энергию.

Основной технологической задачей в КСС является достижение требуемой оптической точности устойчивости к воздействиям окружающей среды (сильным ветрам и запылению) при минимуме произведенных затрат.

Существует четыре основных типа КСС: солнечные башни, параболоцилиндрические концентраторы, линзы Френеля и блюдо Стерлинга, а все остальные основываются на этих типах.

Важной составляющей и, можно сказать, особенностью КСС является накопление тепла в больших объемах и температурах, что в свою очередь помогает снизить себестоимость полученной продукции. В зависимости от используемого теплоносителя это тепло может храниться или использоваться непосредственно для выработки тепла или электричества. В качестве теплоносителя используются различные жидкости, это может быть синтетическое масло или вода.

Теплоаккумуляторы на основе жидкой соли представляют собой емкости (резервуары) диаметром до 40 м и высотой 15 м. Они заполнены смесью нитрата калия

и нитрата натрия, которая становится жидкой при 250 °С и выше. Резервуары с расплавленными солями используются для поглощения тепла от солнечных коллекторов и приемников. Таким образом, накопление тепловой энергии позволяет использовать солнечное излучение 24 часа в сутки.

Сегодня резервуары для хранения жидкой соли (также называемые расплавленными солями) широко используются в коммерческих целях. Они состоят из двух резервуаров, каждый с горячей и холодной температурой. В так называемом «процессе загрузки» жидкая соль откачивается из более холодного резервуара при температуре около 290–300 °С, а затем нагревается либо непосредственно в приемнике, концентрированным солнечным излучением, либо косвенно, через тепло другого теплообменника. Затем тепло передается в горячий резервуар. В процессе разгрузки или отбора тепла жидкая соль откачивается из горячего резервуара и передает тепло прямо или косвенно в процесс генерации пара посредством теплообменника, где оно снова охлаждается, а затем передается в холодный резервуар.

Таким образом, во время процессов загрузки и разгрузки уровни заполнения двух резервуаров смещаются, как и в соответствующих резервуарах. Во время технической эксплуатации всегда необходимо следить за тем, чтобы температура соли не опускалась ниже минимальной температуры, чтобы смесь не кристаллизовалась снова. В зависимости от используемой соли возможны рабочие температуры до 565 °С [2]. Из мировой практики известно, что строительство КСС будет очень рентабельным с режимом накопления тепловой энергии (рис. 1), что свою очередь позволит снизить себестоимость 1 кВт · ч электрической энергии.

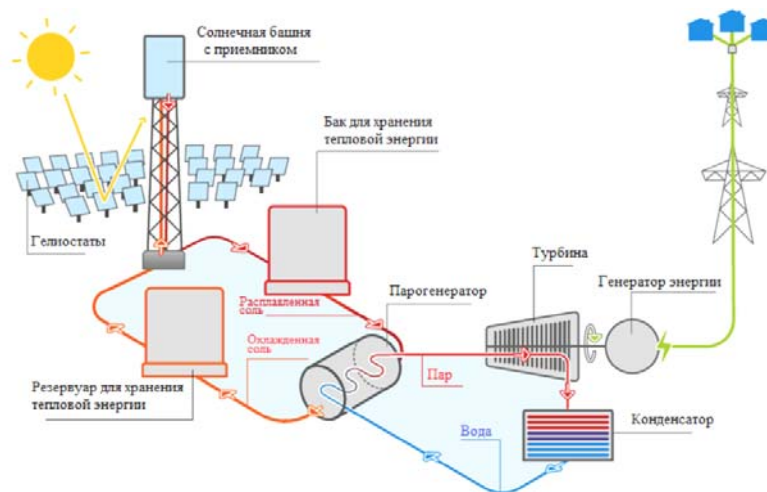


Рис. 1. Схема концентрированной солнечной тепловой электростанции

Для выработки электроэнергии в турбину подается пар, который поступает через теплообменник (парогенератор), затем запускает классический процесс паровой турбины, и вырабатывается электрическая энергия. Тепло к теплообменнику поступает либо непосредственно из солнечной станции, либо из накопительного бака.

Основным фактором производительности или же получения высокой температуры является интенсивность солнечного излучения на отражающей поверхности. В Туркменистане интенсивность падающего на горизонтальную поверхность солнечного излучения в год составляет 1800 кВт/м<sup>2</sup>, что, в свою очередь, говорит о ко-

лоссальных возможностях использования солнечной энергии в промышленном масштабе [3]. На рис. 2 представлена интенсивность падающего на горизонтальную поверхность солнечного излучения на территории Туркменистана.

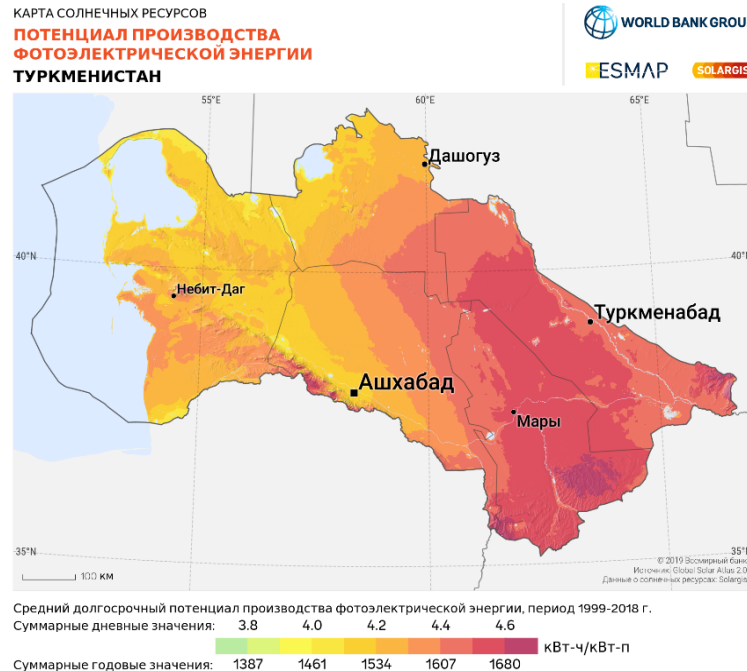


Рис. 2. Интенсивность солнечного излучения на территории Туркменистана

Как видно из рис. 2, практически вся территория имеет высокий потенциал использования солнечной энергии: 75 % имеет высокий потенциал, 11,5 % – средний и 13,5 % не имеет потенциала [4].

Сценарии развития КСС в Туркменистане можно определить по двум направлениям:

1. Строительство КСС для производства электрической и тепловой энергии с последующим хранением в тех регионах, где имеется высокий потенциал солнечной энергии и куда протягивать линию электропередачи или газопровод экономический нецелесообразно. К примеру, как видно из рис. 2, самый высокий потенциал солнечного излучения имеется в Марыйской области (в регионах Серхетабат, Кушка), для чабанов или отдельных пастбищ самая близкая подстанция находится на расстоянии 7,2 км (Кушка).

2. Строительство комбинированной КСС и газотурбинных станций осуществляется рядом с действующими газотурбинными станциями. Как известно, с повышением температуры окружающей среды эффективность газотурбинных установок падает, в результате чего возникает необходимость в их охлаждении, что, в свою очередь, приводит к дополнительным денежным затратам. В данном случае КСС будут параллельно работать с газотурбинными станциями, но можно и отключить часть этих станций и подключить CSP-тепловые станции, в результате чего можно будет покрывать все потери мощности, особенно в летнее время (без хранения тепловой энергии). Это позволит маневрировать при увеличении мощности в сети и при падении мощности в станции из-за перегрева.

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- строительство CSP-тепловых станций очень актуально для условий Туркменистана, где имеется высокий потенциал солнечного излучения;
- строительство комбинированной CSP-тепловых станций очень актуально, так как позволит снизить потери мощности, повысить надежность электроснабжения потребителей, однако требует научно-технического подхода и изучения параллельной работы станций.

#### Литература

1. Empirically observed learning rates for concentrating solar power and their responses to regime change / J. Lilliestam [et al.] // Nature Energy. – 2017. – № 2.
2. Realising the Potential of Concentrating Solar Power in Australia: Summary for Stakeholders / K. Lovegrove [et al.]. – Newcastle : Australian Solar Institute, 2012.
3. Джумаев, А. Основы энергосбережения / А. Джумаев, Х. Солтанов. – Ашхабад, 2018.
4. Джумаев, А. Научно-технический и методологический анализ ресурсов и развития солнечной энергии в Туркменистане : пособие для вузов / А. Джумаев. – Ашхабад, 2016.

### **СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ТУРКМЕНИСТАНЕ КАК ФАКТОР ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**А. Оразмаммедов, А. А. Гельдыев, П. Оразмаммедов**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

В мире все виды движений, все разнообразные формы процессов и явлений протекают благодаря существованию энергии. Энергией обладает весь материальный мир. Поэтому невозможно понять мир и протекающие в нем явления отдельно от энергии. Энергия – это всеобщая основа природных явлений, основа культуры и всей деятельности человека. В то же время под энергией понимается универсальная форма количественной меры различных видов движения материи, которые могут превращаться друг в друга.

Нам известно, что материальный мир находится в постоянном движении. Поэтому не существует материального объекта, который бы не обладал энергией. Однако среди этих материальных объектов существуют только те, в которых сосредоточена энергия, приемлемая для практического использования человеком. Эти объекты получили название энергетические ресурсы. Из многообразия энергетических ресурсов, встречающихся в природе, привлекают особое внимание те, которые используются в больших количествах для практических нужд. К ним относятся традиционные (уголь, газ и т. д.) и возобновляемые (энергия рек, морей и океанов, солнца и ветров).

Наряду с богатством туркменских недр – огромными запасами газа, наличием нефти и других полезных ископаемых – Туркменистан также богат возможностями использования неистощаемых источников энергии – солнечной и ветровой. И хотя подземные газовые запасы Каракумов позволяют не волноваться о нехватке энергоресурсов в обозримом будущем, наша страна встала на путь декарбонизации, т. е. перехода к низкоуглеродной экономике, что предполагает апробацию и внедрение в национальную энергетическую систему элементов возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Из вышеперечисленных возобновляемых энергетических ресурсов Туркменистан обладает определенными запасами энергии солнца, ветра и рек. Поэтому далее речь пойдет об этих видах возобновляемых энергетических ресурсов. Возрастающий интерес к возобновляемым ресурсам объясняется глобальным потеплением на пла-



нете, что является результатом действия парникового эффекта от промышленной деятельности людей: эмиссия диоксида углерода приводит к глобальному потеплению, а диоксид серы (SO<sub>2</sub>) является причиной кислотных дождей. Выбросы CO<sub>2</sub> в странах СНГ достигают 16 т в год на одного жителя; в Европе – 12 т в год. Киотский протокол (декабрь 1997 г., конференция ООН по изменению (климата), в котором впервые были прописаны квоты на выброс парниковых газов для каждого государства, был ратифицирован 191 государством, однако запланированного положительного эффекта получено не было. Если продолжать загрязнять атмосферу Земли прежними темпами, это может привести к резкому изменению климата, к таянию ледников и, как следствие, к повышению уровня океана, разрушению среды обитания животных и угрозе самого существования человечества. В этой ситуации необходимо использование возобновляемых источников энергии, так как они не нарушают естественного баланса энергии, получаемого нашей планетой.

Принятие Национальной стратегии развития Возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 г. и вступление в Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (ИРЕНА) свидетельствуют о приверженности нашей страны обязательствам по развитию возобновляемой энергии и повышению энергоэффективности в соответствии с целями устойчивого развития. Очередным шагом на этом пути стало принятие Национальной стратегии по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 г., которая была утверждена Постановлением Президента Туркменистана в декабре 2020 г. Цель Национальной стратегии – развитие и эффективное использование возобновляемых источников энергии, что обусловит сокращение количества выбросов парниковых газов в окружающую среду. Цель также направлена на совершенствование структуры электроэнергетической отрасли и диверсификацию энергетических ресурсов Туркменистана, обеспечение энергетической безопасности Туркменистана и создание возможности увеличения экспорта энергоносителей, увеличения экономического потенциала страны. Социально значимыми целями Стратегии являются повышение уровня жизни населения и развитие промышленного потенциала, обеспечение удаленных регионов недорогостоящей и чистой энергией, охрана окружающей среды и достижение устойчивого развития экономики.

Реализация Государственной программы Туркменистана по энергосбережению на 2018–2024 гг. предусматривает повышение роли альтернативных источников энергии. Туркменистан благодаря своим климатическим условиям обладает колоссальным запасом альтернативных, возобновляемых источников энергии, и прежде всего, энергией солнца.

Солнечная энергия является практически неисчерпаемым видом энергии, которым располагает человечество. Энергия солнца, поступающая на поверхность Земли за год, эквивалентна  $1,2 \cdot 10^{14}$  т у. т. [3]. Туркменистан расположен в таком регионе земного шара, куда с достаточным обилием выпадает солнечная радиация. Расчетом установлено, что среднесуточная плотность солнечной радиации на территории Туркменистана равняется  $23760$  кДж/м<sup>2</sup>. Тогда за год на каждый м<sup>2</sup> поверхности поступает  $8,672 \cdot 10^6$  энергии, а на всю территорию Туркмении за год поступающая солнечная энергия будет равна  $4,233 \cdot 10^{15}$  кДж. Многолетние данные погодных условий нашей страны показывают, что более 300 из 365 дней в году являются солнечными, а продолжительность дневного цикла составляет 12–14 ч. Это доказывает, что потенциал солнечной энергетики в нашей стране огромен, практически неисчерпаем.

Принятый Закон Туркменистана от 13 марта 2021 г. «О возобновляемых источниках энергии» определяет правовую, организационную, экономическую и социальную основы деятельности в области возобновляемых источников энергии и регулирует возникающие отношения, связанные с использованием возобновляемых источников энергии.

Производство электроэнергии с помощью возобновляемых источников энергии считается экологически чистым и экономически обусловленным для южных солнечных территорий, альтернативой и дополнением к традиционному производству электроэнергии. В этом контексте приоритетным аспектом является внедрение передовых технологий по развитию альтернативной и, в частности, низкоуглеродной энергетики, практическому задействованию ее источников и потенциала, что имеет огромное значение в свете актуальных проблем современности, связанных с экологией и климатическими изменениями.

И здесь открываются широкие перспективы по использованию водорода – топлива будущего, что обусловлено его высокими эксплуатационными и, что особенно важно, экологическими характеристиками. В недалеком будущем автономные солнечные и ветряные электростанции поддержат вместе с традиционным электроснабжением бытовые и производственные нужды населенных пунктов, удаленных от промышленных центров.

Солнечные электростанции и солнечные коллекторы используют энергию светового потока, которая естественным путем попадает на фотоэлементы и преобразовывается в электрическую или тепловую энергию для нагревания жидкости. Главный плюс – экологичность и полное отсутствие вредных выбросов в атмосферу. Таким образом, увеличение использования солнечной энергии благоприятно скажется на экологической обстановке, что станет одним из ключевых шагов по выполнению подписанного Туркменистаном в сентябре 2016 г. Парижского соглашения по климату.

Также энергия ветра на земном шаре оценивается в  $(175-219) \cdot 10^{12}$  кВт·ч в год, при этом развиваемая им мощность достигает  $(20-25) \cdot 10^9$  кВт. Это примерно в 2,5 раза больше суммарного расхода энергии на планете. Однако из этой мощности реально можно использовать только 5 %, т. е.  $(1-1,25) \cdot 10^9$  кВт [3].

В результате многолетнего наблюдения гидрометеорологической службой в 70 % районов СНГ была зарегистрирована скорость ветра 6 м/с и было определено в среднем около 40 % территории зоной скоростью ветра 3,5–10 м/с. На открытых равнинных местностях Туркменистана среднегодовая скорость ветра составляет 2–4,2 м/с, а максимальные среднемесячные скорости – 5–10 м/с – наблюдаются на побережье Каспийского моря и в горах Копетдага. Это позволяет районировать и создавать ветроэнергетические установки и ежегодно экономить традиционное органическое топливо за счет интенсивного использования энергии ветра. В практике доказано, что работающие ветроэнергетические установки с диаметром лопастного агрегата 6–24 м при скорости ветра 6 м/с могут ежегодно давать экономию 2,8–54 т у. т. Открываются широкие возможности использования ветровой установки небольшой мощности для производства электроэнергии и подъема воды из колодцев в пустынных отгонных пастбищах, где скорость ветра достигает 4 м/с и выше.

Подобные возможности будут сопутствовать реализации грандиозного проекта по инициативе главы государства – возведения социально-экономического комплекса зданий и сооружений вблизи искусственного водоема в Каракумах – Туркменского озера Алтын асыр.

Сейчас рассматриваются пилотные проекты по внедрению в стране использования ВИЭ. В частности, солнечная электростанция мощностью 250 кВт в Балканском велаяте, три возможных проекта электростанций (две солнечные мощностями 1,2 МВт и 2,2 МВт и одна солнечная, совмещенная с ветровой, мощностью 10 МВт) на озере Алтын Асыр.

Безусловно, для надежного и бесперебойного обеспечения электроэнергией возводимых современных сел, новых производств перспективными являются проекты производства электроэнергии, связанные с альтернативными источниками – использованием энергии солнца и ветра. На это было направлено и принятие Закона Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии».

Резюмируя вышесказанное, можно констатировать, что энергетическая политика Туркменистана определяет приоритеты развития национальной электроэнергетической отрасли на ближайшие десятилетия и конкретные шаги по интеграции страны в мировую энергосистему.

#### Литература

1. Бердымухамедов, Г. Туркменистан на пути достижения целей устойчивого развития / Г. Бердымухамедов. – Ашхабад : ТГИС, 2018.
2. Программа Президента Туркменистана по социально-экономическому развитию страны на 2019–2025 годы. – Ашхабад : ТГИС, 2019.
3. Козлов, В. Б. Энергетика и природа / В. Б. Козлов. – М. : Мысль, 1982.

## ФИЛОСОФИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

**М. К. Акмырадова, Г. С. Хоммадова, С. Аннаев**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

В эпоху процветания Туркменистан вносит свой вклад в единый механизм усилий, принимаемых мировым сообществом по защите окружающей среды и соблюдению принципов устойчивого развития. Исходя из этих принципов, строится экологическая политика государства, совершенствуется правовая база охраны природы. Значение международного сотрудничества в решении глобальных экологических проблем неоднократно подчеркивается Президентом Туркменистана на сессиях Генеральной Ассамблеи ООН. Совместно с крупнейшими международными организациями – Программой развития ООН, Программой ООН по окружающей среде, Глобальным экологическим фондом – страна реализует масштабные проекты в области охраны среды и рационального природопользования.

В этой статье целями являются: раскрытие философии взаимодействия природы и человека; использование возобновляемых источников энергии; изучение вопросов энергоэффективности и энергосбережения, а также изучение нормативно-правовой основы по эффективному использованию возобновляемых источников энергии.

Как известно, обеспечение человечества энергетическими и сырьевыми ресурсами на сегодня стало глобальной проблемой, которая, в свою очередь, повлекла за собой ряд других глобальных проблем: экологическую проблему, изменение климата, истощение природных ресурсов и т. д. Эти ресурсы составляют основу материального производства и по мере развития производительных сил играют более значительную роль в жизни человека. До настоящего времени глобальный экономический рост стран был основан на использовании ископаемых энергоносителей (угля, нефти и газа). С ростом мировой экономики, промышленности одновременно

росло потребление ископаемых источников энергии. Производство и потребление ископаемых источников энергии привели к истощению природного ресурса, к росту выброса углекислого газа в атмосферу, к изменению климата и увеличению темпов глобального потепления. И поэтому решение этих проблем приобрело первостепенный характер. Наряду с научными подходами, философский подход и взгляд на эти процессы и явления, на всю ситуацию в целом стал необходимым условием в решении глобальных задач и проблем, так как философия оказывает значительное влияние на процесс выработки практических решений, расширяет пределы человеческих возможностей. Философский подход предполагает рассмотрение глобальных проблем в их единстве, целостности и взаимосвязи с точки зрения их общественной значимости и социальной обусловленности.

Если рассматривать философию взаимодействия природы и человека, то можно увидеть, как она изменялась со сменой каждой исторической эпохи. И с развитием преобразующей деятельности человека увеличились масштабы его вмешательства в естественные связи в био-, атмо-, гидро- и литосферах, в околоземное пространство, результаты которого он не всегда мог учесть, что в свою очередь привело к негативным последствиям глобального характера. На протяжении всей истории люди неуклонно воздействовали на окружающую среду. Например, первобытный человек довольствовался тем, что давала ему природа. Тогда человек находился в полной зависимости от природы и был полностью как бы растворен в ней. Однако с появлением скотоводства и земледелия влияние человека на природу начало возрастать. Это обусловлено тем, что возросла нагрузка на пастбища, стали активно выжигаться леса, освобождаться места под пашни. Нагрузка на природу возросла, когда несколько позже стали строиться каналы и оросительные системы, стали целенаправленно добываться полезные ископаемые.

В Новое время природа становится объектом познания, т. е. считалось, что природные процессы могут и потому должны быть подчинены абсолютному господству человеческого разума. Однако для этого, прежде всего, необходимо было их познать, подвергнуть испытаниям. В XVII в. английский философ Ф. Бэкон, отмечая, что человек должен господствовать над природой, покоряясь ей, писал: «Пусть никто не надеется, что он сможет управлять природой или изменять ее, пока должным образом ее не узнает». Также и Ф. Энгельс в «Диалектике природы» предупреждал, что не стоит слишком обольщаться человеческими победами над природой. В XX в. по мере развития общества, производства и научно-технического прогресса крепла уверенность человека в своем неограниченном превосходстве над природой. Однако такое заблуждение привело к таким экологическим кризисам, как загрязнение окружающей среды, быстрое истощение природных, сырьевых и энергетических ресурсов. В настоящее время ведутся огромные работы в области разработки, внедрения и применения энергоэффективных технологий и развития энергетики, по переходу на «чистую» энергию (солнца, ветра, воды) и улучшению экологического воспитания. Поэтому формирование экологического сознания в наше время – это объективная потребность человечества находить гармонию с природой по рациональному использованию природных ресурсов, распространить необходимые знания и технологии в этой области.

В настоящее время во всем мире внедрение и использование возобновляемых источников энергии является глобальной задачей. И ее решение позволит найти более эффективные способы решения задач по вопросам обеспечения всеобщей экологической и энергетической безопасности, охраны окружающей среды.

Что же является возобновляемыми источниками энергии и почему они на сегодня так важны для нашего мира?

К возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) обычно относят солнечную, ветровую и геотермальную энергию, энергию морских приливов и волн, биомассы (растения, различные виды органических отходов), а также низкопотенциальную энергию окружающей среды и малые ГЭС мощностью до 30 МВт, т. е. все источники, энергия которых считается неисчерпаемой. Так как ресурсы ВИЭ, как следует из названия, постоянно пополняются естественным путем, то считается, что они никогда не будут исчерпаны. Еще одна из особенностей этих источников энергии в том, что их использование оказывает меньшее воздействие на окружающую среду, чем обычное топливо.

В Законе Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии» от 13 марта 2021 г. возобновляемые источники энергии определяются как «источники энергии, непрерывно и неисчерпаемо возобновляемые за счет естественно протекающих природных процессов, включающих в себя энергию солнца, энергию ветра, энергию естественного движения водных потоков, энергию тепла земли и окружающей среды, антропогенные источники первичных энергоресурсов (биомасса, биогаз и иное топливо, получаемое из органических отходов), а также иные источники энергии, не относящиеся к невозобновляемым».

Из Закона следует: «использование возобновляемых источников энергии – совокупность действий, направленных на преобразование, накопление, распределение и потребление возобновляемой энергии, а также материально-техническое обеспечение этих действий» [2]. Внедрение в производство возобновляемых источников энергии является одной из всеобщих задач и связано с такими вопросами общечеловеческого значения, как изменение климата и его влияние на экономический рост государств, сохранение биологического разнообразия Каспия, борьба с опустыниванием, охрана и использование трансграничных водотоков и международных озер.

В настоящее время Туркменистан активно поддерживает международные усилия по обеспечению экологического благополучия и достижения повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г., совершенствует нормативно-правовую составляющую национального законодательства.

Целью законодательства является развитие и использование ВИЭ, усовершенствование энергетической системы, диверсификация энергоресурсов, обеспечение энергетической безопасности Туркменистана, охраны окружающей среды, рациональное использование природных ресурсов и достижение устойчивого развития экономики.

В Туркменистане была разработана «Государственная программа по энергосбережению на 2018–2024 годы» (21 февраля 2018 г.), а также совместно с ПРООН, ОБСЕ, Международным агентством по возобновляемым источникам энергии разработана «Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 года» (4 декабря 2020 г.). В связи с этим возрастает роль возобновляемых источников энергии, так как географическое расположение и климат Туркменистана позволяют внедрять ВИЭ. Главной целью этой программы является развитие и эффективное использование возобновляемых источников энергии, что обусловит сокращение количества выбросов парниковых газов в окружающую среду. Она также направлена на выполнение обязательств страны по международным конвенциям и соглашениям в области охраны окружающей среды. Как известно, на заседаниях Генассамблеи ООН и других масштабных форумах высокого уровня по устойчивому развитию Туркменистан выдвинул инициативы по охране окружающей среды, по рациональному использованию водно-энергетических ресурсов, снижению рисков природных катаклизмов. Примером тому служит выдвинутое Туркмениста-

ном на юбилейной 75-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН, состоявшейся 23 сентября 2020 г., предложение по созданию Специальной программы ООН для бассейна Аральского моря.

Одним из разработанных законов по обеспечению защиты окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов является принятый 2021 г. Закон Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии». Закон определяет правовую, организационную, экономическую, социальную основы, механизмы регулирования отношений государства, производителей, поставщиков и потребителей возобновляемых источников энергии. Принятый Закон даст динамичное развитие устойчивой экономики, обеспечит энергетическую безопасность и снизит антропогенную нагрузку на окружающую среду страны.

Из вышесказанного следует вывод, что от ископаемых источников энергии необходимо перейти к возобновляемым источникам энергии, т. е. к преобразованию в энергию солнечного света, воды, ветра. Это приведет к росту эффективности, прежде всего, в промышленности, быстрому росту и распространению возобновляемых источников энергии, к рациональному использованию природных ресурсов.

#### Литература

1. Закон Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии» // Ведомости Меджлиса Туркменистана. – 2021 г. – № 1. – Ст. 12.
2. Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 года (от 4 декабря 2020 года).
3. Бэкон, Ф. Сочинения / Ф. Бэкон. – М., 1978. – С. 85.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ В ОЦЕНКЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**

**Н. А. Алланазаров, В. Б. Сарыев**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Солнечное излучение на Земле имеет ряд различных свойств. Таким образом, солнечное излучение является источником практически возобновляемой энергии на Земле, имея преимущества в несколько раз перед другими видами доступных источников энергии, являясь экологически чистым, безотходным, неиссякаемым и энерго-сберегающим. Длительная эксплуатация солнечных энергетических установок позволяет производить экологически чистую энергию.

Цель исследования – создание цифровой технологии, обеспечивающей оценку возможностей системы возобновляемой солнечной энергетики в Туркменистане и применение ее к различным проблемам системы. Внедрение цифровых систем в этом направлении будет способствовать эффективному и экономичному использованию возобновляемых ресурсов солнечной энергии в Туркменистане, укреплению энерго-снабжения, достижению эффективности производства, обеспечению защиты окружающей среды. В результате необходимо выбрать цифровую систему, которая позволит спроектировать цифровую систему для возобновляемой солнечной энергии с использованием оценок.

Возобновляемая энергетика отличается экологичностью и простотой составляющих. В этой сфере важную роль играют вопросы, связанные с возможностью электроснабжения регионов и способами их использования [3]. В первую очередь для решения этой задачи необходимо создать обширный набор данных. Эти наборы данных должны содержать информацию, относящуюся к природе и климату соответствующего региона. Кроме того, необходимо использовать инструменты, позво-

ляющие решать задачи по сбору, освоению, отображению этих наборов данных. Они обеспечивают возможность проводить стабильные оценки и вычислительный анализ посредством многостороннего анализа.

Таким образом, результаты делают доступными комплексные показатели различных источников энергии. Это связано с тем, что удобно использовать совместимые солнечные электростанции в определенных точках или строить несколько объектов солнечной энергетики. Возникающие вопросы подчеркивают важность интеграции цифровых технологий в системы возобновляемых источников энергии. В связи с этими вопросами современные цифровые технологии открыли путь к использованию их возможностей, которые относятся к числу наиболее распространенных.

Цифровые технологии позволяют решать проблемы, возникающие при реализации проектов в этой системе. Такие технологии позволяют анализировать, хранить, усваивать и извлекать системную информацию по мере необходимости, оценивая возможность и эффективность системы возобновляемой солнечной энергетики в электроснабжении регионов. Эта технология позволяет автоматизировать действия, проводимые над набором цифровых данных. На самом деле для строительства объектов возобновляемой солнечной энергетики необходимо оценить и проанализировать различную информацию, связанную с системой цифровых технологий, оценить ожидаемый результат, выбрать наиболее выгодные условия при выборе площадки. Эта система является многогранной и включает в себя создание и обработку цифровых систем, выполнение различных измерений и расчетов, методы подготовки графической документации в цифровом и печатном виде, а также инструменты для работы с цифровыми наборами данных.

Цифровая система предлагает более новые способы цифровизации объектов, преодолевая основные недостатки простых систем (их неподвижность и ограниченность емкости), таких как носители данных. Эта технология позволяет запечатлеть интересующие объекты и их множество (на экране или на бумаге) в нужный момент. Для системы возобновляемой солнечной энергетики цифровая система солнечной энергии имеет большое значение, особенно для оценки уровня солнечной энергии в Туркменистане.

В научной работе для получения точного, быстрого и надежного значения месячного и годового оптимального угла, значения интенсивности солнечного излучения, падающего на поверхность солнечных энергетических установок, установленных в заданной точке ресурсов солнечной энергии в горизонтальной плоскости, под оптимальным углом относительно горизонтальной плоскости, было разработано программное обеспечение под названием «Цифровая система разработки солнечного кадастра». С помощью разработанного программного обеспечения были произведены расчеты по регионам страны.

Как известно, при использовании ресурсов солнечной энергии смещение солнечных установок под оптимальный месячный угол с учетом угла попадания на плоскость в определенной точке по месяцам приводит к увеличению производительности.

В научной работе также были определены мощность фотоэлектрической солнечной станции и количество вырабатываемой электроэнергии, исходя из суточного потребления электроэнергии на условное автономное жилище на территории соответствующих районов Туркменистана (табл. 1). Технические характеристики используемой солнечной панели поясняются на примере солнечной панели Q.ANTUMDUO580W с номинальной мощностью 580 Вт (табл. 2).

Таблица 1

**Мощность станции и количество вырабатываемой электроэнергии  
на территории соответствующих районов Туркменистана**

Районы	Оптимальный угол наклона, в градусах	Необходимое количество солнечных панелей	Количество электроэнергии, вырабатываемой в год ФСС, кВт · ч	Полная мощность ФСС, кВт	Снижение выбросов CO <sub>2</sub> , т
Гарабогаз	41,5	9	8270,21	5,22	3,3
Эсенгулы	37,99	7	6841,31	4,06	2,8
Сердар	38,94	6	8270,21	3,48	3,3
Туркменбаши	40	9	9904,83	5,22	4,0
Бахарлы	38,4	7	7533,23	4,06	3,0
Сарахс	36,52	7	8270,21	4,06	3,3
Серхетабат	35,19	6	8901,03	3,48	3,6
Тагтабазар	35,91	6	7947,61	3,48	3,2
Койтендаг	37,55	7	7528,84	4,06	3,0
Бирата	41,07	7	9658,18	4,06	3,9
Конеургенч	42,33	8	9419,99	4,64	3,8
Гороглы	41,61	7	9179,67	4,06	3,7

Таблица 2

**Технические характеристики фотоэлектрической солнечной панели  
мощностью 580 Вт (Q.ANTUMDUO 580W)**

Модель солнечной панели	Q.ANTUMDUO580W
Максимальная мощность	580 Вт
Максимальное напряжение на выходе	44,9 В
Максимальная сила ток на выходе	12,92 А
КПД	21,2 %
Срок службы	25 лет
Размеры панели	2115 · 1052 · 35 мм
Вес	24,5 кг
Рабочая температура	-40 °С; +85 °С
Условия проверки	1000 Вт/м <sup>2</sup> , 25 °С

В результате было разработано программное обеспечение под названием «Цифровая система разработки солнечного кадастра». Программное обеспечение официально зарегистрировано Государственной службой по интеллектуальной собственности Министерства финансов и экономики Туркменистана, и был выдан сертификат № 208. Информация, полученная на основе исследований, может быть использована при разработке проектов установки солнечных панелей на территории Туркменистана и при разработке проектов использования солнечных установок.



В ходе исследования были получены следующие результаты:

– с помощью программного обеспечения оценены ресурсы солнечной энергии Туркменистана;

– для территории соответствующих районов Туркменистана определены оптимальные углы солнечных панелей по месяцам и годовое крепление относительно горизонтальной плоскости, а также величины интенсивности солнечных излучений, падающих на установки солнечной энергетики под этими углами наклона;

– проведены расчеты фотоэлектрической солнечной электростанции для автономного жилья для территории некоторых районов областей Туркменистана.

#### Литература

1. Программа перехода на цифровую систему в Туркменистане на 2020–2025 годы. – Ашхабад, 2020.
2. Национальная стратегия развития возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 года. – Ашхабад, 2020.
3. Марти, И. Применение статистического метода для сравнения различных наборов сеточных данных: влияние масштаба и пространственного разрешения сетки на модель WASP. Энергия ветра для следующего тысячелетия / И. Марти, М. Марканте, Ж. Домингес, 2009.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАШИНОГО АППАРАТА ПО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

М. Е. Кинаятов

*Рудненский индустриальный институт, Республика Казахстан*

Научный руководитель А. И. Барулин

Исследование посвящено анализу надежности электромашиного аппарата по теплотехническим характеристикам. Эксперимент проводился на лабораторном стенде «Трехфазный синхронный генератор» и с помощью тепловизора Flir E60.

Эксперимент проводился с целью оценки степени эксплуатационной надежности электромашиного аппарата по теплотехническим параметрам.

Блок управления лабораторного стенда «Трехфазный синхронный генератор» представлен на рис. 1.

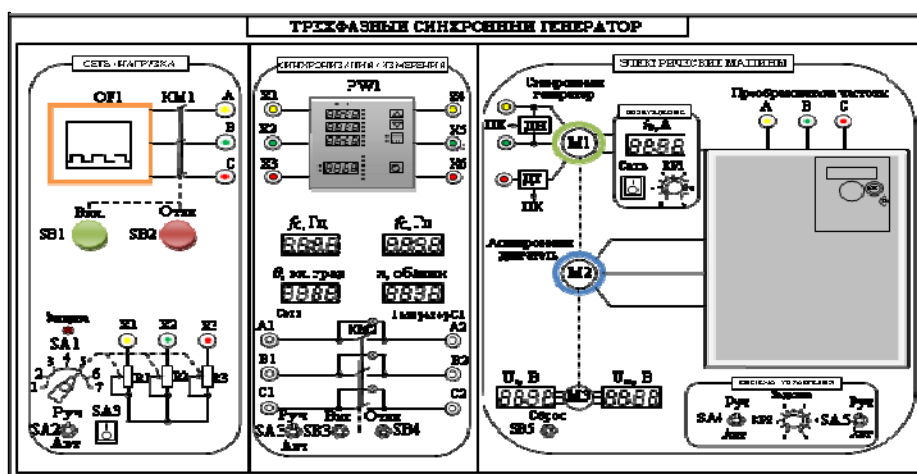


Рис. 1. Лабораторный стенд «Трехфазный синхронный генератор»

Он необходим для контроля и управления работой комплементарной пары: асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором М1, выполняющего роль турбины и передаваемого им вращательного момента на якорь синхронного генератора М2, вырабатывающего электрическую энергию. В состав комплекта входит несколько датчиков (датчики скорости (ДС), датчики напряжения (ДН), датчики силы тока (ДТ)) и задатчиков параметров работы, с помощью которых подключен к аппаратуре персональный компьютер, позволяющий не только получать и сохранять в своей памяти информацию о работе системы, но и управлять ею. Структурно блок управления лабораторного стенда «Трехфазный синхронный генератор» представлен тремя модулями: 1) Сеть/Нагрузка; 2) Синхронизация/Измерения; 3) Электрические машины.

Первый модуль предназначен для включения трехфазного электропитания стенда и защиты его от перенапряжения автоматическим выключателем QF1. В состав модуля входят коммутационные контакты для подключения активной нагрузки в виде переменных сопротивлений R1, R2 и R3. Уровень активной нагрузки изменяется дискретно при помощи галетного переключателя. При помощи встроенного переключателя SA2 выбирается режим работы системы ручной с места или автоматический – с персонального компьютера. Управление коммутацией активной нагрузки осуществляется выключателем SA3. Модуль оборудован автоматической тепловой защитой, о срабатывании которой оповещает сигнальная лампа «Защита».

Модуль «Синхронизация/Измерения» предназначен для синхронизации синхронного генератора с сетью и измерения параметров сети переменного тока. В выполняемой работе будет использоваться только измеритель PW1 для контроля параметров питающей трехфазной сети переменного тока.

Модуль «Электрические машины» содержит преобразователь частоты (ПЧ), на клеммы которого А, В и С подается питающее трехфазное напряжение переменного напряжения 380 В. Преобразователь частоты подключен напрямую к асинхронному электродвигателю М2, на валу которого располагается синхронный генератор М1 и импульсный датчик скорости вала системы М3.

Блок активной нагрузки содержит набор мощных сопротивлений с системой их принудительного охлаждения. Он обеспечивает адекватную электрическую нагрузку для испытания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 5,5 кВт и синхронного генератора мощностью 5 кВт.

Оценка степени эксплуатационной надежности электромашинного аппарата по теплотехническим параметрам:

- исследовать применимость средства неразрушающего контроля для решения поставленной задачи;
- определить реальный диапазон изменения значимых рабочих параметров;
- разработать методику оценки надежности электромашинного аппарата на основе анализа измеренных теплотехнических параметров;
- оценить состояние электромашинных аппаратов после проведения предельных испытаний на перегрев их электрических обмоток.

Перегретыe электроэнергетические аппараты и электрическая проводка свидетельствуют, в первую очередь, о их низкой надежности. Для их обнаружения используют тепловизоры – это приборы, чувствительные только к инфракрасному излучению.

Для получения достоверных теплотехнических параметров синхронного генератора в проводимом исследовании использовали бесконтактный тепловизор Flir E60 одноименной американской фирмы.

Планировалось проведение эксперимента на каждом виде нагрузки непрерывно в течение трех минут. В самом начале и перед переходом к каждой следующей нагрузке, выполнялась тепловизионная съемка. При переходе с «4» на «3» режим нагрузки сработала тепловая защита по перегреву блока «нагрузки» до 54 (см. таблицу).

Режим работы генератора	Температура генератора, °С		Время работы, T, мин	Градиент g, °С/мин
	Начало $t_n$	Конец $t_k$		
XX	29,7	31,0	3,00	0,433
7	31,0	31,9	3,00	0,300
6	31,9	34,7	3,00	0,933
5	34,7	37,3	3,00	0,867
4	37,3	41,5	3,00	1,400
3	31,5	35,6	1,72	2,384
2	33,6	35,5	0,57	3,333
1 КЗ	Не исследовался			

Режим работы синхронного генератора, при коротком замыкании не был изучен, так как из-за небольшого времени работы в нем синхронного генератора, до срабатывания защиты (не превышал 10 с) никаких тепловых изменений в синхронном генераторе тепловизором не отмечалось (рис. 2).

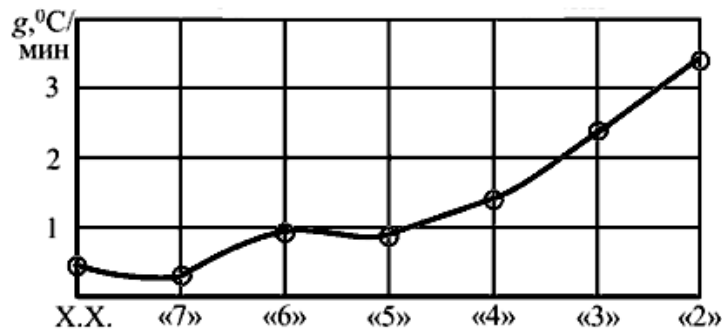


Рис. 2

На холостом ходе происходит естественный прогрев аппарата, затем в режиме нагрузки «7» снижается прирост температуры. В режиме «6» нагрев аппарата возрастает в 3 раза, потом несколько снижается в режиме «5». С режима нагрузки «4» скорость нагревания синхронного генератора начинает резко возрастать.

В результате исследования мы пришли к следующему:

- измерение тепловых характеристик электродвигателей имеет недостаток, сопряженный с искажением искомой температуры за счет воздушного зазора между ротором и корпусом электромашинного аппарата, поэтому достоверные результаты могут быть получены только в протяженных интервалах, длиной от трех минут;
- система возбуждения боится перегрузок и разогревается выше нормы, а защита ее отсутствует;
- защита при перегрузках срабатывает не совсем уверенно, иногда автомат защитного отключения электрического ввода срабатывает раньше;

- синхронный генератор работает весьма эффективно только в узких пределах при номинальном режиме его нагружения «5»;
- анализируя изменение градиента нарастания температуры синхронного генератора можно заключить, что его допустимое значение не должно превышать 1 °С/мин;
- для повышения надежности работы синхронного генератора требуется техническое обслуживание контактной группы и подшипников электромашинного аппарата и замена проводников ввода электропитания на больший диаметр.

#### Л и т е р а т у р а

1. Алиев, И. И. Электрические машины / И. И. Алиев.– Вологда : Инфра-Инженерия, 2014. – 448 с.
2. Антонов, Ю.Ф. Сверхпроводниковые топологические электрические машины / Ю. Ф. Антонов, Я. Б. Данилевич. – М. : Физматлит, 2009. – 368 с.
3. Изоляция электрических машин / ред. Ю. В. Багaley. – М. : ВНИИЭМ, 2012. – 143 с.
4. Торшин, В. В. Логическая электродинамика как новый подход к созданию физических эффектов, электрических машин и технических систем / В. В. Торшин, Ф. Ф. Пащенко, Л. Е. Круковский. – М. : Либроком, 2012. – 354 с.
5. Образовательный сайт. – Режим доступа: <https://engineeringsolutions.ru/motorcontrol.Electricmachine>.
6. Кацман, М. М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому проводу / М. М. Кацман. – М. : Академия, 2011. – 256 с.
7. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Автоматизированные системы управления и надежность в электроэнергетике» специальности «Электроэнергетика». – Рудный : РИИ, 2019. – 72 с.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТОКА ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА В СТРАНАХ СНГ**

**А. В. Макрецкий**

*Рудненский индустриальный институт, Республика Казахстан*

Научный руководитель К. С. Рыспаев

Силовые трансформаторы являются основными элементами электрических сетей и систем, которые определяют существенную часть эксплуатационной надежности и экономичности срока службы трансформатора. Отключения при авариях, дефекты и повреждения приводят к затратам, убыткам и моральному износу оборудования.

По данным эксплуатации силовых трансформаторов в Российской энергосистеме на сегодняшний день 40 % оборудования подстанций напряжением 110–220 кВ прослужили более 25 лет, 35 % – 15–25 лет, около 25 % – менее 15 лет [1]. По данным эксплуатации известно, что наибольший процент технологических нарушений трансформаторного оборудования приходится на период его эксплуатации от 20 до 30 лет.

Большая часть технологических нарушений связана с повреждениями маслонеполненных вводов, обмоток и устройств регулирования. Поломка усовершенствованных трансформаторов составляет около 0,2 %, в сравнении с выпусками трансформаторов 80-х годов – превышает 1 % [1].

Основные повреждения силовых трансформаторов в эксплуатации – это повреждения:

- обмоток;
- высоковольтных вводов;
- устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) [2].

Причинами повреждений являются:

- развитие дефектов под влиянием эксплуатационных факторов;
- ошибочные или недостаточные действия при монтаже, ремонте и эксплуатации.

Как можно увидеть на рис. 1, основная доля причин повреждения трансформаторов приходится на обслуживающий персонал, сюда же входит несвоевременный капитальный ремонт трансформаторов. Далее по частоте причин выходят ошибки персонала при эксплуатации трансформаторов, брак от завода-изготовителя и только 11 % приходится на старение трансформаторов.

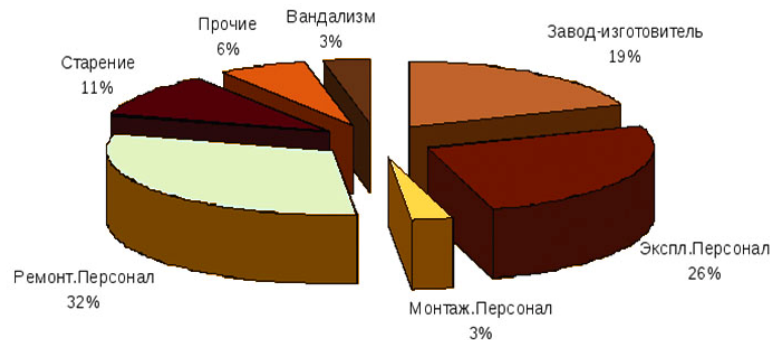


Рис. 1. Причины повреждения трансформатора

На работу трансформатора влияют не только ненормальные режимы работы энергосистемы, но и сильные воздействия извне. Основные неисправности трансформаторов в Российской энергосистеме приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1

### Основные неисправности трансформаторов

Элемент трансформатора	Возможные неисправности	Причины возникновения неисправностей
Обмотки	Витковое замыкание	Старение изоляции, постоянные перегрузки, динамические усилия при коротких замыканиях
Замыкание на корпус (пробой), междуфазное короткое замыкание	Старение изоляции, увлажнение масла или снижение его уровня, внутренние и внешние перенапряжения, деформация обмоток вследствие прохождения больших токов короткого замыкания	–
Обрыв	Отгорание выводных концов обмоток из-за низкого качества соединения или электродинамических усилий при коротком замыкании	–
Переключатель регулирования напряжения	Отсутствие контакта	Нарушение регулировки переключателя

Окончание табл. 1

Элемент трансформатора	Возможные неисправности	Причины возникновения неисправностей
Оплавление контактной поверхности	Термическое воздействие на контакты токов короткого замыкания	–
Неплотное прилегание подвижного контакта к неподвижному	Ослабление контактных соединений переключателя	–
Вводы	Электрический пробой на корпус	Трещины в изоляторах вводов, понижение уровня масла в трансформаторе
Магнитопровод	«Пожар стали»	Нарушение изоляции между листами или стяжными болтами
Бак и арматура	Протекание масла из сварных швов, фланцев и крана	Нарушение целостности сварных швов, плотности фланцевых соединений, повреждение прокладки крана в месте соединения с фланцем

В Белорусской энергосистеме самым слабым звеном являются силовые трансформаторы с высшим напряжением 35 кВ и 110–330 кВ из-за длительного срока эксплуатации 30–50 лет и низкой эффективности их диагностирования.

За последние 8 лет известны следующие аварийные ситуации:

- в июле 2017 г. взрыв ввода 220 кВ на Минской ТЭЦ-3, а в сентябре 2017 г. взрыв трансформатора напряжения 110 кВ на Минской ТЭЦ-4;
- взрыв ввода 330 кВ с RIP-изоляцией в Полоцких электрических сетях в апреле 2018 г.;
- возгорание маслонаполненного ввода 330 кВ и трансформатора на ОАО «Белорусский металлургический завод» в июне 2018 г.;
- повреждение трансформатора 110 кВ на ПС «Фестивальная–110 кВ» г. Гомеля в декабре 2019 г.

В табл. 2 представлены дефекты и их доля в общих отказах силовых трансформаторов в Белорусской энергосистеме [4].

Таблица 2

### Дефекты и доля отказов по их причине в силовых трансформаторах

Вид дефекта	Процент отказов от общего их количества, %
Электрические дефекты устройств РПН	38,7
Механические повреждения устройств РПН	5,37
Электрические частичные разряды	11,82
Выгорание шинных отводов	8,6
Дефекты термического характера	7,52

Окончание табл. 2

Вид дефекта	Процент отказов от общего их количества, %
Дефекты масляной системы охлаждения	5,38
Повреждения стержневых шпилек	4,35
Переток масла из бака устройства РПН в бак трансформатора	4,3
Обрыв и выгорание шинки заземления	3,23
Витковое замыкание в обмотках	3,22
Деформация обмотки	2,16
Образование короткозамкнутых контуров	2,15
<i>Итого</i>	100

Из табл. 2 следует, что повреждения устройств РПН составляют 44 %, локальные перегревы составляют 26 %, электрические частичные разряды составляют ~12 %.

При сравнительном анализе потока отказов трансформаторов в российской и белорусской энергосистеме, да и в целом в энергосистемах стран СНГ можно выделить основные причины отказов: ошибки при установке, монтаже, ремонте и эксплуатации трансформаторов; несвоевременный капитальный ремонт трансформатора и, как следствие, развитие дефектов под влиянием эксплуатационных факторов; моральный износ установок.

#### Литература

1. Хлыстиков, А. В. Проблемы надежности работы силовых трансформаторов / А. В. Хлыстиков, И. В. Игнатьев // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 3. – С. 117–120.
2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-neispravnosti-i-metody-diagnostirovaniya-silovyyh-transformatorov-v-usloviyah-ekspluatatsii>.
3. Режим доступа: <http://www.format-energo.ru/repair/defects/>.
4. Грунтович, Н. В. Экспертные системы управления энергоэффективностью и энергетической безопасностью / Н. В. Грунтович // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. – 2014. – № 4. – С. 16.

## ИНТЕГРАЦИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

С. Ж. Доскенова

*Рудненский индустриальный институт, Республика Казакстан*

Научный руководитель К. С. Рыспаев

Сперва давайте ответим на такой вопрос: что такое энергия? Энергией мы называем то что, без чего невозможно существовать не только человечеству, но и всему живому на земле. Вот поэтому вопросы, связанные с использованием различных источников энергии и их воздействия на среду, которая нас окружает, будут стоять перед нами всегда. Будь это гидроэлектростанция, атомная энергетика, солнечные батареи или ветрогенераторы, они вряд ли когда нибудь потеряют свою актуальность и важность.

От каждого из источников энергии, известного нам, дается возможность получать несколько видов энергии одновременно. К примеру, солнце. Солнце – источник

тепла, света и т. д. При этом солнечная батарея производит электрическую энергию, которая затем заново будет трансформироваться в свет и тепло.

Основные виды энергии делятся на две большие группы:

- возобновляемые;
- невозобновляемые.

Что такое возобновляемые источники энергии? Под ними понимается энергия из энергетических ресурсов, которые считаются возобновляемыми или неисчерпаемыми по человеческим масштабам, такие как водные потоки, солнечный свет, ветер, приливы и геотермальная теплота.

На данный момент энергетический сектор переживает переходный период и переживает значительные изменения, чтобы обеспечить всеобщий доступ к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех. Ключевым моментом является преобразование энергетических систем путем интеграции различных традиционных и возобновляемых источников энергии в широком диапазоне мощностей. Если страна будет привлекать инвестиции, то произойдет ускорение инноваций с помощью интеллектуальных сетей, эффективных и надежных технологий.

По словам министра Евразийской экономической комиссии (ЕЭК), преимущества распределенной «зеленой» энергетики – это близость к потребителю, снижение потерь в сетях, а глобально – энергетическая независимость и серьезный экономический эффект, включая возможность снижения цены за счет сокращения издержек. В частности, развитие получают такие направления альтернативной энергетики, как солнечная, ветровая и биоэнергетика.

Рассмотрев вопрос увеличения энергии, получаемой из этих возобновляемых источников, малораспространенных источников энергии, а также рассмотрев вопросы повышения надежности, мы проанализировали множество статей. Сегодня производство электроэнергии основано на невозобновляемых источниках энергии. Во многих странах доля возобновляемых источников энергии очень мала. Например, в России только 19 % производства электроэнергии приходится на возобновляемые источники. А самый масштабный показатель – 85 % – можно увидеть в Бразилии. В Евросоюзе доля электроэнергии, вырабатываемой из возобновляемых источников, за период с 2004 по 2013 гг. увеличилась с 14 до 25 %. В Германии уже в 2018 г. было произведено 38 % электроэнергии из возобновляемых источников.

В странах Центральной Азии разработаны и актуализированы целевые параметры развития возобновляемых источников энергии. Предусматривают увеличение доли производства электрической энергии с использованием энергии ветра и солнца до уровня не менее 20 % к 2025 г. И к 2030 г. до уровня не менее 25 %. Такие возобновляемые источники энергии, как солнечная и ветровая энергия, могут помочь в создании рабочих мест, в сокращении местного загрязнения воздуха. Получаемая энергия от возобновляемых источников энергии экологии не приносит никакого вреда.

Мировой опыт масштабного развития возобновляемых источников энергии указывает на необходимость применения различных мер в энергосистеме в зависимости от доли переменных возобновляемых источников энергии в годовом производстве.

Рекомендации:

– обеспечить солнечные и ветровые электростанции с системами накопления электрической энергии, которые могут поддерживать электроснабжение при сбоях в сети, обеспечивать регулирование напряжения с изменением потока реактивной мощности и регулирование частоты сети;



– развернуть строительство электростанций с использованием переменных возобновляемых источников энергии в районах с наилучшими условиями (с подходящими метеорологическими условиями, недалеко от центров нагрузки);

– диверсифицировать источники энергии. Метеорологические условия часто позволяют обеспечивать взаимное дополнение между возобновляемыми источниками энергии. Например, плохие условия для производства энергии ветра могут быть хорошими условиями для производства солнечной энергии;

– перестроить работу энергосистемы и внедрить новые средства и инструменты поддержания работы энергосистемы, включая системы накопления энергии, расширяющие возможности потребителей, переводя их из пассивных в активных участников рынка.

Чтобы понять суть, мы взяли ветрогенераторы для проведения исследований.

Согласно экспертным анализам, выполненным для Республики Казахстан, прогнозные сценарии по выработке ветровой энергии предусматривают в 2030 г. выработку порядка 2000 МВт · ч. Для сравнения, максимальная нагрузка энергосистемы Казахстана в зимний период составляет 15500 МВт. Для установки ветрогенераторов необходимо использовать информацию о скорости ветра в местах создания ветроэлектростанций. Мы использовали значения при описании среднегодовых значений энергетического потенциала Казахстана для горизонтов 10,50 и 100 м в проекте создания Атласа по энергии ветра института гидрогеологии и геоэкологии. Информация о наблюдениях на метеорологических станциях, архив проекта ООН/ГЕФ по возобновляемым источникам энергии и данные NASA были проанализированы. В ходе исследования использовались формулы:

$$\rho_0 = \frac{p}{RT_b},$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха на поверхности Земли, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – давление воздуха на поверхности Земли;  $R$  – универсальная газовая постоянная сухого воздуха, 286,8 Дж/(кг · °К);  $T_b$  – виртуальная температура, °К.

Виртуальную температуру можно получить следующим образом:

$$T_b = T \left( 1 + 0,378 \frac{E}{p} \right),$$

где  $T$  – температура воздуха на высоте, °К;  $E$  – давление насыщения водяного пара:

$$E = E_0 \cdot 10^{7_{235+t}} \cdot 45t,$$

где  $E_0$  – температура воздуха 0 °С, давление насыщения водяного пара 6,1 гПа;

$$p_h = p_0 e^{-cz},$$

где  $p_h$  – плотность воздуха на высоте кг/ м<sup>3</sup>;  $e$  – основа натурального логарифма 2,71828;  $c$  – комплексный коэффициент, равный  $1,25 \cdot 10^{-4}$ ;  $z$  – толщина слоя от поверхности до уровня, м.

При оценке потенциала энергии ветра использовалась формула

$$E_b = p_h S V^3 k,$$

где  $E_B$  – по производству энергии ветра генератор кВт/ч;  $S$  – ветер района, улучшения условий работы породоразрушающего инструмента на вращающемся генератора;  $V$  – среднегодовая скорость ветра;  $k$  – значение общего коэффициента, характеризующего расход энергии при производстве энергии и работе ветрогенератора, равно 0,35.

В настоящее время солнечные электростанции производят 697 МВт, что составляет половину производства возобновляемой энергии в Казахстане. Солнечная энергия обладает огромным потенциалом в качестве возобновляемого источника энергии из-за малонаселенных больших территорий и климатических условий, особенно на юге Казахстана, где солнце светит от 2200 до 3000 ч в год. В летние месяцы (июнь–август) в силу своего географического положения южная часть Казахстана получает прямую солнечную радиацию в течение большей части светового дня, что составляет 83–96 % от максимально возможного значения. В то время как северная часть страны получает около 2000 ч солнечного света, южные города, такие как Кызылорда и Шымкент, получают 2936 и 2892 ч солнечного света ежегодно, что достаточно для удовлетворения спроса на электроэнергию в южном Казахстане. Для сравнения, среднее количество солнечных часов во Вьетнаме составляет 2200, в Китае – 2500, в Германии, Великобритании, Норвегии и Японии – менее 1000 в год. Для снижения тарифов необходимо наладить производство средств генерации в Казахстане. Необходимо разработать ветроэнергетическую установку, которая имела бы меньшую стоимость, но при этом могла бы работать непрерывно дольше.

По состоянию на май 2020 г. в стране было 97 проектов в области возобновляемых источников энергии с общей мощностью 1260 МВт, еще 19 проектов были одобрены правительством, девять из которых должны были быть запущены к декабрю 2020 г. (Сатубалдина, 2020).

Если интегрировать ветровую энергию с солнечной энергией в Казахстане, это принесло бы большой успех. Можно заметить, что программы и политика в области возобновляемых источников энергии поддерживают краткосрочный и долгосрочный потенциал возобновляемых источников энергии в Казахстане. Однако несмотря на многочисленные законодательные акты, к сожалению, стране предстоит пройти долгий путь, чтобы догнать развитые страны.

#### Л и т е р а т у р а

1. Антонов, О. Зеленая энергетика Казахстана в 21 веке: мифы, реальность и перспективы. Материалы обзора по состоянию на 2014 г.
2. Цыба, Ю., Кузьмин, Ю. (2017). Электр энергетикасының қазіргі жай-күйі: Қазақстанның Электр энергетикасы және жаңартылатын энергия көздерін пайдалану перспективалары. Алматы энергетика және байланыс университеті, ЭОЖ.
3. Сидорович, В. Әлемдік энергетикалық революция: жаңартылатын энергия көздері біздің әлемді қалай өзгертеді / В. Сидорович. – М. : Альпина Баспасы, 2015. – 208 б.

### **ОЦЕНКА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ВЕТРОПОТЕНЦИАЛА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН НА ПРИМЕРЕ КОСТАНАЙСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Б. К. Есенбаев**

*Рудненский индустриальный институт, Республика Казахстан*

Научный руководитель К. С. Рыспаев

Солнечная инсоляция – это величина, определяющая количество облучения поверхности пучком солнечных лучей (даже отраженных или рассеянных облаками). Поверхностью может быть что угодно, в том числе и солнечная батарея, которая преоб-

разует энергию солнца в электрическую энергию. Измеряется инсоляция в  $\text{kВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ , т. е. количество энергии солнца, полученное одним квадратным метром поверхности в течение одного часа. Естественно, полученные метрики рассчитаны для идеальных условий: полное отсутствие облачности и падение солнечных лучей на поверхность под прямым углом (перпендикулярно).

При расчете систем на солнечных батареях, солнечных коллекторах и т. д. перво-степенное значение имеет фактическая инсоляция, которая может быть определена лишь на основе наблюдений. Фактическая инсоляция на тот или иной участок поверхности зависит от ее ориентации относительно юга, угла к горизонту, конфигурации застройки вокруг деревьев, температуры, но самое главное – широты местности и, как следствие, времени года. Широта местности определяет зональность и сезонность распределения солнечной радиации. На экваторе угол падения солнечных лучей на земную поверхность максимальный, а к полюсам наблюдается его постоянное уменьшение. Так как между углом падения солнечных лучей и количеством солнечной радиации существует жесткая зависимость, то от экватора к полюсам величина солнечной радиации снижается, а значит, снижается и эффективность от использования солнечных батарей и солнечных коллекторов.

Из-за наклона оси вращения Земли относительно орбиты вокруг Солнца на нашей планете существуют времена года. Зимой день короче и солнце движется ближе к горизонту. Летом день длиннее и солнце поднимается выше. И чем дальше местность расположена от экватора, тем эта зависимость сильнее. Поэтому регионам, которые удалены от экватора в сторону полюсов Земли, следует учитывать и сезонную зависимость солнечной радиации от времени года.

В табл. 1 приведены краткие усредненные данные по энергии солнечного излучения для некоторых местности Казахстана с учетом климатических условий (частоты и силы облачности) на единицу горизонтальной поверхности.

Таблица 1

**Суммарная (прямая и рассеянная) солнечная радиация на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности, МДж/м<sup>2</sup>**

Казахстан	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Алматы	176	239	354	484	632	678	729	647	497	321	187	136
Аральск	182	285	446	614	794	848	769	710	534	337	182	132
Балхаш	193	289	465	599	750	791	779	703	523	322	193	142
Джезказган	176	266	419	540	689	746	735	662	501	287	172	132
Костанай	113	201	385	482	653	691	624	523	343	209	109	75
Рудный	105	193	381	461	624	666	645	553	368	205	105	75
Семей	142	230	418	536	687	716	702	582	436	245	143	107
Уральск	113	209	394	477	653	632	657	578	398	209	100	84
Нур-Султан	134	234	408	496	643	714	670	559	398	211	126	94

В табл. 2 представлено дневное поступление суммарной  $E$  и рассеянной  $E_p$  солнечной радиации и температура наружного воздуха  $T_b$ , по месяцам для г. Костанай.

**Дневное поступление суммарной  $E$  и рассеянной  $E_p$  солнечной радиации  
и температура наружного воздуха  $T_b$ , по месяцам для г. Костанай**

Показатель	Месяц года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$E$ , кВт · ч/м <sup>2</sup>	1,89	4,33	9,29	13,41	18,65	19,83	19,19	15,14	10,06	4,87	2,23	1,35
$E_p$ , кВт · ч/м <sup>2</sup>	1,76	3,18	5,95	7,54	9,33	9,78	10,27	8,11	6,14	3,24	1,54	1,14
$T_b$ , °C	-19	-15	-3	10	19	24	25	24	15	2	-10	-20

Произведем расчет выработки солнечной электростанции на основе значений инсоляции, которые указаны в табл. 2.

Допустим, что имеем в Костаная сетевую солнечную электростанцию мощностью 5 кВт и хотим рассчитать ее выработку электрической энергии в июле (так как в табл. 2 июль самый жаркий месяц в регионе). При условии, что солнечные модули установлены на оптимальный угол, выработка энергии составит:

$$Q_c E_p T = W,$$

где  $Q_c$  – мощность солнечной электростанции, кВт;  $E_p$  – дневное поступление рассеянной солнечной радиации, кВт · ч/м<sup>2</sup>;  $T$  – число дней в одном месяце.

Тогда для июня выработка электроэнергии составит:

$$Q_c E_p T = 5 \text{ кВт} \cdot 10 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2 \cdot 30 \text{ дней} = 1467 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Но в январе эта же электростанция сгенерирует практически 11,7 % от выработки электроэнергии июня:  $Q_c E_p T = 5 \text{ кВт} \cdot 1,14 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2 \cdot 30 \text{ дней} = 171 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ , что позволяет сделать вывод о низкой эффективности работы солнечной станции в осенне-зимний период.

Ветроэнергетический потенциал определяется как полная энергия ветрового потока какой-либо местности на определенной высоте над поверхностью земли.

Энергия ветра характеризуется скоростью, являющейся случайной переменной в пространстве и времени. Поэтому энергетические характеристики ветра представляются вероятностным описанием случайного процесса изменения ветроэнергетического потенциала. Основой вероятностного подхода является дискретизация временного процесса, позволяющая считать независимыми и постоянными все определяемые параметры на интервале дискретизации. В качестве временных интервалов стационарности обычно используются час, сутки, сезон, год.

Совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра объединяется в ветроэнергетический кадастр региона. Основными характеристиками ветроэнергетического кадастра являются:

- среднегодовая скорость ветра, годовой и суточный ход ветра;
- повторяемость скоростей, типы и параметры функций распределения скоростей ветра;
- вертикальный профиль средней скорости ветра;

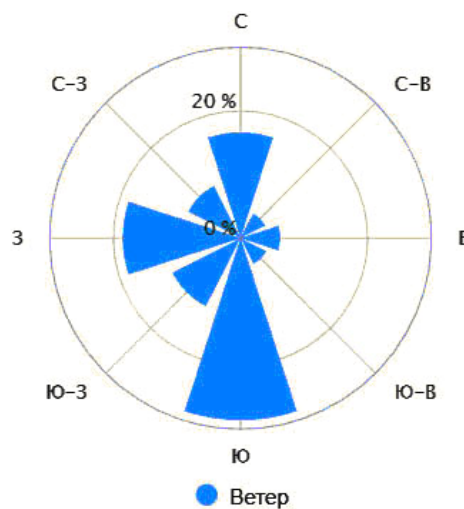
- удельная мощность и удельная энергия ветра;
- ветроэнергетические ресурсы региона.

Среднегодовая скорость ветра определяется как среднеарифметическое значение, полученное в результате измерений скорости через равные промежутки времени в течение заданного периода: сутки, месяц, год, несколько лет:

$$V_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i,$$

где  $V_i$  – скорость ветра в интервале измерения, м/с;  $n$  – количество интервалов измерений.

На рис. 1 представлена роза ветров Костанайской области.



Северный	Северо-Восточный	Восточный	Юго-Восточный	Южный	Юго-Западный	Западный	Северо-западный
16,6 %	4,3 %	6,2 %	4,5 %	28,6 %	12 %	18,5 %	9,2 %

Рис. 1. Роза ветров Костанайской области

Чтобы ветроустановка работала бесперебойно, требуется скорость ветра не менее 3 м/с. В 2018 г. «Жел электрик» установил прибор для измерения скорости ветра – анемометр. Анализ полученных данных показал, что средняя скорость в Костанайской области составила около 7 м/с.

Для численной оценки разброса скоростей ветра от среднего значения используется коэффициент вариации средних скоростей, который определяется выражением:

$$C_v = \frac{S_v}{V_{\text{cp}}},$$

где  $S_v$  – среднеквадратичное отклонение текущей скорости ветра от среднего значения;  $V_{\text{cp}}$  – средняя скорость ветра за исследуемый период времени.

#### Литература

1. Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
2. Режим доступа: <https://world-weather.ru/archive/kazakhstan/kostanay/>.

3. Режим доступа: [https://studref.com/458879/tehnika/otsenka\\_vetroenergeticheskogo\\_potentsiala](https://studref.com/458879/tehnika/otsenka_vetroenergeticheskogo_potentsiala).
4. Режим доступа: <https://www.meteonova.ru/uv-index/28952-Kostanay.htm>.
5. Режим доступа: <https://www.betaenergy.ru/insolation/>.
6. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye>.

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОВЫШАЕТ ДОСТОВЕРНОСТЬ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ

**И. К. Исмоилов, Д. А. Турсунов, Б. Т. Жабборов**

*Ферганский политехнический институт, Республика Узбекистан*

Научный руководитель Т. К. Жабборов

Научный консультант Н. В. Грунтович

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

Надежность и бесперебойность работы энергетической системы во многом зависит от работы силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Для устойчивого развития экономики в Республике Узбекистан и ее энергетики в настоящем и будущем есть необходимость эксплуатации большого количества существующих силовых трансформаторов со значительным сроком службы. Как показывает анализ данных Ферганского предприятия территориальных электросетей, у работающих трансформаторов срок службы превышает нормативный срок в 1,5–2 раза (см. таблицу) [1]. Поэтому, учитывая эти условия, необходимо совершенствовать системы сервисного обслуживания и проводить диагностирование трансформаторов с большим сроком службы.

### Силовые трансформаторы Ферганской энергосистемы Узбекистана по данным Ферганского предприятия электрических сетей, отработавших нормативный срок эксплуатации

Тип трансформаторов	Итого трансформаторов	Энергетические предприятия Узбекистана и количество трансформаторов		
		Фергана, тепловая паротурбинная электростанция	Андижан, тепловая паротурбинная электростанция	Наманган, тепловая паротурбинная электростанция
Трансформаторы напряжением 110 кВ	252	57	75	120
	100 %	22,61 %	29,76 %	47,61 %
Трансформаторы напряжением 220 кВ	267	62	80	123
	100 %	23,22 %	29,96 %	46,06 %
Парк блочных трансформаторов напряжением 110–220 кВ	14	7	3	4
	100 %	50 %	21,4 %	28,57 %
Парк силовых трансформаторов предприятий межсистемных сетей (Национальная электрическая сеть «Кыргызэнерго»)	6	1	3	2
	100 %	16,67 %	50 %	33,3 %

Как указано в публикациях [2]–[5], необходимые данные для решения задач стратегического планирования могут быть получены на основании рационального, своевременного, правильного диагностирования парка работающих трансформаторов с учетом имеющегося опыта их эксплуатации. Продление ресурса работы конкретного силового трансформатора осуществляется на основании проведения комплексного обследования. Это является, как известно, трудоемкой, наукоемкой и дорогостоящей процедурой, проведение которой связано с выполнением диагностических операций в соответствии с требованиями отраслевых документов.

Дифференциальная, комплексная техническая диагностика, в отличие от многопараметрической диагностики, предполагает проведение анализа одновременно двух и более измеренных независимых диагностических параметров. Типовым примером является выявление дефектов по хроматографическому анализу горючих газов в трансформаторном масле. Причем эта задача решается в несколько этапов. После выявления горючих газов в трансформаторном масле вычисляются отношения парных газов. Далее по численному значению трех пар горючих газов, по диагностическим таблицам определяются возможные дефекты. При совпадении дефекта по трем парным газам дефект считается истинным результатом. При совпадении дефекта по двум парным газам результат считается как неопределенность при выявлении дефекта. Но даже после такого анализа диагностических параметров не всегда можно получить достоверный результат. Специалистами международного Совета по большому электроэнергетическим системам (СИГРЭ) и российскими учеными давно доказано, что ни одна национальная методика не обеспечивает высокую достоверность при выявлении дефектов по хроматографическому анализу. Как известно, горючие газы выделяются при наличии локальных перегревов и частичных разрядов. Поэтому для повышения достоверности выявления дефектов крайне важно выполнить термографическое обследование трансформаторов и произвести регистрацию частичных разрядов.

В качестве второго примера комплексного диагностирования трансформаторов можно рассматривать вибродиагностирование бака трансформатора в диапазоне частот от 10 до 5000 Гц. На рис. 1 представлены результаты вибродиагностирования бака двух автотрансформаторов в днище бака.

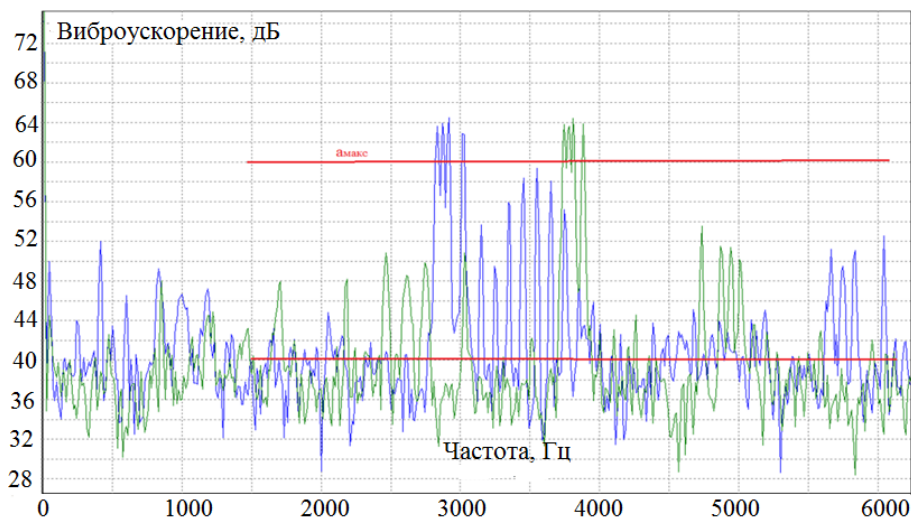


Рис. 1. Сравнение уровней вибрации в днище бака двух автотрансформаторов: зеленый – АТ № 1; синий – АТ № 2

В данном случае выявляются дефекты по уровню амплитуды вибрации на информационных частотах. В диапазоне вибрации бака трансформатора до 1000 Гц амплитуда вибрации ниже критической ( $A_{кр} = 90$  Дб). На частоте вибрации 3000 и 4000 Гц двух автотрансформаторов амплитуда вибрации предельная. Как показали дальнейшие результаты, причиной повышенной вибрации двух автотрансформаторов является некачественный внутренний монтаж. Так как в автотрансформаторах было зарегистрировано выделение водорода, соответственно, дополнительно было выполнено измерение уровня частичных разрядов. По уровню частичных разрядов и амплитуде вибрации бака была определена область дефектного монтажа внутри бака трансформатора.

В настоящее время научной группой Ферганского политехнического института совместно с научной группой ГГТУ им. П. О. Сухого под руководством д-ра техн. наук, проф. Н. В. Грунтовича ведется разработка методики комплексного технического диагностирования силовых маслонаполненных трансформаторов. Целью исследования является повышение достоверности при определении дефектов в процессе эксплуатации силовых маслонаполненных трансформаторов за счет контроля и анализа одновременного изменения определенной группы диагностических параметров при комплексном техническом диагностировании. Научная идея заключается в увеличении срока службы, снижении числа внезапных отказов силовых трансформаторов во время эксплуатации на основе разрабатываемой теории вибродиагностирования динамической стойкости обмоток, магнитопровода в диапазоне 50–5000 Гц и повышения качества диагностирования по хроматографии горючих газов за счет применения различных методов анализа горючих газов и увеличения числа диагностических параметров при одновременном измерении их значений.

#### Литература

1. Жабборов, Т. К. Анализ проблемы надежности силовых трансформаторов в энергосистемах Республики Узбекистан / Т. К. Жабборов, И. К. Исмоилов // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сб. науч. трудов / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. о-во «Знание» ; под ред. Н. В. Сычевой. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 173–178.
2. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие / Н. В. Грунтович. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 271 с.
3. Анализ проблемных вопросов эксплуатации маслонаполненных трансформаторов / Н. В. Грунтович [и др.] // Энергия и Менеджмент, 2017. – № 3 (96). – С. 2–6.
4. Грунтович, Н. В. Экспертные системы управления энергоэффективностью и энергетической безопасностью / Н. В. Грунтович // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. – 2014. – № 4. – С. 16.
5. Грунтович, Н. В. Комплексное техническое диагностирование электротехнического оборудования – основа системы ремонтов «по состоянию» / Н. В. Грунтович, Н. И. Грачек // Горный журнал. – 2003. – № 7. – С. 67–69.
6. Грунтович, Н. В. Типовые ошибки при вибродиагностировании энергетического оборудования / Н. В. Грунтович, А. А. Алферов, П. М. Колесников // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2010. – № 1 (40). – С. 72–81.
7. Грунтович, Н. В. Компьютерные системы технического диагностирования маслонаполненных трансформаторов / Н. В. Грунтович, И. В. Петров, П. М. Колесников // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 4 (55). – С. 94–99.
8. Грунтович, Н. В. Закономерности образования внутренней электрической дуги в силовых маслонаполненных трансформаторах / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович // Энергетическая стратегия. – 2022. – № 1 (85). – С. 21–24.



**РАЗРАБОТКА ЭКОНОМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ЦЕМЕНТНОГО  
ЗАВОДА г. ФЕРГАНЫ И ОЦЕНКА РЕГУЛИРОВОЧНОЙ  
СПОСОБНОСТИ ПО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Ф. Н. Насретдинова**

*Ферганский политехнический институт, Республика Узбекистан*

Научный руководитель М. О. Узбеков

Важность определения текущего состояния показателей энергетической эффективности (ЭЭФ) для промышленных предприятий во многом определяет последующие шаги при организации проведения энергетического обследования и результативность работы. Основными показателями ЭЭФ для промышленных предприятий являются удельные и общие расходы энергоресурса на единицу выпуска продукции, поскольку удельные расходы энергоресурса определяют энергетическую составляющую затрат в структуре себестоимости продукции, а динамика общего расхода энергоресурса позволяет оценить реальное снижение его потребления в часто изменяющихся условиях функционирования промышленного предприятия. Удельный расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) ( $W_{\text{уд. ТЭР}}$ ) на единицу выпускаемой продукции является одним из критериев, который позволяет оценить эффективность работы предприятия с точки зрения загрузки производственного оборудования, эффективности внедряемых мероприятий по энергосбережению, а также технологии производства [1]–[7].

Для оценки текущего состояния ЭЭФ производства цемента марки М-400 предложено построить однофакторные модели зависимости расхода электроэнергии на выпуск цемента. Авторами собрана статистика по месячным объемам выпуска цемента и соответствующего расхода электроэнергии за четырехлетний период. Оценка степени тесноты связи между объемом выпуска продукции и расходам электроэнергии показала достаточно высокий коэффициент корреляции, который составил  $R = 0,98$ . По месячным данным построена однофакторная модель зависимости удельного расхода электроэнергии от выпуска продукции следующего вида:

$$W_{\text{уд.ЭЭ}} = w_{\text{уд.техн}} + W_{\text{усл.-пост}} / \Pi = 74,7 + 2412908,5 / \Pi, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т},$$

где  $W_{\text{усл.-пост}}$  – составляющая потребления энергоресурса, не зависящая от объема выпускаемой продукции, кВт · ч;  $w_{\text{уд.техн}}$  – технологический удельный расход энергоресурса на выпуск единицы продукции;  $\Pi$  – объем производства продукции, т.

Разработанная модель и фактические значения удельных расходов электроэнергии представлены на рис. 1. Именно из-за условно-постоянной расхода электроэнергии, не зависящей от объема выпуска продукции, при снижении объема выпуска продукции удельные расходы растут, а при наращивании объемов выпуска продукции – удельные расходы электроэнергии на производство цемента снижаются. Для электроэнергии к условно-постоянной составляющей расхода относят затраты электроэнергии на освещение, вентиляцию, вспомогательные производственные нужды (вспомогательные цеха, связанные с ремонтом различного оборудования, складские помещения, административно-бытовые помещения). В публикациях [6], [7] предлагается оценивать потенциал повышения энергетической эффективности от максимального значения удельного расхода электроэнергии до минимального значения на всем диапазоне

выпуска продукции (горизонтальная регулировочная способность по энергоэффективности). Суть горизонтального регулирования  $W_{уд.ЭЭ}$  состоит в том, что при изменении объемов выпуска продукции (увеличивая или уменьшая загрузку технологического оборудования), рабочая точка гиперболической кривой зависимости  $W_{уд.ЭЭ} = F(\Pi)$  смещается в сторону уменьшения или увеличения  $W_{уд.ТЭР}$ , соответственно.

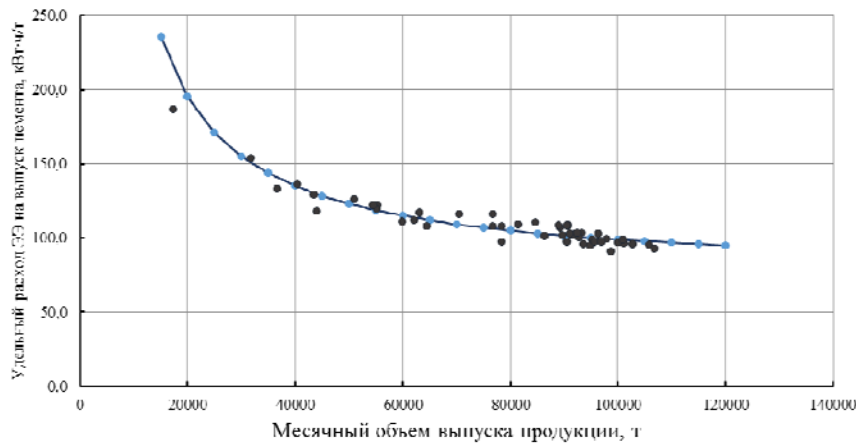


Рис. 1. Модель зависимости удельного расхода электрической энергии в зависимости от месячного объема выпуска цемента марки М-400

Условно-постоянная составляющая расхода ТЭР определяется и сезонным фактором, а также количественными и качественными характеристиками оборудования ее определяющими.

Потенциал горизонтального повышения ЭЭФ, %, относительно минимального объема выпуска продукции в соответствии с выражением [X]:

$$\Delta ЭЭФ = (W_{уд.П_i} - W_{уд.П_{мин}}) / W_{уд.П_{мин}} \cdot 100, \%,$$

где  $W_{уд.П_i}$  – значение удельного расхода энергоресурса, соответствующего  $i$ -му объему выпуска продукции;  $W_{уд.П_{мин}}$  – значение удельного расхода энергоресурса, соответствующего минимальному объему выпуска продукции.

В табл. 1 представлена оценка повышения ЭЭФ цементного производства г. Ферганы на диапазоне выпуска продукции от 15000 до 120000 т в месяц.

Таблица 1

#### Оценка повышения энергоэффективности цементного производства г. Ферганы

$\Pi_{мес}, \text{ т}$	$W_{уд.ЭЭ}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$	Горизонтальная регулировочная способность по ЭЭФ: $\Delta ЭЭФ = (W_{уд.П_i} - W_{уд.П_{мин}}) / W_{уд.П_{мин}} \cdot 100, \%$
15000	235,6	БАЗИС
20000	195,3	-17,1

Окончание табл. 1

П <sub>мес</sub> , т	W <sub>уд.ЭЭ</sub> , кВт · ч/т	Горизонтальная регулировочная способность по ЭЭФ:
		$\Delta \text{ЭЭФ} = (W_{\text{уд.Пг}} - W_{\text{уд.Пмин}}) / W_{\text{уд.Пмин}} \cdot 100, \%$
30000	155,1	-34,2
40000	135,0	-42,7
50000	123,0	-47,8
60000	114,9	-51,2
70000	109,2	-53,7
80000	104,9	-55,5
90000	101,5	-56,9
95000	100,1	-57,5
100000	98,8	-58,1
110000	96,6	-59,0
120000	94,8	-59,8

Как видно из табл. 1, в максимуме повышение ЭЭФ может составить -59,8 % (это снижение удельного расхода ЭЭ при месячном объеме выпуска цемента 120000 т).

Если рассмотреть всю предоставленную месячную статистику по фактическому удельному расходу ЭЭ и выпуску цемента (табл. 2), то видно, что количество низкоэффективных режимов производства составляет всего 4 месяца из 48 (это 8,3 % от суммарного количества режимов цементного производства). Количество режимов средней эффективности составляет 16 месяцев (33,3 %) исходной выборки. Количество высокоэффективных режимов цементного производства составляет 28 месяцев или 58,3 % месячных значений данного производства.

Таблица 2

#### Анализ эффективности режимов исходной выборки цементного производства

Цемент М-400, т	Количество месяцев в выборке	Процент от общего количества рассматриваемых месяцев, %	Минимальное значение W <sub>уд.ЭЭ</sub> , кВт · ч/т	Максимальное значение W <sub>уд.ЭЭ</sub> , кВт · ч/т
до 40000 т	4	8,3	133,4	186,4
от 40000 до 80000 т	16	33,3	97,5	128,9
свыше 80000 т	28	58,3	90,9	110,6
<i>Итого</i>	48	100		

Таким образом, данные табл. 2 позволяют утверждать, что количественный состав исследуемой выборки месячных режимов характеризуется наибольшим весом энергоэффективных режимов (58,3 %).

Разработанные модели позволили оценить горизонтальную регулировочную способность по ЭЭФ цементного производства.

## Литература

1. Токочакова, Н. В. Показатели энергетической эффективности промышленных потребителей / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3 (26). – С. 66–75.
2. Грунтович, Н. В. Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий / Н. В. Грунтович [и др.] // Вестн. Чувашского ун-та. – 2015. – № 3. – С. 40–48.
3. Using models of energy consumption from influencing factors to assess the current state and energy efficiency forecasting / D. Moroz [et al.] // In E3S Web of Conferences. – Vol. 220. – P. 01024.
4. Грунтович, Н. В. Влияние структуры потребления ТЭР предприятия на эффективность внедрения мероприятий по энергосбережению / Н. В. Грунтович, Е. Л. Шенец // Энергетика Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2014. – № 2. – С. 58–66.
5. Грунтович, Н. В. Экспертные системы управления энергоэффективностью и энергетической безопасностью / Н. В. Грунтович // Энергоэффективность. – 2014. – № 4. – С. 16–20.
6. Мороз, Д. Р. Развитие методического обеспечения для диагностирования энергетической эффективности / Д. Р. Мороз, С. Г. Жуковец, Е. Л. Шенец // Энергия и Менеджмент, 2017. – № 1 (94). – С. 8–13.
7. Использование методов математического моделирования для решения практических задач оценки энергоэффективности / Д. Р. Мороз [и др.] // Энергия и Менеджмент, 2017. – № 3 (96). – С. 7–11.

**НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
ДЛЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
НА ПРИМЕРЕ СП ООО «УЗ ХАНВУ ИНЖИНИРИНГ» г. ФЕРГАНА**

**Ф. Н. Насретдинова, Г. Р. Умурзакова**

*Ферганский политехнический институт, Республика Узбекистан*

Научный руководитель М. О. Узбеков

Метод нормирования электроэнергии (ЭЭ) на основе расчетно-статистических моделей режимов электропотребления промышленных потребителей (ПП) является наиболее предпочтительным в современных условиях функционирования ПП [1]–[5].

В общем виде модель режима электропотребления ПП имеет вид:

$$W_{ЭЭ} = W_{\text{техн}} + W_{\text{усл.-пост}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{усл.-пост}}$  – условно-постоянная составляющая потребления электроэнергии, не зависящая от объема выпускаемой продукции, кВт · ч;  $W_{\text{техн}}$  – технологическое электропотребление, кВт · ч.

От общей модели расхода ЭЭ от объема выпуска продукции возможен переход к модели общезаводского удельного расхода ЭЭ на выпуск продукции. Модель имеет вид:

$$W_{\text{уд.ЭЭ}} = W_{\text{уд.техн}} + W_{\text{усл.-пост}} / П, \text{ кВт} \cdot \text{ч/ед. прод.}, \quad (2)$$

где  $W_{\text{усл.-пост}}$  – условно-постоянная составляющая потребления ЭЭ, не зависящая от объема выпускаемой продукции, кВт · ч;  $W_{\text{уд.техн}}$  – технологический удельный расход энергоресурса на выпуск единицы продукции.

Удельные и общие расходы энергоресурса на единицу выпуска продукции являются основными показателями ЭЭФЮ поскольку удельные расходы энергоресурса определяют энергетическую составляющую затрат в структуре себестоимости продукции, а динамика общего расхода энергоресурса позволяет оценить реальное снижение его потребления в часто изменяющихся условиях функционирования промышленного предприятия.

При выпуске однородной продукции (например, запасных частей, телевизоров, ремонтных работ, электротехнических изделий) вся продукция должна быть приведена к базисному виду. Пересчет выпускаемой продукции к базисному виду производится по формуле (3) через трудоемкость либо материалоемкость изделий:

$$PP(N) = P(N) \frac{T(N)_i}{T_{\text{баз}}}, \quad (3)$$

где  $PP(N)$  – приведенный к базису объем  $N$ -го вида продукции, у. е.;  $P(N)$  – фактический объем  $N$ -го вида продукции, шт.;  $T(N)_i$  – трудоемкость (материалоемкость)  $N$ -го вида продукции в  $i$ -м году, ед. изм./шт.;  $T_{\text{баз}}$  – трудоемкость (материалоемкость) базисного вида, ед. изм.

После приведения продукции построение моделей производится в соответствии с алгоритмом:

1) формируются временные ряды расхода ЭЭ и объема выпускаемой продукции на временном интервале  $t = 1, 2, \dots, n''$ :

$$\{W_t\}_{t=1, 2, \dots, n''}, \quad \{\Pi_t\}_{t=1, 2, \dots, n''};$$

2) сформированные временные ряды переформируются в соответствии с сезоном года соответствующему осенне-зимнему и весенне-летнему периоду, что позволяет учитывать сезонную специфику электропотребления:

$$\{\Pi_t\}_{t=1, 2, \dots, n'}, \quad \{W_t\}_{t=1, 2, \dots, n'};$$

$$n' = n'' - NK,$$

где  $NK$  – количество значений исключенных из временного ряда;

3) в зависимости от полученной длины временных рядов  $n'$  и цели построения модели (квартальные значения удельных расходов и объемов выпуска продукции), выбирается период усреднения  $\tau$  и по выражениям рассчитываются сглаженные временные ряды (4), (5):

$$\bar{\Pi}_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=t}^{t+\tau-1} \Pi_i, \quad \bar{W}_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=t}^{t+\tau-1} W_i; \quad (4)$$

$$\{\bar{\Pi}_t\}_{t=1, 2, \dots, n}, \quad \{\bar{W}_t\}_{t=1, 2, \dots, n}; \quad (5)$$

$$n = n' - (\tau - 1); \quad t = 1, 2, \dots, n;$$

- 4) строится модель [1] режимов электропотребления ПП вида (1);
- 5) производится построение модели удельного расхода электроэнергии от объемов выпускаемой продукции вида (2);
- 6) с использованием модели  $W_{уд} = F(\Pi)$  рассчитываются удельные расходы электроэнергии дифференцированные по объемам выпущенной продукции. Производится проверка разработанных норм расхода электроэнергии по данным кварталов предыдущего периода.

СП ООО «Уз Ханву Инжиниринг» специализируется на выпуске комплектующих изделий и запасных частей для автомобильной промышленности различного ассортимента. Ассортимент достаточно широкий, различная трудоемкость и материалоемкость выпускаемых изделий. Для предприятий, имеющих широкий ассортимент выпускаемой продукции, рекомендуется нормирование расхода топливно-энергетических ресурсов осуществлять на условные единицы продукции – у. е.

Технологический расход электрической энергии может быть представлен одной составляющей: расход электрической энергии на производство. В качестве базиса для нормирования комплектующих принято изделие BRACE A-WHEELHOUSE (RH) трудоемкостью выпуска 0,227 н. ч. Пересчет выпускаемой продукции к базису по месяцам за 2019–2021 гг. производился по формуле (3). На основании рассчитанных значений выпуска продукции и фактического расхода электроэнергии сформированы ряды выпуск продукции-расход ЭЭ ( $\Pi_i - W_i$ ) за трехлетний период. На основе метода наименьших квадратов построена квартальная модель расхода электроэнергии вида (1)  $W = 0,93\Pi + 100215$ , кВт · ч, а также квартальная модель удельного расхода электроэнергии  $W_{уд} = 0,93 + 100215/\Pi$ , кВт · ч/ у. е. На рис. 1 представлена квартальная зависимость удельного расхода электроэнергии на выпуск запасных частей и комплектующих для автомобилестроения. Предлагается нормы дифференцировать в зависимости от сезонного фактора и объема выпуска продукции (см. таблицу).

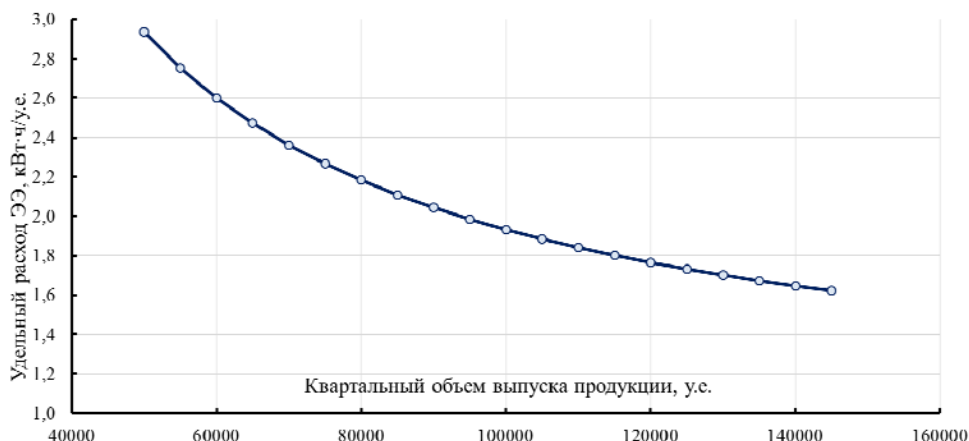


Рис. 1. Графическая интерпретация результатов моделирования зависимости удельного расхода электроэнергии для производства комплектующих изделий и запасных частей для автомобильной промышленности в зависимости от квартального объема выпуска продукции

**Разработанные нормы расхода электроэнергии  
на выпуск продукции СП ООО «Уз Ханву Инжиниринг»**

Диапазон выпуска продукции	Норма расхода электроэнергии, кВт · ч/у. е.				
	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Среднегодовая
до 60000 у. е.	3,37	2,45	2,78	3,60	3,05
от 60000 до 70000	2,96	2,15	2,46	3,16	2,68
от 70000 до 80000	2,65	1,90	2,20	2,81	2,39
от 80000 до 90000	2,37	1,73	2,00	2,53	2,16
от 90000 до 100000	2,18	1,59	1,82	2,33	1,98
от 100000 до 110000	2,04	1,48	1,72	2,18	1,86
от 110000 до 120000	1,92	1,43	1,62	2,07	1,76
от 12000 до 130000	1,84	1,40	1,56	1,98	1,69
свыше 130000	1,77	1,38	1,52	1,92	1,65

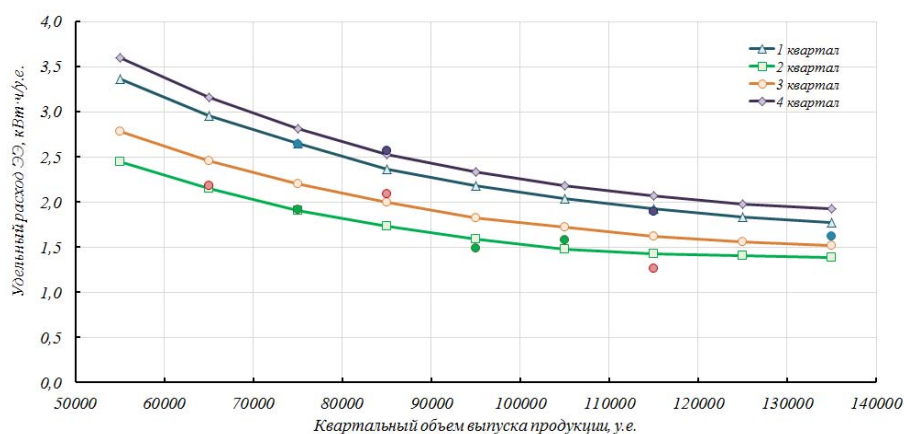


Рис. 2. Нормы, дифференцированные с учетом сезонного фактора и изменения объема выпуска продукции

Нормы, дифференцированные с учетом сезонного фактора и изменения квартального объема выпуска продукции, представлены на рис. 2.

#### Литература

1. Токочакова, Н. В. Расчетно-статистические модели режимов потребления электроэнергии как основа нормирования и оценки энергетической эффективности / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Энергоэффективность. – 2006. – № 1. – С. 14–15.
2. Использование методов математического моделирования для решения практических задач оценки энергоэффективности / Д. Р. Мороз [и др.]. // Энергия и Менеджмент. – 2017. – № 3 (96). – С. 7–11.
3. Токочакова, Н. В. Управление энергоэффективностью промышленных потребителей на основе моделирования режимов электропотребления / Н. В. Токочакова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2006. – № 3. – С. 67–75.

4. Токочакова, Н. В. Показатели энергетической эффективности промышленных потребителей / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Вестн. Гом. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3 (26). – С. 66–75.
5. Грунтович, Н. В. Проблемные зоны системы управления энергоэффективностью промышленных потребителей республики / Н. В. Грунтович, Н. В. Токочакова // Энергоэффективность. – 2008. – № 3. – С. 6–10.
6. Токочакова, Н. В. Моделирование режимов потребления электрической энергии для задач управления энергетической эффективностью промышленных потребителей / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз, А. С. Фиков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 2 (15). – С. 107–114.

## **ВНЕДРЕНИЕ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ»**

**Е. В. Койпиш**

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

Научный руководитель С. Г. Жуковец

Переключения в электрических установках электростанций и подстанций производятся с целью изменения оперативного состояния оборудования или схемы первичных соединений. Они осуществляются путем перемены положения коммутационных аппаратов, предназначенных для включения и отключения оборудования. Все операции при этом выполняются оперативным персоналом в определенной последовательности, обусловленной схемами первичных и вторичных соединений, назначением коммутационных аппаратов, режимами работы оборудования и другими причинами. Ошибки при переключениях приводят к тяжелым авариям, опасным для обслуживающего персонала и оборудования.

Для обучения студентов было создано программное обеспечение оперативных переключений в электрических схемах распределительных устройств, основанное на одноименной лабораторной работе по дисциплине «Производство электроэнергии». Выполнено на языке ООП С#, подходит для работы на Windows 7/8/10.

Целью исследования является изучение организации и порядка производства переключений в электрических установках станций и подстанций [1].

Для выполнения лабораторной работы по теме «Оперативные переключения в электроустановках» используется стенд, на котором приводится главная схема электрических соединений двухтрансформаторной подстанции со схемой распределительного устройства: одна рабочая секционированная и обходная системы шин с подключением трансформаторов через развилку из двух выключателей (рис. 1).

Студентам необходимо изучить схему электрических соединений станций и подстанций и разработать бланк переключений в соответствии с заданием преподавателя. Бланк переключений является оперативным документом, определяющим содержание задания и последовательность выполнения операций.

Под оперативными схемами понимают чертежи, на которых указывается основное оборудование установок. Выключатели и разъединители при этом показываются в их действительном положении на данный момент времени. Исходя из принципа действия выключатели и разъединители отображаются в двух состояниях: включенные и отключенные, однако в программном обеспечении для отображения ошибочных переключений выключатели имеют еще два состояния: опасное включенное и опасное выключенное положение [2].



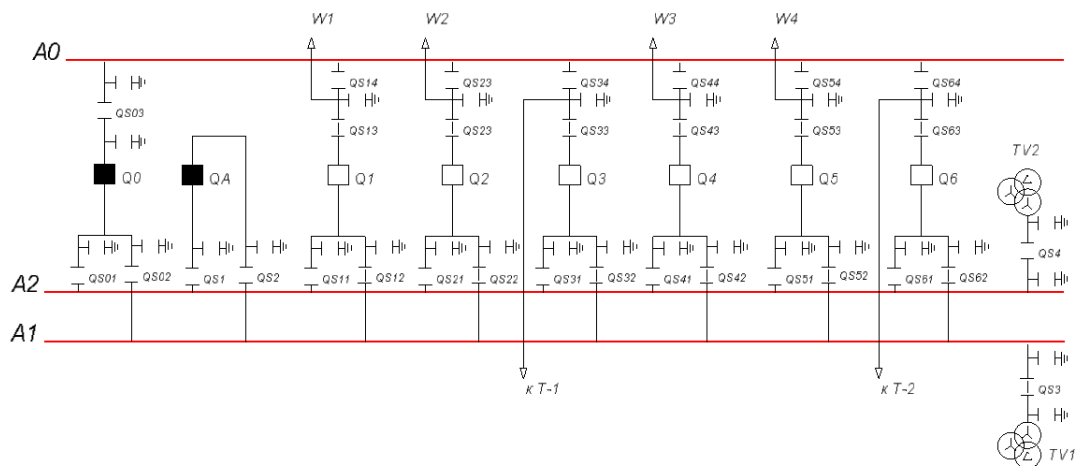


Рис. 1. Схема распределительного устройства

Благодаря разработанному программному комплексу в рамках лабораторной работы студенты имеют возможность отработать следующие виды переключений:

- включение и отключение воздушной линии электропередачи;
- включение и отключение силового трансформатора;
- сложные переключения;
- замену выключателя присоединения обходным выключателем.

Для наблюдения за ходом выполнения лабораторной работы была создана функция отображения действий в виде списка. При каждом переключении в список добавляется запись, соответствующая действию студента. Для визуализации неправильных переключений используется красный цвет. Таким образом преподаватель сможет выявить ошибки студента и объяснить непонятый материал.

Практическая ценность данной работы заключается в следующем [3]:

- в возможности обеспечить студентов доступом к необходимому материалу: теоретической части, описанию экспериментальной установки, последовательности выполнения задач;
- приобретении студентами опыта компьютерных технологий в энергетике;
- наглядности результатов экспериментов (в программе используется, как световой, так и звуковой ошибочный шаг при переключениях);
- полной безопасности при проведении лабораторных исследований, что очень важно, поскольку дисциплина изучает высоковольтные цепи;
- сокращения учебных площадей из-за громоздкости высоковольтного оборудования;
- уменьшении материальных затрат на модернизацию лабораторной базы.

#### Литература

1. Селиверстов, Г. И. Электрическая часть станций и подстанций : метод. указания к лабораторным работам / Г. И. Селиверстов, В. Н. Петренко. – Гомель : ГГТУ им П. О. Сухого, 2005. – 32 с.
2. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower / N. V. Hruntovich [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 124.
3. Скрыбини, Н. П. Оперативное управление распределительными электрическими сетями : учеб. пособие / Н. П. Скрыбин, Н. Д. Поздеев, А. Н. Алюнов – Вологда : ВоГТУ, 2011. – 123 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ****А. С. Кохан***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель О. Г. Широков

Одним из основных негативных факторов систем электроснабжения являются провалы напряжения. Их появление обусловлено объективными и субъективными причинами, такими как удары молний, загрязнение изоляции, механические повреждения, касания токоведущих частей посторонними предметами, ошибочные действия оперативного и ремонтного персонала и т. д. Они могут возникнуть из-за запуска мощных приемников на предприятии или на соседнем производстве в той же распределительной сети, работы устройства повторного включения, изменения нагрузки переключением.

В соответствии с требованиями настоящего стандарта провал напряжения рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность провала напряжения может быть до 1 минуты [1]. Параметрами провала являются его длительность, величина остаточного напряжения, выражаемая в процентах от номинального значения, и частота появления провалов. Анализ результатов выполненных измерений свидетельствует о том, что в кабельных и воздушных распределительных сетях преобладают провалы напряжения глубиной 40–99 %, продолжительностью 0,01–0,5.

Каждый провал напряжения приводит к кратковременному сбою в работе технологического оборудования. Разные нагрузки промышленности реагируют по-своему на это явление. Особенно ощутимое влияние провалы напряжения оказывают на так называемые «непрерывные технологические процессы» в металлургической, химической, нефтепереработке и других подобных отраслях. Возникающий при этом ущерб в лучшем случае выражается в браке части продукции, а в худшем – требует полной остановки технологического процесса. В отдельных случаях необходимо учитывать и стоимость невыпущенной продукции. Если из-за внезапных провалов наносится экологический ущерб, то должны быть учтены затраты на ликвидацию всех возможных последствий. При большом числе и мощности электрических двигателей на предприятии их одновременное включение после провала напряжения может оказаться недопустимым. Вызвано это тем, что в момент самозапуска возникает новый провал напряжения. Переходный процесс сильно затягивается, а часть электродвигателей может отключиться из-за перегрузки по току [2].

В качестве примера будет выступать достаточно простое устройства для моделирования провалов питающего напряжения, которое можно создать, используя в качестве коммутационного аппарата сдвоенные электромеханические пускатели. Применение различных схем их включения позволяет проводить исследования устойчивости к провалам напряжения в лабораторных и производственных условиях, учитывая особенности электроснабжения преобразователя частоты (ПЧ). Пример схемы устройства, моделирующего провал напряжения, приведен на рис. 1, реализующий следующий алгоритм работы.

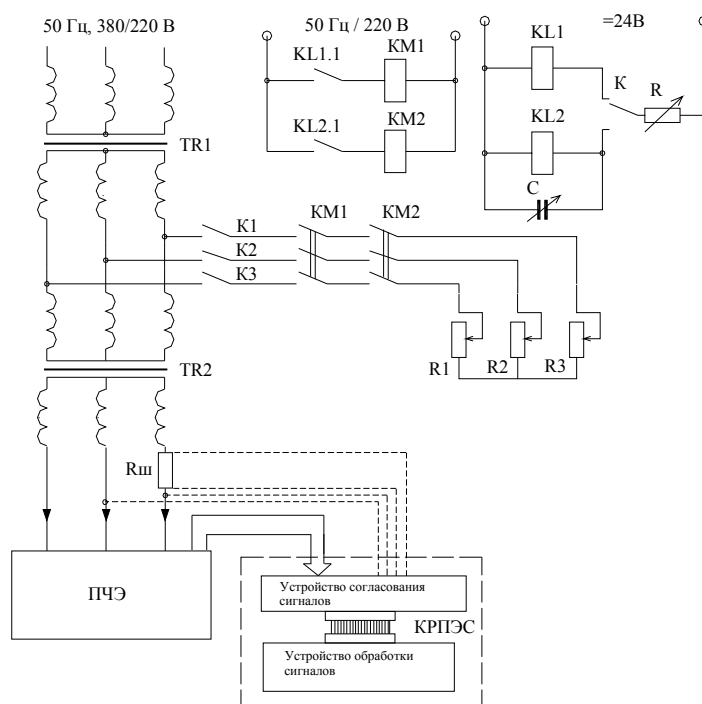


Рис. 1. Схема устройства, моделирующего сетевые провалы напряжения

На схеме по рис. 1 силовые контакты пускателей  $KM1$  и  $KM2$  последовательно включены в цепи нагрузочных сопротивлений  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  и, посредством рубильников  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ , присоединены к соответствующим фазам питания исследуемого электроприемника за балластными сопротивлениями  $R_{б1}$ ,  $R_{б2}$ ,  $R_{б3}$ . При положении переключателя  $K$  в позиции 2 силовые контакты пускателя  $KM2$  замкнуты, а силовые контакты пускателя  $KM1$  разомкнуты и напряжение на нагрузочные сопротивления  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  не подается. При переводе ключа  $K$  из позиции 2 в позицию 1 происходит замыкание силовых контактов пускателя  $KM1$ , а размыкание силовых контактов пускателя  $KM2$  произойдет через промежуток времени, зависящий от времени разряда (емкости) конденсатора  $C$ . Длительность провала напряжения на рассматриваемой схеме определяется временем одновременного замкнутого состояния силовых контактов пускателей  $KM1$  и  $KM2$ . Это время может изменяться путем соответствующего изменения величины емкости конденсатора  $C$ . Глубина провала напряжения определяется величиной падения напряжения на балластных сопротивлениях  $R_{б1}$ ,  $R_{б2}$ ,  $R_{б3}$ . Балластные сопротивления  $R_{б1}$ ,  $R_{б2}$ ,  $R_{б3}$  выбираются достаточно малыми, чтобы существенно не влиять на работу ПЧ в нормальном режиме. Величина падения напряжения на балластных сопротивлениях  $R_{б1}$ ,  $R_{б2}$ ,  $R_{б3}$  регулируется током наброса нагрузки  $I_{н1}$  путем выставления соответствующей величины сопротивлений  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ . Изменяя величину этих сопротивлений, можно моделировать симметричный или несимметричный провал напряжения требуемой глубины. Исследуемый электроприемник получает питание со стороны в. н. разделительного трансформатора  $TR2$ . Схему на рис. 1 целесообразно применять для моделирования провалов напряжения в цепи питания преобразователя частоты незначительной мощности, при наличии на шинах н. н. цеховых трансформаторных подстанций других ответственных преобразователей частоты не подлежащих испы-

таниям, а также для физического моделирования процессов связанных с провалами напряжения в системах электроснабжения различной конфигурации. Пример результатов физического моделирования процессов, связанных с провалами напряжения приведен на рис. 2.

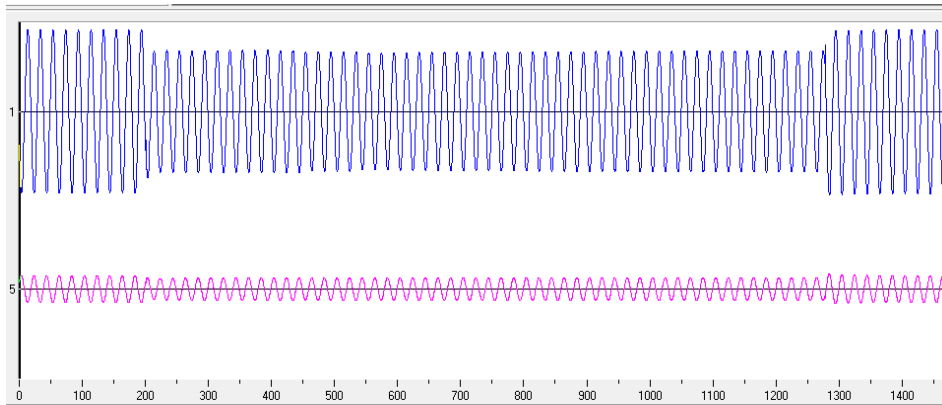


Рис. 2. Пример результатов однофазного провала напряжения, полученных на устройстве моделирования провалов напряжения, собранного по схеме рис. 1: сверху –  $U_{\phi}$ ; снизу –  $I_{\phi}$

Устройство моделирования провалов напряжения, описанное выше, обладает следующими достоинствами:

- простотой изготовления и доступностью комплектующих элементов;
- возможностью быстрого взаимного изменения схем путем несложных переключений и, как следствие, гибкостью, дающей возможность проводить исследования в производственных условиях, учитывая особенности электроснабжения исследуемых преобразователей частоты;
- возможностью моделирования симметричных и несимметричных провалов и исчезновений напряжения длительностью в широком диапазоне и любой требуемой глубины;
- возможностью проводить исследования как отдельных электроприемников, так и целых технологических линий потребляемой мощностью до нескольких тысяч ампер;
- возможностью принудительного прерывания тока в любой момент и не генерируют коммутационных помех в цепь питания преобразователя частоты;
- возможностью моделировать провалы напряжения прямоугольной формы, наиболее тяжелой для чувствительных электроприемников.

К недостаткам рассматриваемых устройств необходимо отнести невозможность управления фазой начала провала напряжения и низкую степень автоматизации процесса исследования устойчивости электрооборудования.

Таким образом, провалы напряжения оказывают большое влияние на качество электроэнергии в целом, следовательно, снижение их влияния на систему электроснабжения является весьма актуальной задачей, требующей вложения капитальных средств, а также мер по повышению общей энергоэффективности. Также следует проводить исследования по влиянию провалов напряжения на безотказность систем электроснабжения, вызванных внешними и внутренними возмущающими факторами с учетом того, что они носят случайный характер. Поэтому одним из этапов в работе является исследование и моделирование провалов напряжения на основе вероятностных подходов.

## Литература

1. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2014. – 19 с.
2. Фишман, В. С. Провалы напряжения в сетях промышленных предприятий. Минимизация последствий / В. С. Фишман // Новости электротехники. – 2004. – № 6 (30).

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУЛА  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
НА ОСНОВЕ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ**

**А. М. Милыбаева**

*Рудненский индустриальный институт, Республика Казахстан*

Научный руководитель К. С. Рыспаев

Энергия – это начало всего живого. Все зависит от источников электричества, чтобы жить в соответствии с требованиями времени. Поэтому их надо беречь, экономить, а в будущем производить эти источники в два раза больше, чем сейчас. В настоящее время в зарубежных государствах есть проекты, которые начинают свой путь развития. Одним из них можно назвать энергетический пул. Энергетический пул – это механизм энергообмена между двумя или более коммунальными предприятиями, производящими электроэнергию. Энергетический пул используется для выравнивания электрической нагрузки в большей сети (электросети), чем в отдельной утилите. Пул – это форма объединения, осуществляемая через соглашения между предпринимателями, при которых прибыль этих участников поступает в общий фонд и распределяется между ними в соответствии с заранее установленными отношениями. На одной модели пула мощности, созданной коммунальными предприятиями, устанавливается диспетчерский пункт управления. Там все обязанности по обмену прямой властью и разрешению споров возлагаются на администратора пула.

На этапе формирования энергетического пула появляются следующие преимущества:

- снижение эксплуатационных расходов;
- соблюдение требований к резервной мощности;
- помощь от пула в обязательстве единства;
- снижение затрат на планирование технического обслуживания;
- более надежная работа.

Одной из стран, взявших это направление, является Великобритания. Великобритания известна как пионер в области перераспределения энергии и вертикального разложения после создания системы электрического пула. Сектор начал работу, разделившись непосредственно на три добывающие компании, национального сетевого оператора и 12 оптовых компаний. Через десять лет после введения системы пула цены на электроэнергию в Великобритании были на 10 % ниже, чем в ходе реформ. Такой результат подтолкнул к внедрению модели пула в других странах. Недостатком здесь является то, что производители, сотрудничая друг с другом, могут попытаться уменьшить возможный объем предлагаемой энергии, минуя конкуренцию и координируя снижение ее производства для роста цен. Для снижения мотивации к таким действиям были приняты меры, способствующие конкуренции. В частности, в практику были внедрены двусторонние контракты между производителями и по-

ставщиками энергии, позволяющие заранее согласовывать объемы производства в течение дней, недель или месяцев.

Стоит отметить, что пул – это не только союз объединений в сфере энергетики, но и возможность открыть для них несколько реформаторских путей. Например, кратко о европейских реформах. Основные цели реформирования:

- сокращение тарифов вследствие роста эффективности (Великобритания, Аргентина, Австрия);
- привлечение иностранных инвесторов (Бразилия, Аргентина);
- обеспечение конкуренции с целью предоставления потребителям возможности выбора поставщика (Норвегия, Австрия);
- сглаживание разницы в тарифах в разных регионах страны (Норвегия, США).

В Казахстане не ведется работа с энергетическим пулом. В принципе, можно использовать энергию, получаемую естественным путем, но в будущем альтернативные источники энергии будут более эффективными и полезными, безвредными. Одним из них является производство энергии через биогазовые установки. Для получения биогаза требуется специальное устройство – биогазовая установка. Это комплекс инженерных сооружений, состоящий из установок и контейнеров для хранения и подготовки сырья, самого производства, а также его сбора и очистки, производства высококачественных минеральных удобрений, выделения побочных продуктов переработки. Биогазовая установка представляет собой герметично закрытое устройство, сбрасываемое при определенной температуре с заменой отходов, сточных вод и органических масс на биогазовые.

Преимущества использования биогазовой установки очень много. Данные установки – это специальные агрегаты, где происходит переработка отходов в биогаз и органические удобрения:

- биогаз;
- биологические удобрения;
- электрическая и тепловая энергии;
- виды топлива для автомобилей.

Биогазовая технология позволяет с помощью анаэробного (бескислородного) брожения получать натуральные биологические удобрения, содержащие биологически активные вещества и микроэлементы. Основное преимущество таких удобрений, по сравнению с традиционными удобрениями, заключается в том, что после внесения их в почву активизируются азотфиксирующие и другие микробиологические процессы, а также улучшаются физико-механические свойства почвы, оказывая на нее положительное влияние, в результате чего урожайность повышается на 30–50 % при использовании сбалансированных биологических удобрений после установки биогаза. Из 1 м<sup>3</sup> биогаза, образованного биогазовой установкой, можно вырабатывать 2,3 кВт/ч электроэнергии и 2,8 кВт/ч тепловой энергии. Для получения электроэнергии биогазовую установку можно комбинировать с небольшим газотурбинным или другим типом генератора. Для получения не только электроэнергии, но и дополнительной тепловой энергии биогазовый завод может быть оснащен когенерационными установками (рис. 1).

В настоящее время в Казахстане действует несколько биогазовых установок. Одна из них – биогазовая станция мощностью 1 МВт, собранная из железнодорожных цистерн, принадлежащих Карагандинскому АПК «Волынский». Сырье для его работы – отходы свиноводческой фермы, а произведенный источник энергии идет на работу рыбного цеха на месте.

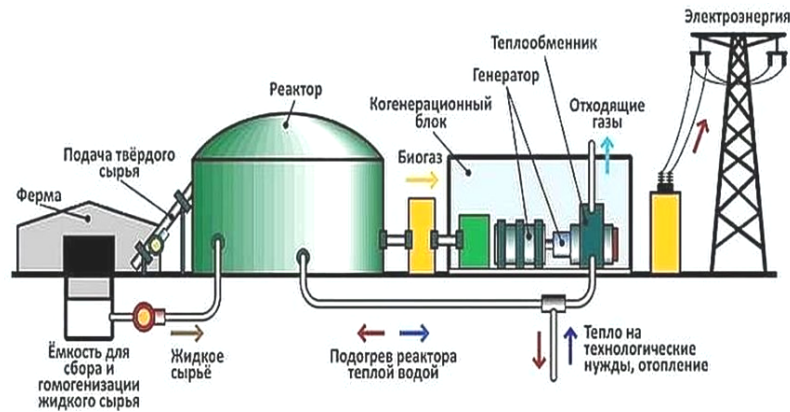


Рис. 1. Схема работы биогазовой станции

В 2017 г. в Шымкенте был запущен первый в Средней Азии «Комплекс биогазовых установок» мощностью 0,5 МВт. В комплексе установок использованы новейшие технологии Чешской компании HEDVIGA GROUP, представленной на международной выставке. Особенностью технологии является производство тепловой и электрической энергии с использованием биогаза, с обработкой отложений при очистке сточных вод города. В результате эта технология вносит большой вклад в улучшение экологии, значительно снижая загрязнение внешней среды. С этого года в этот список включена еще одна установка BGS (биогазовая установка), находящаяся на очистных сооружениях сточных вод ТОО «Водные Ресурсы-Маркетинг» в Шымкенте, мощностью 0,4 МВт. Так, по данным Минэнерго, в 2020 г. наблюдалась мощность биогаза в 2,82 МВт.

В Карасуском районе Костанайской области на территории фермы по разведению крупного рогатого скота «Караман-К» начала работу биогазовая установка (рис. 2). Биогазовая станция, состоящая из двух реакторов объемом 2400 м<sup>3</sup>, уже выведена на полную мощность, и выработанная электроэнергия с установки мощностью более 360 кВт расходуется на все хозяйственные нужды на месте. Реализация данного проекта и поставка необходимого оборудования осуществлялась товариществом с ограниченной ответственностью Zorg Biogas Ukraine. Ежегодно из биогаза получают 3 млн кВт · ч электроэнергии. В качестве сырья для станции используется твердый навоз крупного и мелкого рогатого скота, который составляет 44 т.



Рис. 2. Биогазовая установка в ТОО «Караман-К»  
Карасуского района Костанайской области

В течение трех лет необходимые устройства были переустановлены, также были решены проблемы, и устройства приступили к работе. За этот период безостановочно работает 80 тыс. кВт электроэнергии в месяц. Половина из них уходит на обслуживание самой установки, а остальные – на освещение скотоводческого и токового хозяйства.

В настоящее время на этой ферме имеется более десяти голов крупного рогатого скота, ежегодно увеличивающихся в два раза в органических отходах. В течение дня этот комплекс отправит на переработку 50 т навоза, а в год будет вырабатывать 16 тыс. т электроэнергии из навозного сырья. Если с биогазового комплекса в год получают 3 млн кВт электроэнергии, то из них 1 млн кВт уходит на непосредственную работу и освещение этого комплекса. На другие работы по реализации будет направлено 2 млн кВт электроэнергии. Этот регион, который потребляет необходимую энергию, ищет пути обеспечения в своем селе. Кроме того, он может производить не только источник электроэнергии, но и любой другой источник твердого и жидкого биоудобрения. Биоудобрение, превышающее 14 т в день, сегодня используется на рынке в качестве чистого удобрения. Таким образом, в год биогазовая установка производит 3 млн кВт электроэнергии, остальные 2 млн кВт электроэнергии можно подключить к другим объединениям и запустить проект пула.

#### Литература

1. Шомин, А. А. Биогаз на сельском подворье / А. А. Шомин, 2002.
2. Агабеков, В. Е. Альтернативные источники сырья и топлива / В. Е. Агабеков // Альтернативные источники сырья и топлива : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 мая 2023 г.
3. Специальный статистический комплекс, разработанный на основе сетевых источников: <https://www.ng.kz/modules/newspaper/article.php?numberid=483&storyid=21921>.

### **АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ**

**М. С. Ниязбаев**

*Рудненский индустриальный институт, Республика Казахстан*

Научный руководитель К. С. Рыспаев

Проблема повышения энергоэффективности в жилом секторе назрела с момента перехода к рыночным отношениям. Ежегодный пересмотр тарифов и снижение субсидирования сферы коммунальных услуг со стороны государства еще больше стимулирует домовладельцев находить пути снижения потерь энергии. Существует несколько путей снижения. С одной стороны, это устранение утечек тепла и «мостиков» холода, а также применение теплоизоляционных материалов. Разрабатываются более совершенные материалы, но прогресс является исключительно эволюционным. Несмотря на изобретение в лабораторных условиях превосходного по своим изоляционным качествам аэрогеля, промышленный выпуск данного материала еще не налажен. Второй путь состоит в возврате части тепла, рассеиваемого наружу, обратно в помещение. Это сравнительно новое направление, однако уже разработано немало агрегатов для этих целей. К примеру, рекуператоры, установленные на вытяжной вентиляции за счет медных трубок с хладагентами, способны отбирать до 20 % тепла



из воздуха, проходящего через шахту. Это тепло в дальнейшем может быть использовано для прогрева свежего воздуха. Однако существует принципиально иной подход в этом вопросе. Метод заключается в рациональном использовании источников тепла. Этого можно добиться путем точечного прогрева необходимой территории, а также отопления по востребованию. Направление стало актуальным с доступностью систем автоматики. Предполагается, что система, настроенная оптимально под жильцов дома, может сберечь от 25 до 70 % от действующих затрат [1].

В первую очередь необходимо разработать систему на уровне логики. Для этого нужны исходные данные о жилом помещении и о жильцах. В нашем примере это будет жилой частный дом с тремя спальнями, гостевым залом, кухней, санузлом и рабочим кабинетом. Система должна включать отопление только в том случае, когда в доме есть люди. Это реализуется с помощью установки расписания. В таком случае дом будет прохладнее в дневное время и начнет прогреваться ближе к приходу жильцов домой. Однако данный метод не идеален, так как в нем не предусмотрен внеплановый визит людей в дом. В таком случае вводят датчики присутствия. Датчики присутствия можно расположить у калитки для того, чтобы как можно раньше зафиксировать приезд владельцев и успеть прогреть прихожую.

Датчики присутствия позволяют зонировать дом для точечного прогрева. К примеру, если жилец возвращается домой на автомобиле, открыв ворота, то в первую очередь дается команда на прогрев гаража и прихожей, тогда как остальные помещения прогреваются умеренно. Другой пример, если ребенка нет дома, то его конкретное помещение из-за отсутствия по датчику ночью прогревается меньше всего. Датчики движения в данном случае бесполезны, так как они не будут реагировать на спящего человека. В целом, ночью должны быть отоплены только спальные комнаты, а остальные – оставаться холодными. Однако санузел, вероятнее всего, будет посещен ночью, и в этом случае предусмотрена программа прогрева 20 % времени ночью. При наступлении 7:00 вне зависимости от датчиков присутствия должно быть включено отопление на кухне, в санузле, а также в гараже и прихожей. В 9.00 программа опрашивает все датчики присутствия в квартире и при отрицательном результате отключает отопление (члены семьи находятся в школе и на работе). В системе предусмотрена защита от обледенения в случае использования жидкостного отопления. Программа комплекса предусматривает управление вентиляцией, и в этом случае спальная комната будет освежаться прохладным воздухом, когда в ней никого нет.

В перспективе смартфоны членов семьи за счет GPS-модуля могут отправлять подсказки об их приезде при приближении их к примеру, ближе, чем на 500 м к дому. Такая информация, помимо предварительного комфортного прогрева, даст понять, какой именно член семьи в доме и какие ему помещения нужны. Для тесной интеграции смартфона с системой умного отопления необходим базовый полноценный компьютер с возможностью загрузки в него прошивки. Компьютер должен иметь возможность выхода в интернет либо через Wi-Fi, либо через LAN-кабель, а также должен поддерживать ZigBee на аппаратном уровне. Для данных целей подойдет Raspberry Pi 3 B+ (рис. 1). Данный компьютер отличается хорошей производительностью и гибкостью за счет возможности установки любой прошивки с помощью Micro SD карты. Загрузка прошивки происходит с помощью ПК и специального программного обеспечения. Однако данный компьютер не поддерживает ZigBee нативно, для него необходимо дополнительное устройство, обеспечивающее такую поддержку. Для повседневных задач подойдет любой ZigBee-координатор в форм-факторе «флешки». Важно, чтобы он имел

USB-порт для обмена данными и питания. После оснащения данного компьютера поддержкой ZigBee необходимо установить на него программное обеспечение.

После настройки учетных записей необходимо приступить к устройствам и датчикам. Для их настройки необходимо наличие ZigBee-координатора. Координатор в системах ZigBee позволяет произвести первоначальную настройку датчиков с присвоением им имен и параметров. Координатор является критическим местом всей системы. Состоит он из микроконтроллера cc2531 и антенны для усиления сигнала. После подключения к порту микрокомпьютера становится возможным обнаружение устройств и создание их каталога. Важно отметить, что программируются не датчики или органы управления, а сам микрокомпьютер, который так или иначе должен обрабатывать полученные данные.



Рис. 1. Raspberry Pi 3 B+ с подключенными ZigBee-координатором (сверху слева) и LAN-кабелем

Большинство Wi-Fi реле управляется простой отправкой HTTP-запросов, достаточно в браузере набрать адрес устройства и ввести, к примеру, команду `command_on: "/usr/bin/curl -X GET http://192.168.1.20/rb0n.cgi"`. Подобная команда позволит включить одну розетку, которая в свою очередь включит отопитель [8].

Все датчики беспроводные, что сводит монтажные работы к минимуму, а также ускоряют ввод их в работу. В проекте получилось 7 умных розеток, 7 датчиков присутствия, а также 5 термометров. Данные об атмосферном давлении и влажности целесообразнее получать с помощью погодных API, тем самым проект избегает излишних трат на дорогостоящие гибридные датчики.

Эффективность можно оценить, проинтегрировав кривую потребления всех нагревателей с суммарным потреблением тех же нагревателей до установки новой системы. Разные помещения дают разный экономический эффект. Ожидаемую экономию удалось получить на кухне – 34 %, в гараже – 60 %, вследствие минимального присутствия людей в них, в особенности в ночное время. Напротив, в спальнях экономия – 15 %, в которых люди пребывают больше всего, экономия не столь существенна. Таким образом учитывая стоимость кВт · ч (17 тенге) и мощность одного электронагревателя (1800 Вт), экономия должна составить в среднем 21000 тенге. В случае использования газового котла экономия составит 4500 тенге, однако капиталовложение в модернизацию газовой инфраструктуры существенно дороже.

## Литература

1. Новиков, В. С. Автоматизация систем отопления / В. С. Новиков // Динамика систем, механизмов и машин : материалы междунар. науч.-техн. конф. / Омск. гос. техн. ун-т, 2014. – № 1.
2. Петрова, З. К. Технологии «умного дома» и энергоэффективная малоэтажная жилая застройка / З. К. Петрова // ЦНИИП градостроительства РААСН. – М., 2010.
3. Sergi Costa Duran. Introduction by: Lance Hosey. GREEN HOMES // Collins Design, 2007.
4. Сидорин, А. М. Современное жилище. Ч. 2. Градостроительные предпосылки создания доступного и адекватного жилища / А. М. Сидорин // Архитектура и стр-во России. – 2008. – № 2. – С. 2–17.
5. Колесников, В. Л. Решение многокритериальных задач, оптимальных по парето / В. Л. Колесников, А. И. Бракович, А. Я. Жук // Физико-математические науки и информатика БГТУ. – 2014. – № 6. – С. 120–130.
6. Ветка энтузиастов умного дома на форуме 4PDA. – Режим доступа: <https://4pda.to/forum/index.php?showtopic=871505>.
7. Раздел интеграций в официальном сайте Home Assistant. – Режим доступа: <https://www.home-assistant.io/integrations/>.
8. Борисенко, А. С. Методы оптимизации для mesh сети в ZigBee / А. С. Борисенко // Восточно-Европ. журн. передовых технологий / Харьк. нац. ун-т.
9. Zolnierczyk, M. A comprehensive guide to Grafana & InfluxDB. – Режим доступа: <https://notenoughtech.com/raspberry-pi/grafana-influxdb/>.

Научное издание

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

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

**Гомель, 28–29 апреля 2022 года**

**В двух частях  
Часть 1**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редактор *О. С. Ковалёва*

Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 04.10.22.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 32,08. Уч.-изд. л. 23,66.

Тираж 40 экз. Заказ № 499/12.

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