

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. О. СУХОГО»  
ПАО «КОМПАНИЯ» «СУХОЙ» ОКБ «Сухого»

---

---

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Материалы  
XIII Международной научно-технической конференции  
(научные чтения, посвященные 125-летию со дня рождения П. О. Сухого)

*Гомель, 22 октября 2020 года*

Гомель  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
2020

УДК 62.01(042.3)

ББК 34.4

C56

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, доц. *А. А. Бойко*

д-р геолого-минерал. наук, проф. *В. Д. Порошин*

д-р хим. наук *Е. Н. Подденежный*

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

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

канд. экон. наук, доц. *Е. А. Кожевников*

канд. техн. наук, доц. *А. В. Шаповалов*

канд. техн. наук, доц. *И. Н. Степанкин*

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

канд. техн. наук, доц. *Ю. Н. Колесник*

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

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

канд. техн. наук, доц. *И. А. Мурашко*

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

канд. экон. наук, доц. *Н. В. Сычёва*

канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

канд. техн. наук, доц. *Н. А. Демяненко*

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

**Современные** проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар.  
С56 науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Су-  
хого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел.  
гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «Компания» «Сухой» ОКБ «Сухого» ;  
под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 338 с.  
ISBN 978-985-535-452-0.

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

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

УДК 621.01(043.2)

ББК 34.4

ISBN 978-985-535-452-0

© Оформление. Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

## ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО

<i>Тимошин С. И.</i> Авиаконструктор, опередивший время (к 125-летию со дня рождения П. О. Сухого) .....	9
--	---

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Грунтович Н. В.</i> Закономерности при разрушении силовых маслонаполненных трансформаторов при воздействии внутренней электрической дуги .....	13
---	----

**Секция 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.  
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

<i>Кульгейко М. П., Лепший А. П., Кульгейко Г. С.</i> Распределение магнитного потока в рабочей зоне индуктора для магнитно-абразивной обработки плоскостей .....	19
<i>Стасенко Д. Л., Грищенко М. М.</i> К вопросу оптимизации геометрии регулирующего затвора редукционного клапана гидросистемы .....	22
<i>Кирилюк С. И., Голопятин А. В.</i> Обоснование границ диаметров и частот вращения активатора барабанного типа клавишного соломотряса .....	24
<i>Домасевич В. В., Кульгейко М. П.</i> Формирование рельефа поверхности при алмазном выглаживании упругим инструментом .....	27
<i>Сутормя И. И.</i> Расчет полей давлений в центробежном насосе ПН-40У .....	30
<i>Хиженок В. Ф., Столяров А. И.</i> Численное моделирование напряженно-деформированного состояния эластомерного поглощающего аппарата .....	32
<i>Яцук И. Р., Литвин А. В., Паньков С. Б.</i> Применение комбинированного подхода к синтезу оптимальных конструкций .....	35
<i>Томило В. А., Нестерович М. Л.</i> Теоретическое обоснование изгиба со сжатием упрочненных листовых материалов .....	38
<i>Артемов В. В., Андреевец Ю. А.</i> Имитационное моделирование работы гидропривода питающего аппарата и адаптера комбайна в среде FLUIDSIM .....	41
<i>Матвеевков А. С., Петришин Г. В.</i> Моделирование распределения магнитных полей при магнитно-абразивной обработке цветных металлов .....	44
<i>Бобарикин Ю. Л., Мартьянов Ю. В., Цыганович И. А.</i> Изучение влияния скорости деформации на микротвердость тонкой стальной проволоки .....	47
<i>Попов В. Б., Малащенко В. В.</i> Сравнительный анализ доизмельчающих устройств вальцевого типа кормоуборочных комбайнов отечественного и зарубежного типа .....	49
<i>Попов В. Б., Петух А. А.</i> Сравнительный анализ сепарирующих тракторов картофелеуборочных комбайнов отечественного и зарубежного производства .....	52
<i>Никитенко Д. В., Михайлов М. И., Кафанов А. А.</i> Повышение равномерности фрезерования при вихревой обработке .....	55
<i>Михайлов М. И., Лапко О. А., Хихлуха А. В.</i> Производственные исследования работоспособности напайных резцов при обработке стали 18ХГТ .....	57
<i>Родзевич П. Е.</i> Влияние сжатого слоя растительной массы на критическую силу резания .....	60
<i>Попов В. Б.</i> Изменение нагрузки на поршень гидроцилиндра подъемно-навесного устройства колесного трактора .....	63

---

**Секция 2. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАНОМАТЕРИАЛЫ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**


---

<i>Зерница Д. А., Шепелевич В. Г.</i> Структура и стабильность бессвинцового сплава Zn-10 мас. % Sn, полученного сверхбыстрым затвердеванием .....	67
<i>Поздняков Е. П., Степанкин И. Н.</i> Износостойкость инструментальных сталей У8А и 9ХС .....	70
<i>Степанкин И. Н., Поздняков Е. П., Ковалевич А. В., Коноваленко Н. С., Радионов А. В., Кривенкова А. А.</i> Структура и свойства цементованных слоев сталей 40Х и 42CrMoS4 .....	73
<i>Бобарикин Ю. Л., Пости А. И.</i> Исследование микролегирования стали ниобием взамен ванадия в производстве горячекатаной арматуры .....	77
<i>Плющевский И. Н., Бородавко Е. А.</i> К вопросу о новых материалах .....	80
<i>Галенко Е. Н., Шарко С. А., Серокурова А. И.</i> Изменение морфологии поверхности и оптических свойств наноразмерных слоев золота при варьировании условий получения .....	84
<i>Банний В. А., Царенко И. В., Красюк С. И.</i> Электро- и теплофизические параметры композиционных радиопоглощающих материалов на основе полиэтилена .....	87
<i>Верецагин М. Н., Целуев М. Ю., Целуева С. Н.</i> Модифицирование поверхностных слоев импульсной лазерной обработкой .....	90
<i>Бачко О. П., Пянко А. В., Кубрак П. Б., Алисиенок О. А., Черник А. А.</i> Влияние внедрения наноразмерного диоксида титана на антибактериальные и физико-химические свойства покрытий никель–олово .....	94
<i>Верецагин М. Н., Агунович И. В., Судаков Р. А.</i> Исследование особенностей получения металлических порошков сплава системы Cu–Ni–P–Sn–Pb–Mn–Zn диспергированием струи расплава газовым потоком на поверхность вращающегося кристаллизатора .....	96
<i>Астапенко И. В., Савченко С. А.</i> Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката .....	100
<i>Одарченко И. Б., Жаранов В. А., Прусенко И. Н.</i> Расширенная оценка технологической сложности отливок на основе применения методов нейросетей .....	102
<i>Жаранов В. А., Гордеенко А. Э.</i> Установка слива металла из минераловатных вагранок .....	105
<i>Жаранов В. А., Черняков Ю. Д.</i> Моделирование газовой динамики в металлургических агрегатах с применением параметрических моделей .....	108

---

**Секция 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ,  
МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**


---

<i>Янаков В. П., Lange O.</i> Проблемы тестоприготовления и их решения (аспекты экспериментальных исследований) .....	112
<i>Третьяков А. С., Капитонов О. А.</i> Использование разностных уравнений для работы с системами управления силовым преобразователем на основе микроконтроллеров .....	115
<i>Богданова Н. С., Олизарович Я. М.</i> Интеллектуальная система распознавания и оценки геометрических параметров полимерных волокон .....	118
<i>Косинов Г. П.</i> Моделирование процесса учета лесного хозяйства .....	122
<i>Агаев А., Агаев Р., Абдыев Дж.</i> Проект автоматизации мониторинга системы электронной библиотеки .....	124
<i>Трохова Т. А.</i> Компьютерное моделирование динамических объектов с использованием системы OpenSCAD .....	127
<i>Савельев В. А.</i> Имитационная модель матричного преобразователя частоты по методу пространственно-векторной модуляции .....	129

<i>Кравченко О. А., Котова А. В.</i> Телеграм-бот для поиска маршрута общественного транспорта.....	132
<i>Лебедев П. С., Мурашко В. С.</i> О подходе к автоматизации конструкторской документации на детали станочных приспособлений.....	135
<i>Косинов Г. П., Самовендюк Н. В.</i> Сервис предоставления бесплатного доступа к различным REST API.....	136

---

**Секция 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА  
АВТОМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.  
МЕХАТРОНИКА**

---

<i>Дорощенко И. В., Погуляев М. Н.</i> Стенд для испытания асинхронных электродвигателей после ремонта.....	139
<i>Погуляев М. Н., Дорощенко И. В.</i> Основные энергетические показатели устройства нагружения резервных электрогенераторов.....	141
<i>Вепнер Л. В., Логвин В. В.</i> Обнаружение дефектов подшипников электрических машин с помощью современных методов контроля.....	144
<i>Виноградов Э. М.</i> Микроконтроллерный измеритель давления с USB-интерфейсом.....	146
<i>Крышинёв Ю. В., Запольскі А. Я.</i> Структура і характерыстыкі пераўтваральніка аднафазнай сеткі ў трохфазную для асинхронных рухавікоў.....	148
<i>Сахарук А. В., Иванов С. А.</i> Разработка модуля картографии для приложений, разрабатываемых на основе кроссплатформенного фреймворка Qt.....	151
<i>Сахарук А. В., Демиденко Н. Г.</i> Разработка мобильной версии приложения для управления автоматизированными гидрометеорологическими станциями проекта «THEOREMS-Dnipro».....	154
<i>Литвинов Д. А., Ковалев А. В., Хананов В. А., Владимиров Е. И.</i> Система контроля за стилем вождения и усталостью водителя.....	157
<i>Козусев Ю. А., Котова Ю. Е., Ростокіна О. М.</i> Способ измерения параметров переходного процесса и устройство для его осуществления.....	159
<i>Ковалев А. В., Литвинов Д. А., Хананов В. А.</i> Электронная бортовая система контроля уплотнения основания для вибрационных дорожных катков.....	161
<i>Крышнев Ю. В., Соболев В. И.</i> Аппаратная реализация искусственной нейронной сети на FPGA для распознавания написанных от руки цифр.....	165
<i>Литвинов Д. А., Ковалев А. В., Хананов В. А.</i> Многоэлектродный емкостной датчик уровня.....	167
<i>Щуплов В. В., Кухаренко С. Н., Красовская Н. А.</i> Влияние разрядности аналого-цифрового преобразователя на уровень помехоподавления в приемном тракте внутритрубного поискового устройства.....	170
<i>Кухаренко С. Н., Котова Ю. Е., Ростокіна О. М.</i> Система автономного электропитания для проекта «THEOREMS-Dnipro».....	174
<i>Захаренко Л. А., Крышнев Ю. В.</i> Разработка автономных датчиков технологических параметров с передачей данных по сети «Интернет».....	176

---

**Секция 5. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

---

<i>Погуляев М. Н., Чигринец А. А.</i> Анализ гармонических составляющих выходных напряжения и тока устройства нагружения резервных электрогенераторов.....	179
<i>Аннаев М., Акмурадов Ш.</i> Использование тепла канализационных стоков на нужды отопления студенческого общежития.....	182
<i>Матьякубов А. А., Оразбердиева М. Р.</i> Интенсификация процесса сушки овощей и фруктов с использованием солнечной энергии.....	185

<i>Оразбердиева М., Джембарова Б., Ходжалыев М., Джумагелдиев Д.</i> Особенности использования суспензии хлореллы при хранении плодов.....	187
<i>Сарыев К. А., Алланазаров Н. А., Атаев Э. Б.</i> Цифровая система для проектирования фотоэлектрических солнечных станций .....	189
<i>Сопыева Э. А., Чарыев С.</i> Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена .....	192
<i>Широков О. Г., Алфёрова Т. А., Кунава А. В.</i> Классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности .....	195
<i>Савкова Т. Н., Зализный Д. И., Селиверстов Г. И., Кравченко А. И.</i> Автоматическая система контроля остаточного ресурса светодиодного светильника.....	198
<i>Сейитлиева Т. Г.</i> Мероприятия по повышению надежности работы фототиристорной защиты от дуговых коротких замыканий в ячейках КРУ (КРУН) 6–35 кВ.....	200
<i>Брель В. В., Логвин В. В.</i> Силовой электромагнит для клапана дымоудаления .....	203
<i>Широков О. Г., Алфёрова Т. В., Керус К. В.</i> Цифровые трансформаторные подстанции как средство повышения надежности и эффективности электроснабжения.....	204
<i>Шаповалов А. В., Кидун Н. М., Никулина Т. Н.</i> Экспериментальное исследование работы термосифонов, заправленных хладагентами .....	206
<i>Шаповалов А. В., Заглубоцкий Н. З., Морозова О. Ю.</i> Реконструкция топливного хозяйства Гомельского теплофикационного комплекса .....	210
<i>Шаповалов А. В., Светличный К. А.</i> Практическое применение термосифонных систем с альтернативными источниками энергии .....	212

#### Секция 6. РАЗРАБОТКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

<i>Горбаченко В. С.</i> Разработка устройства для герметизации полированного штока установки штангового глубинного насоса .....	215
<i>Ткачѳв Д. В., Гавриленко А. И., Галко П. М., Баранова Н. О.</i> Инновационный подход повышения эффективности химического воздействия на пласт в условиях месторождений Республики Беларусь.....	218
<i>Жуковский А. М., Малащенко А. И.</i> Оценка целостности цементного камня при проведении гидроразрыва пласта .....	222
<i>Жуковский А. М.</i> Построение геомеханической модели для оптимизации дизайна многостадийного гидроразрыва пласта.....	226
<i>Кудряшов А. А., Цыганков А. О.</i> Повышение нефтеотдачи при термогазовом воздействии на пласт (на примере Вишанского месторождения нефти).....	229
<i>Захария И. Р., Лопушко А. А.</i> Обоснование первоочередных участков для постановки нефтепоисковых работ в пределах южной структурно-тектонической зоны Припятского прогиба .....	232
<i>Кравченко А. Ю., Гутман Р. Е., Жуковский А. М.</i> Разработка рекомендаций для оптимизации бурения месторождения Armadillo .....	236
<i>Чаркина В. Н.</i> Особенности интерпретации данных ГИС по скважине № 40s2 Надвинская. Выбор рационального комплекса ГИС .....	239
<i>Гапоненко С. О.</i> Фотодокументирование керна как этап подготовки керна к лабораторным исследованиям.....	242
<i>Нерезько Е. Н., Гумерова А. Н.</i> Изменчивость фильтрационно-емкостных свойств продуктивных отложений Куршской впадины и ее влияние на дебиты нефти .....	245
<i>Мельникова М. Л., Сердюков Д. В.</i> Применение электрохимически активированной воды с целью увеличения конечного коэффициента извлечения нефти .....	247
<i>Порошин В. Д., Порошина С. Л.</i> Геотехнологические основы изучения и разработки нефтяных месторождений с засоленными коллекторами .....	250

<i>Сошенко А. В., Качура И. В., Семенова В. А.</i> Построение петрофизической модели межсолевых и внутрисолевых отложений Северо-Домановичского месторождения и моделирование интервалов галитизации .....	253
<i>Батманов Дж., Атаев К., Акмурадов Ш.</i> Использование отделенного жидкого конденсата от состава природного газа, применяемого в газотурбинных установках .....	255
<i>Карсеко К. С.</i> Уточнение результатов лабораторных исследований при пав-полимерном заводнении на основе моделирования керновых фильтрационных исследований .....	257
<i>Цагельник А. А., Ходьков Е. Н., Ерошенко А. А.</i> Оценка влияния масштабных эффектов при определении коэффициентов вытеснения нефти водой на полноразмерном керновом материале .....	260
<i>Шенец Д. А., Ерошенко А. А., Даниленко В. В.</i> Новые подходы к изучению керна. Особенности современных методик отбора и подготовки керна к лабораторным исследованиям .....	263
<i>Гутман Р. Е., Драбкин А. В., Шиленкова В. Н.</i> Оптимизация гидроразрыва пласта в наклонных скважинах в условиях расчлененного теригенного коллектора .....	266
<i>Асвинова П. В., Степанкин И. Н., Ткачѳв В. М., Гутман Р. Е., Халецкий А. В., Асвинов Р. В.</i> Определение прочностных характеристик горных пород по результатам индентирования частиц шлама .....	270
<i>Добродеева И. В., Шемлей Н. В., Матвеевко Д. С.</i> Сравнительная характеристика технологических свойств эмульсионных растворов для вскрытия терригенных пород, склонных к осыпанию .....	272
<i>Матвеевко Д. С., Порошин Д. В., Пологеевко В. В.</i> Опыт спуска эксплуатационных обсадных колонн с частичным опорожнением в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» .....	276
<i>Байрамов А.</i> Математическая модель режима температуры хранения нефтепродуктов в резервуарах в условиях Туркменистана .....	281

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

<i>Локтионов А. В., Сидорович А. А.</i> Анализ теории расчета малых колебаний маятника .....	285
<i>Локтионов А. В., Векша И. А., Сидорович А. А.</i> Расчет скорости центра схвата робота в сферической системе координат .....	286
<i>Комнатный Д. В.</i> Сравнительный анализ представления результатов расчета электростатической индукции методом электрических отображений в сфере .....	287
<i>Бельский А. Т., Акулич В. С.</i> Использование заменяющих механизмов при прочностном расчете кулачкового механизма .....	290
<i>Гавриш В. Ю., Асвинова П. В.</i> Функция Грина уравнения Шредингера .....	293
<i>Гавриш В. Ю., Златина В. Ю.</i> Функция Грина уравнения Дирака .....	296
<i>Иноземцева Н. В., Бельский А. Т.</i> Методика расчета напряженного состояния при формировании покрытия на длинномерное изделие в процессе волочения .....	299
<i>Прач С. И., Петрусевич В. А.</i> Исследование применения напорной волоки при мокром волочении проволоки .....	302
<i>Иноземцева Н. В., Солодкин О. В.</i> Аналитическое определение контактных напряжений и тепловыделения при нанесении порошковых покрытий прокаткой .....	304
<i>Великович Л. Л.</i> Соотношение между дискретным и непрерывным в эволюции математических моделей сложных систем .....	306
<i>Лашкевич В. И., Соловцова О. П.</i> Построение численные расчеты интегралов Меллина–Барнса на основе контуров стационарной фазы .....	310
<i>Концевой И. А., Климович В. А.</i> Градиентные свойства температуры на фазовой границе кристаллизации переохлажденного расплава никеля .....	314

<i>Кроль Д. Г., Стельмашинок С. В.</i> Производство энтропии в потоке вязкой жидкости при воздействии внешней силы сопротивления.....	316
<i>Лискович М. И., Максименко Д. А.</i> Теоретическое исследование условий, благоприятно влияющих на образование прочного соединения покрытия и основы в процессе совместной вытяжки .....	320

---

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

---

<i>Лапицкая О. В., Шах А. В.</i> Влияние искусственного интеллекта на CRM-маркетинг .....	323
<i>Карчевская Е. Н.</i> Перспективы развития электронной коммерции на белорусских предприятиях .....	326
<i>Голуб В. А.</i> Система показателей эффективности управления организацией как инструмент выражения ее целей и планирования результатов.....	328
<i>Громыко Р. И.</i> Современный этап реформирования естественных монополий в Республике Беларусь.....	330
<i>Пономаренко Е. П.</i> Совершенствование информационного обеспечения системы управления ликвидностью предприятия.....	333
<i>Минько М. В., Шаповалова К. С.</i> Методы оценки эффективности деятельности технопарков .....	335



**Приветственное слово  
ректора ГГТУ им. П. О. Сухого  
доктора физико-математических наук, профессора  
С. И. Тимошина**

---

**АВИАКОНСТРУКТОР, ОПЕРЕДИВШИЙ ВРЕМЯ\***  
(к 125-летию со дня рождения П. О. Сухого)

XIII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиноведения» (научные чтения, посвященные П. О. Сухому) проводится в год 125-летия со дня рождения выдающегося авиаконструктора Павла Осиповича Сухого.

С Беларусью связаны детство и молодые годы его жизни: родился 22 июля 1895 г. в местечке Глубокое Виленской губернии в семье учителя, учился и окончил гимназию в Гомеле. После окончания гимназии Сухой решает поступать в Московское императорское техническое училище.

Поступив в училище в 1915 г., только в 1921 г., после службы в пулеметной роте, работы учителем математики, он смог продолжить обучение. Трудолюбие и исключительная способность схватывать суть инженерного решения выделяли Сухого из числа студентов. В 1924 г. Андрей Николаевич Туполев приглашает способного студента Сухого, еще не окончившего учебу, работать чертежником в Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ). Под руководством А. Н. Туполева успешно защищает дипломный проект, и в 1925 г. Павел Осипович становится полноправным сотрудником ЦАГИ.

Приступив в конце 1925 г. к созданию нового самолета И-4 (АНТ-5), бригада Сухого первый производственный экзамен сдала успешно. В декабре 1927 г. решился вопрос о запуске самолета в серию на авиазаводе. Павел Осипович Сухой в качестве ответственного технического представителя КБ Туполева руководил серийной постройкой самолета. Скоростной, маневренный, отличавшийся современными формами и изяществом, И-4 получил право на долгую жизнь. Он состоял на вооружении Красной Армии с 1928 по 1933 г. Таким был первый вклад Павла Осиповича Сухого и его товарищей по бригаде в отечественное самолетостроение.

В 1932 г. Павел Осипович назначается руководителем бригады по проектированию и постройке знаменитого впоследствии самолета РД («Рекорд Дальности», АНТ-25). Требование дальности полета РД привело к созданию крыльев необычно большого удлинения, а задача сохранения прочности была блестяще решена размещением бензина в кессоне крыла. На этой машине были успешно совершены даль-

---

\*Кузьмина, Л. Генеральный конструктор Павел Сухой: (страницы жизни) / Л. Кузьмина. – Минск : Беларусь, 1985. – 239 с. ; Режим доступа: [http://history-of-wars.ru/imena\\_v\\_istori/533-pavel-osipovich-suxoj.html](http://history-of-wars.ru/imena_v_istori/533-pavel-osipovich-suxoj.html).

ние перелеты, в том числе через Северный полюс в Америку экипажами В. П. Чкалова и М. М. Громова, и установлены два мировых рекорда дальности без посадок. На базе РД бригада П. О. Сухого сконструировала одномоторный бомбардировщик ДБ-1, а затем двухмоторный ДБ-2, на гражданском варианте которого («Родина») женский экипаж в составе В. С. Гризодубовой, П. Д. Осипенко и М. М. Расковой в сентябре 1938 г. совершил беспосадочный перелет Москва–Керби (Дальний Восток), установив международный женский рекорд дальности.

Еще в середине 30-х гг. возникла идея создания многоцелевого фронтового самолета. Совместить в одном самолете качества штурмовика, ближнего бомбардировщика, истребителя и разведчика чрезвычайно трудно. Именно поэтому было решено объявить конкурс среди самолетостроительных КБ. Главное условие конкурса – не только придать самолету необходимые тактико-технические данные, но и добиться простоты конструкции, при которой можно было бы механизировать процесс производства. В этом конкурсе победил проект, созданный бригадой П. О. Сухого. Это открыло возможность организации конструкторского бюро под его руководством. Был запущен в серию ближний бомбардировщик «Иванов», а с 1940 г. начался массовый выпуск этих самолетов, получивших название Су-2. Самолет Су-2 участвовал в боях Великой Отечественной войны в качестве штурмовика и ближнего бомбардировщика.

В 1940 г. П. О. Сухому, без защиты диссертации, была присвоена ученая степень доктора технических наук.

В трудные военные годы проходили работы по созданию еще более совершенных боевых машин. В 1943 г. за создание штурмовика Су-6 Павел Осипович Сухой удостоен Сталинской премии I степени. А оригинальный по конструкции самолет Су-5 стал предвестником эры реактивной авиации.

В военные и послевоенные годы формировалось не только ядро коллектива КБ Сухого, но и особый, присущий только ему стиль работы. Постоянный поиск новых, необычных решений; решимость идти на риск в применении новейших систем, во имя создания лучшей, устремленной в будущее машины; подлинный энтузиазм, необыкновенная скромность, нежелание выпячивать свои успехи и рекламировать достоинства своих машин; предельно уважительное отношение к пожеланиям и требованиям заказчика; стремление во что бы то ни стало довести машину до совершенства. Этот характерный для «суховцев» стиль складывался не сам по себе, не стихийно, а под влиянием личности главного конструктора, человека необычайно талантливого, обладающего огромной инженерной интуицией, требовательного руководителя и внимательного, порядочного и скромного человека.

Первым реактивным самолетом КБ П. О. Сухого стал созданный в 1946 г. фронтовой истребитель Су-9 с двумя турбореактивными двигателями. Павел Осипович вводит в его конструкцию много новинок: впервые в практике отечественного самолетостроения на нем были применены тормозной парашют для уменьшения пробега при посадке, бустерное управление для уменьшения усилия на ручке управления при больших скоростях полета, катапультируемое сиденье и др. Можно сказать, он весь был соткан из новшеств. Затем создаются истребитель-перехватчик Су-11, первый советский трансзвуковой самолет Су-15, экспериментальный истребитель Су-17. На Су-17 впервые в мире решался вопрос спасения летчика на больших высотах с помощью отделяемой носовой части фюзеляжа вместе с герметичной кабиной. Но самолету, опередившему время, взлететь не удалось из-за ликвидации КБ в 1949 г. Главному конструктору предложили заняться ракетами, а после того, как П. О. Сухой отказался, назначили заместителем А. Н. Туполева.

Во всех работах периода с 1925 по 1953 г. прослеживается незаурядность замысла, уникальность воплощения, обоснованный технический риск. Впервые были сконструированы и применены убирающиеся в полете шасси, гладкая металлическая обшивка, топливные баки-отсеки крыла, катапультируемое кресло летчика, система спасения экипажа в отделяемой кабине, бустер в системе управления, тормозной парашют.

Когда в 1953 г. Павлу Осиповичу Сухому вновь предложили возглавить КБ и передали в его распоряжение производственный коллектив завода № 51, у него уже были готовы проекты новых самолетов. Именно на втором поколении реактивных самолетов наиболее ярко проявился конструкторский талант П. О. Сухого. В 1955 г. поднялся в воздух фронтовой истребитель С-1 и еще через полгода первый советский самолет с треугольным крылом Т-3. В дальнейшем под руководством Павла Осиповича Сухого было создано несколько типов самолетов со многими модификациями, каждый из которых являлся прорывом в отечественной и мировой авиационной науке и технике. Показанные на воздушном параде в 1956 г. самолеты Сухого произвели колоссальное впечатление. Именно тогда в зарубежной печати П. О. Сухого назвали «конструктором, вышедшим из тени». В 1956 г. главный конструктор Павел Осипович Сухой за выдающиеся заслуги в области авиационной техники был награжден орденом Ленина. А через год ему присвоили звание генерального конструктора авиационной техники.

В 1958 г. был запущен в массовое производство самолет Су-7. Летные испытания показали: Су-7 летает быстрее и выше других самолетов. Но военно-воздушные силы страны требовали создания нового самолета со свойствами штурмовика, бомбардировщика и истребителя. Первым советским самолетом с такими данными стал самолет Сухого Су-7Б. В связи с подверженностью военной авиации быстрому моральному старению самолет Су-7Б создавался не только как боевое средство, но и как базовая конструкция для последующей модернизации. В 1965 г. были запущены в серию новые модификации истребителя-бомбардировщика Су-7Б, в конструкции которого впервые удалось объединить необходимые качества. Бесспорно более 20 лет семейство самолетов Су-7Б находилось на вооружении ВВС страны, демонстрируя пример выдающегося долголетия в сверхзвуковой реактивной авиации. За создание фронтового истребителя Су-7Б и нового перехватчика генеральному конструктору Павлу Осиповичу Сухому было присвоено звание Героя Социалистического Труда.

В августе 1966 г. был поднят в воздух первый в СССР экспериментальный самолет С-22И с крылом изменяемой стреловидности, что позволило «управлять аэродинамикой самолета непосредственно в полете», а в августе 1972 г. – первый в мире сверхзвуковой самолет Т-4 с принципиально новой – автоматической – системой управления – новое слово дальней сверхзвуковой авиации.

В последние годы жизни П. О. Сухой работал над созданием высокоэффективных самолетов: истребителя-бомбардировщика Су-17М, фронтового бомбардировщика Су-24, штурмовика Су-25, получившего далее «второе дыхание» за счет заложенных в него широких возможностей модернизации. Был спроектирован высокоманевренный истребитель-перехватчик нового поколения Су-27 (интегральная схема, корневые наплывы, электродистанционная система управления).

П. О. Сухой являлся автором 50 оригинальных конструкций самолетов, из которых 34 были построены и испытаны.

Генеральный конструктор самолетов Павел Осипович Сухой 33 года стоял во главе коллектива ОКБ, под его руководством создавались военные самолеты, из-

вестные во всем мире. Безусловно, он не был провидцем или гениальным одиночкой, самолично создававшим новые самолеты и решавшим весь круг вопросов, возникающих при их создании. Его сила была в коллективе, который он создавал в течение многих лет, в его учениках, на воспитание которых он не жалел времени. Создание такого коллектива – высшее проявление таланта организатора. Большим вкладом П. О. Сухого в развитие отечественной авиации является плеяда воспитанных им известных конструкторов, продолживших начатое им дело. Созданное П. О. Сухим конструкторское бюро своей работой в современных условиях подтверждает зрелость созданной им научной школы.

27 июня 1995 г., в канун 100-летия со дня рождения нашего прославленного земляка, решением Кабинета Министров Республики Беларусь № 333 Гомельскому политехническому институту, получившему впоследствии статус технического университета, было присвоено имя Павла Осиповича Сухого.

Сегодня технический университет имени П. О. Сухого – крупный политехнический вуз, получивший международное признание. Подготовка инженерных кадров осуществляется по таким направлениям, как машиностроение, энергетика, металлургия, промышленная электроника, автоматизация технологических процессов, робототехника, композитные материалы, 3D-технологии, разработка нефтяных и газовых месторождений, экономика, информационные технологии и системы на I и II ступенях высшего образования; в аспирантуре; в институте повышения квалификации и переподготовки кадров.

За годы существования вуза подготовлено свыше 35 тысяч специалистов инженерного дела. Обучение носит практико-ориентированный характер, проводится на современной учебно-лабораторной базе в тесном сотрудничестве с организациями-заказчиками кадров. На предприятиях и в организациях функционируют 20 филиалов профильных кафедр.

Университет аккредитован и как научная организация. Выполняется значительный объем научных разработок по заданиям в Государственных программах научных исследований, а также по договорам с предприятиями и организациями, в том числе с зарубежными; сформировались научные школы по прикладным и фундаментальным исследованиям.

Выражаю уверенность, что конференция пройдет на высоком научном уровне и желаю всем участникам творческих успехов.

С наилучшими пожеланиями,  
ректор *С. И. Тимошин*



## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

УДК 621.3.082.77

### **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ**

**Н. В. Грунтович**

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

Для силовых трансформаторов со сроком службы 35–50 лет требуется пересмотр нормативных документов по проведению технического диагностирования [2]–[4]. Термографическое обследование и измерение частичных разрядов каждые восемь лет или перед капитальным ремонтом – это большой риск пропустить на ранней стадии дефекты и, следовательно, повреждение трансформатора. В работах [5], [6] приводится диагностическая ценность методов контроля и параметров. Авторы статей выполнили ранжирование диагностических параметров: хроматографический анализ газов; степень полимеризации бумажной изоляции; содержание фурановых соединений в масле; поверхностное натяжение масла; ИК-спектрометрия; тепловизионный контроль; частичные разряды; сопротивление короткого замыкания; измерение низковольтных импульсов для оценки динамической стойкости обмоток; измерение амплитудно-частотных характеристик обмоток для оценки пресовки обмоток.

Обращает на себя внимание тот факт, что Б. В. Ванин – один из ведущих специалистов в России по технической диагностике трансформаторов в 2001 г. поставил частичные разряды только на восьмое место [5] по ранжированию информативных параметров дефектов трансформаторов.

После активного использования Российского прибора по измерению частичных разрядов AP-700 [7]–[9] многие авторы ставят частичные разряды на первое место по информативности. Следует иметь в виду, что частичные разряды – это диагностический параметр и фактор, который приводит к повреждению трансформатора. В работе [10] группа авторов считает, что регистрация частичных разрядов в условиях высоковольтных станций и подстанций оказывается малоэффективной. Разработки российских ученых [11], [12] и исследования авторов статьи позволили установить факторы, которые могут выявить частичные разряды:

- пузырьки при локальных перегревах;
- пузырьки при кавитации масла при аварийной работе насоса;
- область двойного электрического слоя на границе масла с другими элементами трансформатора заряженных слоев разного знака, особенно при работе масляных насосов охлаждения;
- микрочастицы на поверхности деталей трансформатора;
- микрочастицы в масле;
- образование потенциала на острых краях электрических элементов;
- наличие микрополостей в бумажной изоляции, которые образуются под воздействием вибрации и влаги.

Для определения нарушения прессовки обмоток и магнитопровода, то все больше применяется методика фирмы «Виброцентр» из-за ее простоты, т. е. изменение общего уровня вибрации бака в диапазоне 10–1000 Гц. Как показали исследования, достоверность этого метода составляет 50–60 %, так как существует много факторов (дефектов), которые вызывают увеличение вибрации в диапазоне больше 1000 Гц.

Автор статьи [13] приводит количество повреждений трансформаторов и экономические потери от их повреждений, потери от перерывов в электроснабжении и суммарные потери, которые оцениваются в диапазоне от 20 до 150 млн долл. США.

**Постановка задачи исследований.** Хроматографический анализ горючих газов в масле и физико-химические испытания масла выполняются в Белорусской энергосистеме каждые шесть месяцев. На сегодняшний день известны следующие методики хроматографического анализа горючих газов: методика МЭК 599; методика ИЕЕЕ; методика Роджерса; методика Шлизенгера, Дорненбурга и Дюваля; российско-белорусская. По мнению рабочей группы СИГРЭ 15.01, ни один из национальных методов не пригоден для универсального применения [14]. В этой связи авторами было проверено около 50 проб трансформаторного масла по российско-белорусской методике и по Дорненбургу. Признаки термических дефектов совпали по двум методикам полностью. Что касается разрядов в масле, то методики показали большие расхождения в результатах при классификации дефектов. Следует отметить, что различают разряды малой и большой мощности и электрическую дугу. Надо полагать, что под воздействием различных разрядов и электромагнитного поля изменяется физико-химический состав трансформаторного масла. Возможно, при длительном воздействии частичных разрядов малой мощности или электрических разрядов эти изменения накапливаются, так как контроль масла выполняется один раз в шесть месяцев, очистка масла проводится еще реже. Необходимо было определить, при каких условиях частичные разряды переходят в электрическую дугу в силовых трансформаторах и изменяется ли физико-химический состав трансформаторного масла под воздействием частичных разрядов.

Исследования российских ученых направлены на моделирование повышенного давления в трансформаторах от дуги, на разработку предохранительных устройств для снятия давления и на разработку системы пожаротушения на основе контроля водорода  $H_2$  и  $CO$ .

**Результаты исследований.** В лабораторных условиях испытание масла проводилось в открытом сосуде. Очень важно было визуально определить момент возникновения электрической дуги и измерить интенсивность развития прибором М4202. Применялись органические примеси – шарики диаметром 1,5 и 3,5 мм (декоративная эпокочва). В качестве металлических примесей применялись стальные шарики диаметром 2,5 мм. Прибором АИД-70М (рис. 1) создавалось напряжение до 70 кВ. Одновременно регистрировался ток утечки между электродами в сосуде. В трансформаторе, где напряженность поля достигает при определенной концентрации зарядов критической величины, начинается ионизация, возникают частичные разряды. В лабораторной установке под воздействием напряженности поля частицы начинали хаотически перемещаться в сосуде. Вначале частичные разряды возникали на стенке сосуда. При дальнейшем увеличении напряжения на приборе АИД-70М микрочастицы соединяются в термоионизированный канал с высокой проводимостью и частичные разряды возникают между микрочастицами по всей длине канала, которые переходят в электрическую дугу. В отдельных экспериментах образовывались два канала высокой проводимости. Если во время эксперимента напряжение на приборе снижали, происходило гашение частичных разрядов и электрическая дуга не возникала.

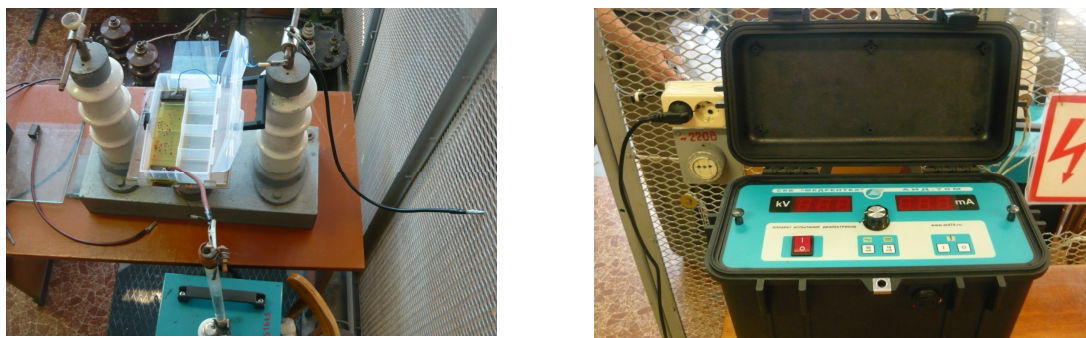


Рис. 1. Высоковольтная испытательная установка АИД-70М

Расстояние между электродами в масле изменялось от 8 до 18 см. В результате проведенных экспериментов выявлено, что на возникновение электрической дуги влияют: расстояние между электродами в сосуде; уровень загрязненности масла; диаметр органических примесей.

В частности, были выявлены следующие закономерности:

- чем меньше расстояние между электродами в сосуде, тем при меньшем уровне напряжения возникали частичные разряды;
- чем больше уровень загрязненности масла, а также диаметр органических примесей, тем при меньшем уровне напряжения возникали частичные разряды;
- чем больше диаметр органических примесей, тем при меньшем уровне напряжения возникали частичные разряды;
- электрическая дуга возникала сразу после образования электропроводящего канала из микрочастиц.

Частичные разряды регистрировались немецким зондом частичных разрядов M4202 (Lemke-5). Из-за большого загрязнения масла уже при напряжении 4 кВ регистрировались частичные разряды более 1000 пКл. После кратковременного воздействия (пять минут) частичных и электрических разрядов была взята проба № 2. После длительного воздействия электрическими разрядами в течение 15 мин взята проба № 3. Хроматографический анализ газов, растворенных в масле, проводился в лаборатории Гомельских электрических сетей на приборе «Кристалл-2000М». Результаты анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты хроматографического анализа трансформаторного масла

Проба трансформаторного масла Р-646	Концентрация растворенных в масле газов, процент от объема						
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Проба № 1 (до эксперимента)	0,00044	0,00019	0,002	0,105	0,00018	0,00007	следы
Проба № 2 (кратковременное воздействие)	0,11058	0,05103	0,065	0,15	0,22905	0,06452	0,24767
Проба № 3 (длительное воздействие)	0,39237	0,17875	0,0178	0,125	0,69757	0,17738	1,22497

Как следует из табл. 1, процентный состав газов значительно увеличился в пробе № 3. Проверим, как изменилось соотношение газов, следуя принятым методикам МЭК и Дорненбурга.

Проба № 2:  $C_2H_2/C_2H_4 = 0,247/0,229 = 1,08$ ;  $CH_4/H_2 = 0,46$ ;  $C_2H_4/C_2H_6 = 3,55$ , что указывает на дуговые разряды.

Проба № 3:  $C_2H_2/C_2H_4 = 1,75$ ;  $CH_4/H_2 = 0,454$ ;  $C_2H_4/C_2H_6 = 3,2$ . В данном случае также наблюдаются дуговые разряды.

Визуально наблюдались разряды высокой энергии, переходящие в электрическую дугу. Прибором регистрировались частичные разряды более 1000 пКл. Хроматографический контроль горючих газов являлся дополнительным методом для оценки влияния частичных разрядов на трансформаторное масло.

Значительно изменилось соотношение газов  $C_2H_2/C_2H_4$ , т. е. увеличилось почти в 1,7 раза. Другие соотношения газов практически не изменились. Можно предположить, что под воздействием частичных и электрических разрядов в масле возникли новые фракции. Чтобы убедиться, что изменились физико-химические характеристики трансформаторного масла, проверялся  $tg\delta$  и проводился анализ ИК-спектр образцов масла. На установке измерения электрических потерь трансформаторного масла «Тангенс-3М» проверялся  $tg\delta$ . Результаты измерений представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Результаты испытания трансформаторного масла до воздействия частичными и электрическими разрядами**

Показатель	Температура $t$ , °C		
	21 °C	70 °C	90 °C
$tg\delta$	0,00058	0,00606	0,0121
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	2,265	2,019	1,878

Таблица 3

**Результаты испытания трансформаторного масла после воздействия частичными и электрическими разрядами**

Показатель	Температура $t$ , °C		
	19 °C	70 °C	90 °C
<i>После первого опыта. Проба № 2</i>			
$tg\delta$	0,0019	0,0139	0,026
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	2,29	1,89	1,77
<i>После второго опыта. Проба № 3</i>			
Мгновенный пробой масла (см. пояснение в тексте статьи)			

После кратковременного воздействия частичных и электрических разрядов  $tg\delta$  увеличился при температуре 19–21 °C в 3,21 раза, а при температуре 70 °C – в 2,3 раза. Измерить  $tg\delta$  масла пробы № 3 не получилось, так как срабатывала защита прибора «Тангенс-3М». Полученные результаты при измерении  $tg\delta$  подтверждают гипоте-



зу о том, что под воздействием частичных электрических разрядов появляются новые фракции в трансформаторном масле.

В результате обобщения вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. При загрязнении трансформаторного масла возникают частичные разряды высокой интенсивности, которые в определенных условиях превращаются в электрические разряды. Установлено, что на возникновение частичных разрядов и на их переход в электрическую дугу влияют: расстояние между электродами; уровень загрязненности масла; диаметр органических примесей.

2. При образовании электропроводящего канала из механических примесей в трансформаторе вдоль данного канала образуется электрическая дуга, которая разрушает трансформатор.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хамитов, И. Ф. Разработка системы непрерывного контроля технического состояния высоковольтного трансформатора / И. Ф. Хамитов, Д. С. Трофимов, Д. Ю. Усатый // Энергетические и электротехнические системы : междунар. сб. науч. тр. ; под ред. С. И. Лукьянова, Е. Г. Нешпоренко. – Магнитогорск, 2019. – С. 354–362.
2. Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы : СТП 33243.20.366–16: Приказ ГПО «Белэнерго» от 12.10.2016 № 268: утв. и с 01.11.2016 введ. в действие. – Режим доступа: <https://energodoc.by/post/view?id=385>. – Дата доступа: 10.12.2018.
3. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2017. – 271 с. – (Высш. образование: Бакалавриат).
4. Анализ проблемных вопросов эксплуатации маслонеполненных трансформаторов / Н. В. Грунтович [и др.] // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 3 (96). – С. 2–6.
5. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б. В. Ванин [и др.] // Электр. станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
6. Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условиях эксплуатации / И. Г. Гун [и др.] // Вестн. Магнитог. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 102–105.
7. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локализации частичных разрядов / А. С. Карандаев [и др.] // Вестн. Магнитог. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 105–108.
8. Николаев, А. А. Внедрение системы мониторинга технического состояния трансформатора 80 МВА энергоблока ТЭЦ ОАО «ММК» // Электротехн. системы и комплексы (ЭСиК). – 2016. – № 2 (31). – С. 52–57.
9. Николаев, Ан. А. Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локализации частичных разрядов / Ан. А. Николаев, Е. А. Храмшина, Ар. А. Николаев // Электротехн. системы и комплексы (ЭСиК). – 2018. – № 1 (38). – С. 48–54.
10. Андриенко, П. Д. Особенности мониторинга технического состояния основной изоляции высоковольтных вводов и трансформаторов тока // П. Д. Андриенко [и др.] // Электротехника та електроенергетика. – 2014. – № 1. – С. 43–44.
11. Расщупкин, М. Д. Акустические сигналы от частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов / М. Д. Расщупкин, Е. Г. Ермаков, С. И. Хренов // Электричество. – 2011. – № 11. – С. 12–16.
12. Карандаев, А. С. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А. С. Карандаев [и др.] // Вестн. Магнитог. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1 (37). – С. 105–108.
13. Бартли, У. Обзор повреждений трансформаторов / У. Бартули // Энергия и менеджмент. – 2011. – № 1. – С. 40–43.

14. Алексеев, Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М. : Изд-во НЦ ЭНОС, 2002. – 211 с.
15. Беллами, Л. Новые данные по ИК спектрам сложных молекул / Л. Беллами. – М. : Мир, 1971.
16. Казицына Л. А. Применение УФ-, ИК-, ЯМР-имасс-спектроскопии в органической химии / Л. А. Казицына, Н. Б. Куплетская – М. : Моск. ун-т, 1979. – 240 с.
17. Юхневич, Г. В. Инфракрасная спектроскопия воды / Г. В. Юхневич. – М. : Наука, 1973. – 208 с.

# СЕКЦИЯ 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

---

УДК 621.923

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ИНДУКТОРА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОСТЕЙ

**М. П. Кульгейко**

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

**А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко**

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

В настоящее время в машиностроении широкое применение находят комбинированные методы финишной обработки деталей машин [1]–[3]. Перспективным методом формирования поверхностного слоя является магнитно-абразивная обработка (МАО). Метод отличается относительной простотой в осуществлении, экологической чистотой, обеспечивает высокое качество микрогеометрии поверхности, формирование остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивления коррозии [4].

Технология МАО плоскостей предполагает применение в основном одной из двух принципиальных схем реализации процесса: обработка ферроабразивным порошком, сформированным магнитным полем в инструмент на торцовой поверхности или периферии магнитного (электромагнитного) индуктора. В многочисленных устройствах первого варианта магнитный поток, выходящий из торцовой поверхности индуктора, проходит через обрабатываемую поверхность детали. Такие схемы применяются при обработке материалов, обладающих как диамагнитными, так и ферромагнитными свойствами.

Схемы МАО плоских поверхностей по второму варианту основаны на формировании режущего инструмента на периферии (цилиндрической поверхности) магнитного индуктора, т. е. рабочий магнитный поток проходит по касательной к обрабатываемой поверхности. Формирование такого инструмента имеет свои особенности и закономерности. Оценка его эффективности и перспектив практического применения требует проведения соответствующих исследований.

Цель работы – исследование особенностей формирования режущего инструмента для обработки плоскостей на основе обобщенной модели магнитного индуктора с наклонным межполюсным пространством.

В основу исследований положена разработка обобщенной модели магнитного индуктора, реализующего схему кинематического резания, основной особенностью которой является уменьшающийся рабочий зазор между индуктором и обрабатываемой поверхностью при ее обработке, а также комплексный анализ различных форм полюсных наконечников, образующих варианты разной конфигурации межпо-

## 20 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

люсного пространства при обеспечении сил магнитного поля, достаточных для производительной обработки.

Обобщенная модель индуктора представляет собой конструкцию, состоящую из двух полюсных наконечников 1 и 2, разделенных немагнитной прокладкой 3 (рис. 1), и характеризуется следующими параметрами:  $d_1$  – диаметр шейки под электромагнитную катушку;  $d_2$  – посадочный диаметр;  $D_1$  и  $D_2$  – наружный и внутренний диаметры магнитного индуктора, соответственно;  $\alpha$  – угол наклона торцевой поверхности полюса к его оси вращения;  $\psi$  и  $\beta$  – внутренний и наружный углы скоса торцевой поверхности полюса соответственно;  $\varepsilon$  – угол заострения торцевой поверхности полюса;  $T$  и  $\omega$  – шаг и угол направления концентраторов магнитного поля соответственно;  $t_n$  – толщина кольцевого полюсного наконечника;  $a$  – нормальный межполюсный зазор, т. е. расстояние между полюсами по нормали к их торцевым поверхностям;  $A$  – осевой межполюсный зазор, т. е. расстояние между полюсами вдоль оси вращения индуктора.

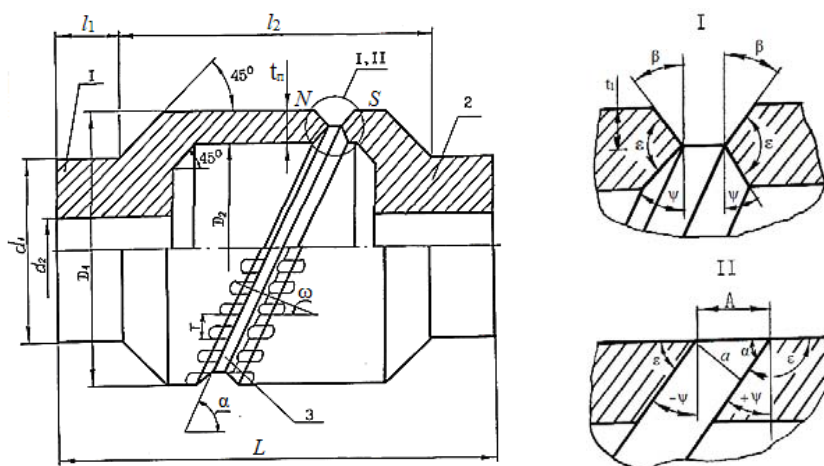


Рис. 1. Обобщенная модель магнитного индуктора

Конструкция данного индуктора обеспечивает формирование абразивного инструмента на цилиндрической поверхности в магнитных потоках выпучивания. Его особенностью является наличие наклонной торцевой поверхности полюсов под углом  $\alpha$  к оси вращения, что обеспечивает при создании магнитного поля между полюсами  $N$  и  $S$  формирование кольцевого наклонного абразивного инструмента также под соответствующим углом к оси индуктора.

В связи с конструктивными особенностями индуктора значительный интерес представляет картина магнитного поля в рабочей зоне при наклонном межполюсном зазоре (рис. 1, тип II). Измерения магнитной индукции потока выпучивания проводились на расстоянии 2,5 мм от периферии индуктора для различных углов  $\alpha$  и зазоров  $a$ . Результаты измерений представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что при  $\alpha = 75^\circ$  магнитная индукция распределяется практически симметрично относительно середины зазора (оси  $Y$ ). Причем с увеличением зазора  $a$  изменение магнитной индукции потока выпучивания  $B_v$  носит такой же характер, что и при  $\alpha = 90^\circ$ , т. е. вначале увеличивается, а затем уменьшается. Этот же вывод относится и к характеру распределения магнитной индукции потока выпучивания, измеренной при  $\alpha = 60^\circ$  и  $\alpha = 45^\circ$  (см. рис. 2, б, в). Абсолютное значение

индукции по мере уменьшения угла  $\alpha$  уменьшается, что связано с соответствующим изменением осевого зазора  $A$ .

С увеличением наклона межполюсного пространства, т. е. уменьшением  $\alpha$ , происходит асимметричное смещение магнитного поля. Смещение максимума магнитной индукции наиболее значимо при  $\alpha = 60^\circ$  и  $45^\circ$  и направлено в сторону острого угла полюсного наконечника. В диаметральной плоскости, где угол заострения  $\varepsilon$  имеет минимальное значение, величина смещения практически равна половине осевого зазора  $A$ . Так как угол заострения  $\varepsilon$  изменяется вдоль окружности межполюсного зазора, то и смещение магнитного поля будет различное в разных диаметральных сечениях индуктора. Следовательно, изменяется положение рабочей области кольца ферроабразивного порошка, что необходимо учитывать при формировании абразивного инструмента.

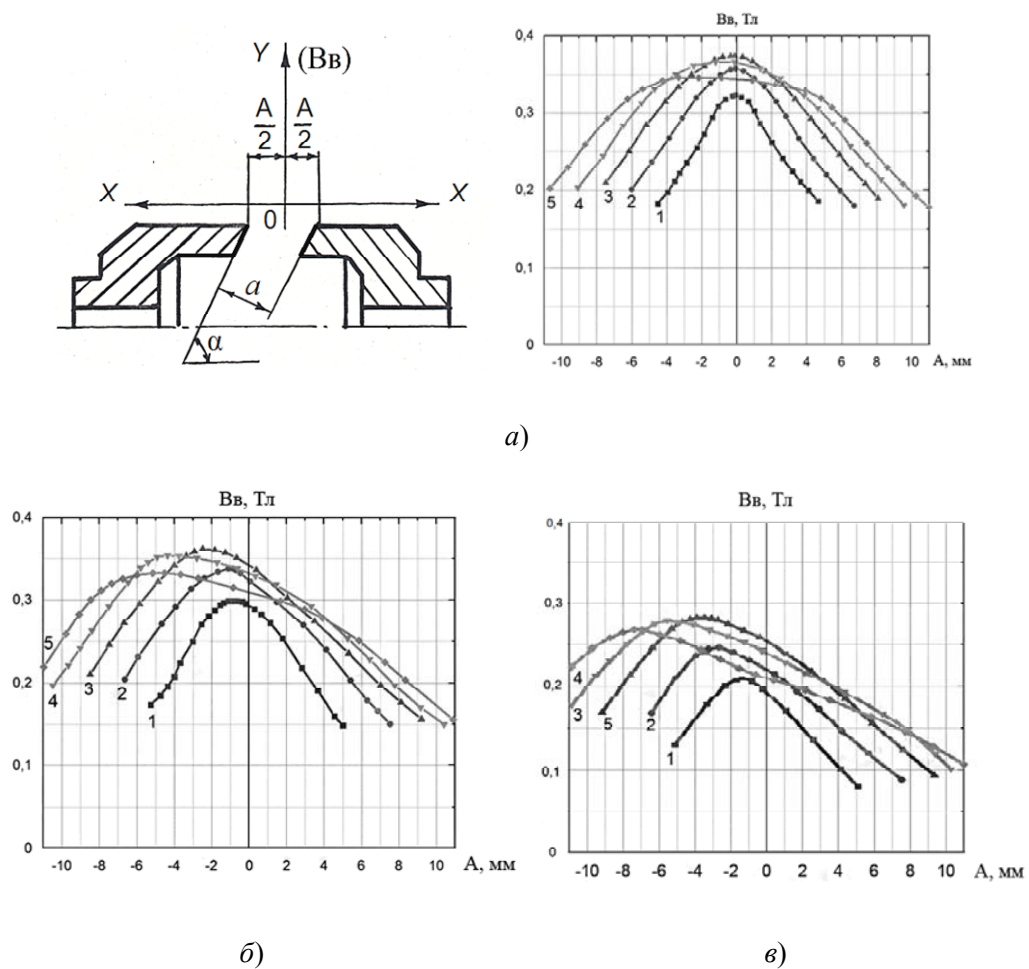


Рис. 2. Распределение магнитного потока выпучивания при наклонном межполюсном пространстве с углом  $\alpha$ :  
 $a - 75^\circ$ ;  $b - 60^\circ$ ;  $v - 45^\circ$  и зазором  $a$ :  
 $1 - 3$  мм;  $2 - 6$  мм;  $3 - 9$  мм;  $4 - 12$  мм;  $5 - 15$  мм

Анализ обобщенной модели магнитного индуктора позволил установить взаимосвязь конструктивных параметров индуктора и их влияние на распределение магнитного поля в рабочей области инструмента. Выявлены особенности и закономерности формирования абразивного инструмента с наклонным межполюсным пространством индуктора.

### Литература

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 376 с.
2. Григорьев, С. Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии / С. Н. Григорьев, Е. В. Смоленцов, М. А. Волосова. – Старый Оскол : ТНТ, 2012. – 280 с.
3. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.] ; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 463 с.
4. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.

УДК 621.521

### **К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЗАТВОРА РЕДУКЦИОННОГО КЛАПАНА ГИДРОСИСТЕМЫ**

**Д. Л. Стасенко, М. М. Грищенко**

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

К современным гидроприводам и средствам гидроавтоматики, имеющим самое широкое применение в различных областях машиностроения, предъявляются требования по обеспечению надежности, быстродействия, устойчивой работы, постоянства контролируемых рабочих характеристик потока, точности срабатывания и т. д. Эти требования обеспечиваются регулирующей гидроаппаратурой, к которой относятся, в частности, предохранительно-переливные и редуцирующие клапаны. Клапаны, как наиболее распространенные гидравлические устройства регулирования потока, входят в состав каждой гидросистемы. Их статические и динамические характеристики существенно влияют на работу всего гидропривода. В эксплуатации встречаются различные типы клапанов, которые отличаются по конструкции, и одним из наиболее перспективных видов редуцирующих клапанов является золотниковый, использующий для уменьшения гидродинамической силы специальные конструкции регулирующего затвора – золотника. Основными преимуществами золотниковых редуцирующих клапанов являются их компактность и разгруженность от осевых сил давления рабочей жидкости, что значительно уменьшает усилие, необходимое для управления затвором.

С целью снижения действующих на редуцирующий клапан сил применяются различные технические решения. Наиболее интересным технологичным решением является изменение геометрии затвора клапана, а именно нанесение на его поверхность различных прорезей (канавок), которые являются дросселирующими, т. е. плавно изменяющими перепадно-расходными параметрами системы.

Цель данной работы – исследование влияния формы дросселирующей канавки золотникового редуцирующего клапана на расходно-перепадные характеристики золотника.

В процессе исследования были рассмотрены следующие типы канавок: «прямоугольник», «треугольные запилы», «конус», «кромка–кромка», «цилиндрические круглые окна», «лыска сплошная».

Из графиков расходно-перепадных характеристик золотникового редуцирующего клапана при рабочем давлении 25, 32 и 50 МПа, представленных на рис. 1–3, видно, что при использовании канавки типа «треугольный запил» перепад давления оказался наименьшим. Это связано с плавным изменением рабочей площади канавки. На других характеристиках перепад давления выше, так как площадь сечения канавок изменяется нелинейно. На рис. 1 из графика расходно-перепадных характеристик при рабочем давлении  $P = 25$  МПа видно, что канавки «лыска сплошная»

и «конус» при увеличении расхода имеют одинаковый перепад давления. При давлении  $P = 32$  МПа (рис. 2) характеристики канавок «лыска сплошная» и «прямоугольник» полностью совпали. Из этих данных можно сделать вывод, что при использовании затвора клапана с такими видами канавок на данном давлении даже при увеличении расхода перепад давления будет одинаковым.

Для анализа потерь давления при использовании затвора клапана с использованием канавки «треугольный запил» при различных рабочих давлениях был построен график функциональной зависимости перепада давления  $\Delta p$  от рабочего давления  $p$  при  $Q = 100$  л/мин.

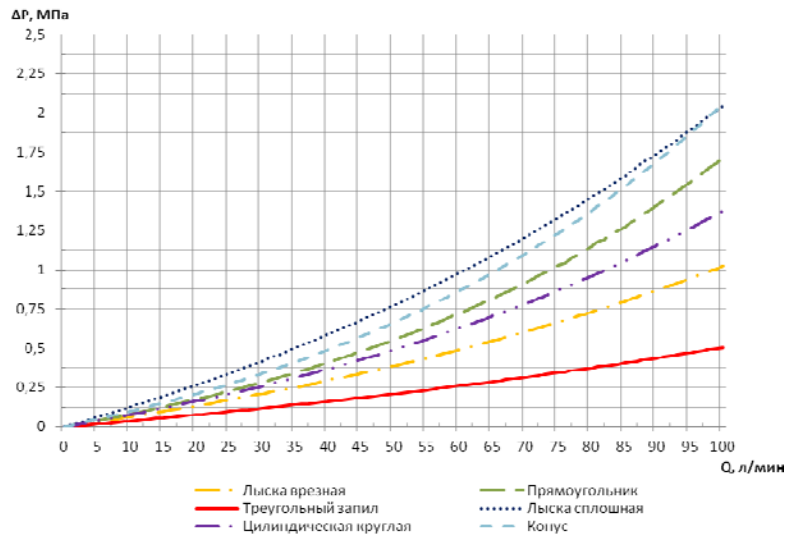


Рис. 1. Расходно-перепадные характеристики  $Q(\Delta p)$  редукционного клапана различными дросселирующими канавками при рабочем давлении  $P_{ном} = 25$  МПа

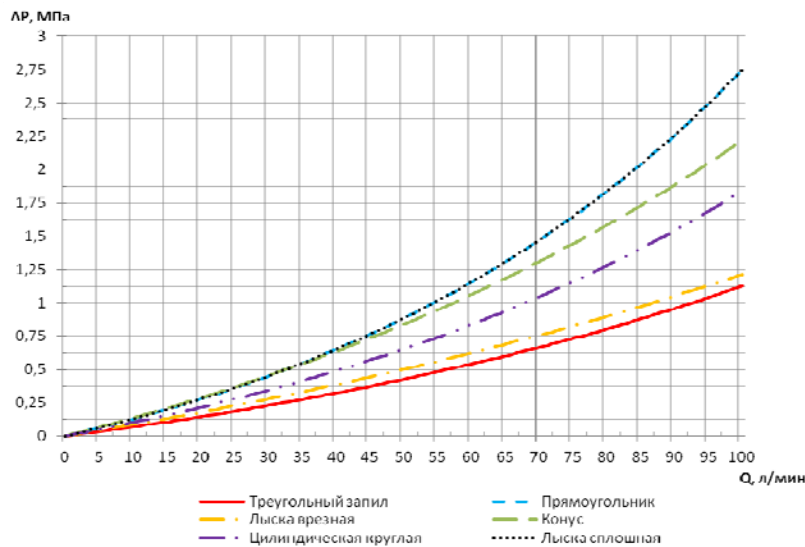


Рис. 2. Расходно-перепадные характеристики  $Q(\Delta p)$  редукционного клапана различными дросселирующими канавками при рабочем давлении  $P_{ном} = 32$  МПа

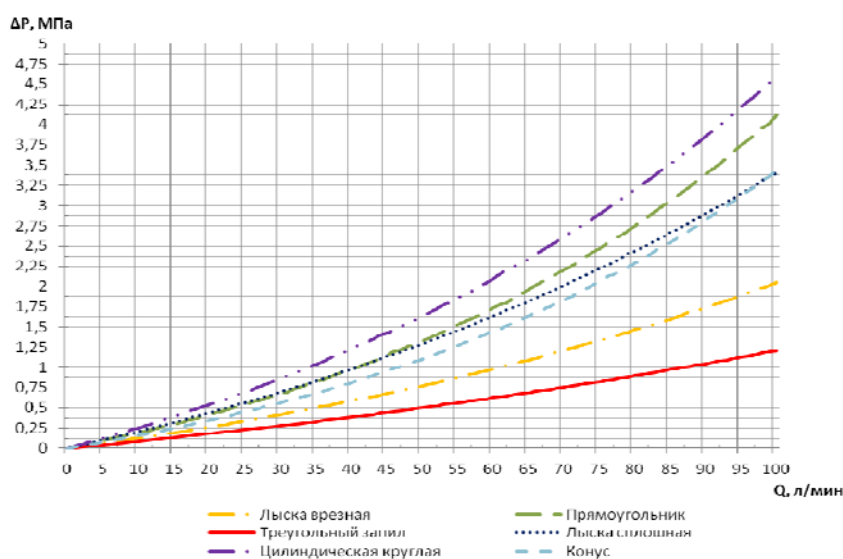


Рис. 3. Расходно-перепадные характеристики  $Q(\Delta p)$  редукционного клапана различными дроселирующими канавками при рабочем давлении  $P_{\text{ном}} = 50$  МПа

Из полученных результатов можно сделать вывод, что канавка «треугольный запил», обладает наиболее оптимальной геометрией формы и больше всего подходит для увеличения плавности хода золотника, что непосредственно приведет к большому снижению гидродинамических сил, а изменение углов канавки приводит к определению точных оптимальных размеров затвора редукционного клапана.

#### Литература

1. Лаевский, Д. В. Конструктивные особенности и моделирование золотникового распределителя с острой кромкой / Д. В. Лаевский, Д. Л. Стасенко, Ю. А. Андреев // Современные проблемы гидропневмосистем машин : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–28 окт. 2011 г. – Минск : БНТУ, 2011. – С. 54–62.
2. Козлов, Л. Г. Исследование влияния угла наклона рабочей кромки золотника на нелинейные характеристики пропорционального распределителя с электрогидравлическим управлением / Л. Г. Козлов, Д. А. Лозинский // Наукові праці ВНТУ. – 2007. – № 1.

УДК 631.3

### ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ ДИАМЕТРОВ И ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ АКТИВАТОРА БАРАБАННОГО ТИПА КЛАВИШНОГО СОЛОМОТРЯСА

С. И. Кирилюк, А. В. Голопятин

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

Установлено, что основными причинами потерь зерна во время уборки урожая являются [1]: отклонения от технологических требований при выращивании зерновых культур и отсутствие научно обоснованной структуры зерновых культур (сортов), обеспечивающих поэтапные сроки их созревания; биологические потери зерна, вызванные особенностями его производства в природно-климатических условиях и фактическими сроками уборки урожая, которые превышают оптимальные агротехнические (уборка



зерновых культур должна проводиться в максимально сжатые сроки: 10–15 дней, далее наступает перестой растений, сопровождающийся ростом биологических потерь); потери зерна за комбайном при проведении уборочных работ, вызванные несовершенством конструкции, неправильными настройками/регулировками и т. д. Следует отметить, что все отечественные зерноуборочные комбайны обеспечивают допустимый уровень потерь зерна. Однако по оценкам ряда специалистов снижение потерь зерна в солому за самоходной молотилкой комбайна (до 0,5 %) может существенно повысить его пропускную способность, а соответственно и производительность.

Опыт использования комбайнов классической схемы свидетельствует, что основная масса потерь при обмолоте приходится на зерно, которое не выделяется из соломистого (грубого) вороха. Это часто наблюдается при уборке высокоурожайных полей или участков с повышенной влажностью и обилием сорняков [2]. Особенно это касается механизмов комбайна, которые сдерживают его производительность и эффективность работы. Клавишные соломотрясы наиболее широко используются в конструкции комбайнов для выделения остатков зерна из соломы. Они не имеют технологических регулировок для повышения производительности и качества работы, так как имеют конструктивные ограничения. Увеличение габаритов соломотрясов технически неоправданно. Поэтому изыскание всех резервов данных устройств и исследование возможностей применения дополнительных приспособлений для активизации процесса сепарации зерна из соломистого вороха в процессе его обработки на соломотрясе является актуальной задачей.

Применяются разнообразные способы решения этой проблемы. Так, анализ аналогов конструкций современных зерноуборочных комбайнов, оснащенных клавишным соломотрясом, показал, что повышение качества сепарации зерна из грубого вороха достигается путем улучшения скважности соломы за счет увеличения количества клавиш соломотряса, введения или увеличения количества активных или пассивных стимуляторов процесса сепарации соломотряса, а также введения дополнительных сепарирующих барабанов с решетчатым подбарабаньем [1]. Однако наиболее перспективным направлением, позволяющим интенсифицировать процесс сепарации грубого вороха, является использование активаторов.

В данной работе проведено теоретическое исследование по определению оптимальных параметров барабанного активатора для клавишного соломотряса. Новизна заключается в возможности повысить производительность и уменьшить потери зерна при очистке вороха на соломотрясе без изменения площади сепарации.

Зерновой ворох после обмолота попадает на соломотряс, совершающий колебательные движения, предварительно перераспределяется: зерно и тяжелые соломистые частицы опускаются вниз и движутся в нижней зоне слоя, а легкие и крупные соломенные частицы перемещаются в его верхней зоне. Двухвальный клавишный соломотряс имеет конструктивные ограничения по производительности. Для сохранения габаритных размеров соломотряса и повышения производительности, а также улучшения сепарации на соломотрясе практикуют установку барабана-активатора.

Не вымолоченные зерна в соломе вытрясти соломотрясами довольно сложно, с учетом того, что солома при уборке зачастую бывает засоренной, влажной и плотной. Для более интенсивного разрыхления соломы над соломотрясами размещается барабан-активатор с управляемыми пальцами. Барабан-активатор позволяет более равномерно распределять солому по всей ширине соломотряса, а также разрывает поток соломы, разрежает плотный слой соломистой массы, тем самым улучшает сепарацию соломы, позволяя остаткам зерна более легко проходить сквозь него, попадая на соломотряс и далее по технологическому тракту в бункер. Максимально эф-

## 26 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

фактивно в этом случае используется длина соломотряса, а солома сохраняет структуру и качество. Регулируя уровень интенсивности работы пальцев, можно быстро реагировать на изменение условий уборки.

Рассмотрим основные параметры барабана-активатора, влияющие на параметры сепарации (рис. 1). Для избежания наматывания соломы на активатор необходимо, чтобы длина окружности барабана-активатора  $L = 2\pi R_a$  была больше максимальной длины стеблей соломы. При длине стеблей 1–1,5 м минимальный радиус  $R_a$  рабочей части барабана-активатора должен удовлетворять условию  $R_a > \frac{L}{2\pi}$ , т. е.  $R_a > 0,16–0,24$  м. На существующих конструкциях комбайнов его принимают несколько выше и равным  $R_a = 0,3–0,35$  м.

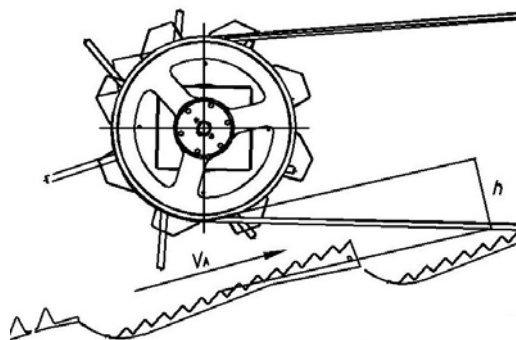


Рис. 1. Схема работы барабана-активатора

Окружная скорость пальцев активатора для обеспечения вспушивания должна быть больше линейной скорости передвижения соломы по соломотрясу. Коэффициент, задающий соотношения этих скоростей, должен удовлетворять неравенству

$$\lambda = \frac{V_a}{V_c} > 1.$$

Линейная скорость пальцев активатора равна  $V_a = \omega_a R_a$ , где  $\omega_a$  – частота вращения барабана-активатора.

Линейная скорость клавиш соломотряса  $V_c = \omega_c R_k$ , где  $R_k$  – радиус кривошипа (коленчатого вала соломотряса), а  $\omega_c$  – частота вращения коленчатого вала соломотряса. Экспериментально установлено, что  $R_k = 50–60$  мм, а  $\omega_c = 20–25$  рад/с. Тогда окружная горизонтальная составляющая скорости клавиш соломотряса равна  $V_c = 1,2–1,5$  м/с. Для большинства комбайнов экспериментально установлена следующая частота вращения барабана-активатора:  $\omega_a = 10–15$  рад/с. Тогда окружная скорость активатора составит  $V_a = 3–4,5$  м/с при радиусе барабана  $R_a = 0,3$  м. Таким образом, коэффициент соотношения скоростей для большинства комбайнов будет находиться в диапазоне  $\lambda = 2,5–3$ . Чем больше коэффициент  $\lambda$ , тем более разреженным оказывается слой соломы и тем легче зерну пройти сквозь этот слой и попасть на решета. Чем больше толщина подающегося слоя хлебной массы, тем выше должен быть этот коэффициент. Сдерживающим фактором при увеличении  $\lambda$  явля-

ется риск наматывания соломы на активатор. Еще одним существенным фактором, влияющим на интенсивность очистки, является расстояние между клавишами соломотряса и барабаном-активатором  $h$ . При увеличении толщины хлебной массы для более качественной сепарации целесообразно увеличивать величину  $h$ . Этот зазор должен иметь возможность изменяться желательным образом в автоматизированном режиме в привязке к частоте вращения барабана. Для большинства комбайнов данный зазор находится в пределах  $h = 70\text{--}120$  мм.

Применение барабана активатора позволяет повысить пропускную способность клавишного соломотряса без изменения его габаритных размеров. Это позволяет устанавливать его на существующие машины без существенного изменения конструкции. Но для эффективной его работы при изменении толщины слоя соломы необходимо иметь возможность более тонко регулировать кинематические параметры работы барабана, такие как окружную скорость, радиус и зазор между барабаном и соломотрясом для установки оптимальных параметров в заданных условиях уборки.

#### Литература

1. Липская, В. К. Экономическая эффективность применения зерноуборочных комбайнов с активаторами соломотряса / В. К. Липская, А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2017. – № 2. – С. 123–126.
2. Ковалевский, В. Ф. Оптимизация конструкции и выбор параметров пружинно-пальцевого активатора соломотряса зерноуборочного комбайна / В. Ф. Ковалевский, С. В. Курзенков, А. В. Клочков // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2017. – № 1. – С. 109–113.

УДК 621.787

### **ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ УПРУГИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

**В. В. Домасевич**

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

**М. П. Кульгейко**

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

При реализации технологии алмазного выглаживания актуальной задачей является обеспечение стабильности технологических факторов и режимов процесса. Формирование поверхностного слоя при алмазном выглаживании сопровождается двумя нестационарными периодами, характеризующимися нестабильностью условий деформирования поверхности. Это начальный период обработки, когда инструмент вступает в контактное взаимодействие с обрабатываемой поверхностью до стабилизации условий контактирования, и конечный период, когда инструмент выходит из контакта с поверхностью детали.

Цель исследования – определение деформационной характеристики формирования поверхностного слоя с учетом нестационарных периодов процесса обработки.

При обработке упругим инструментом силовой режим задается путем назначения силы обработки, т. е. заранее устанавливают радиальную силу, с которой инструмент прижимается к обрабатываемой поверхности.

В начальный период выглаживания сферический наконечник при радиальной подаче выглаживателя внедряется в обрабатываемую деталь и образует на поверхно-

сти отпечаток в виде пластически деформированной канавки (рис. 1, положение 1). Кривизна профиля канавки зависит от профиля сферического наконечника выглаживателя. Металл из канавки выдавливается в боковые наплывы  $AB$  на поверхности детали (положение 1). Передний и задний углы выдавливания равны  $\varphi = \varphi_1$ . После включения продольной подачи выглаживатель на цилиндрической поверхности детали образует след в виде винтовой поверхности с шагом, равным величине подачи  $S$ . Так как величина подачи значительно меньше ширины канавки  $2a$ , то при выглаживании происходит многократное перекрытие следов  $2a/S$  раз.

В результате продольной подачи изменяется характер деформации поверхностного слоя. Площадь контакта выглаживателя с деталью снижается за счет уменьшения заднего угла охвата  $\varphi'_1$ . Это приводит к увеличению внедрения выглаживателя в деталь (положение 2). Но при этом со стороны невыглаженной поверхности увеличивается валик деформированного металла  $h_b$  и передний угол охвата  $\varphi'$  (положение 3). Увеличивающийся объем выдавленного в волну металла вызывает рост площади контакта и сопротивление вдавливанию. Это постепенно замедляет и затем приостанавливает углубление выглаживателя в деталь на участке  $BC$  (положение 4).

Дальнейший рост волны металла приводит к постепенному отжиму выглаживателя на участке  $CD$  (положения 4–7). Уровень выглаженной поверхности поднимается и практически находится на уровне исходной поверхности, разница составляет десятки микрометров. Выдавленная волна металла достигает максимального объема и в дальнейшем сохраняет постоянную величину (положения 7–11), которая сформировалась на заходном участке  $BCD$  (положения 1–7).

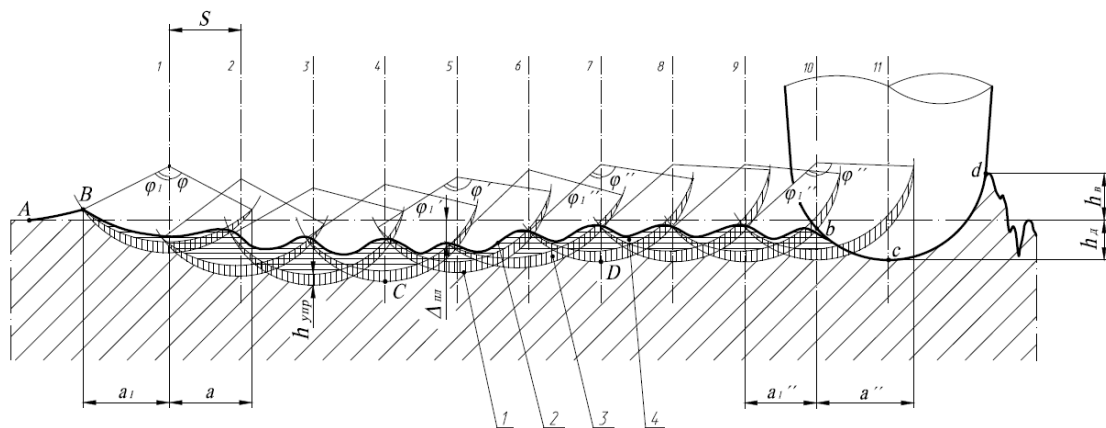


Рис. 1. Схема деформации поверхности при выглаживании упругим инструментом:

- 1 – профиль следа движения выглаживателя; 2 – фактический профиль выглаженной поверхности; 3 – упругое восстановление поверхности;
- 4 – пластическое искажение профиля

В результате стабилизации процесса углы вдавливания принимают постоянные значения: передний угол увеличивается до значения  $\varphi''$ , а задний  $\varphi'_1$  изменяется незначительно. Контакт выглаживателя с обрабатываемой поверхностью происходит по дуге  $bcd$  (положение 11).

В результате пластического деформирования происходит сглаживание исходных неровностей и образование нового микрорельефа поверхности со значительно

меньшей высотой неровностей  $Rz_b$ . Размер детали уменьшается на величину остаточной деформации  $\Delta_{пл}$ . Возможная длина заниженного участка поверхности практически может составлять до 2 мм при обработке твердых материалов и до 3 мм при обработке мягких материалов. Выход размера за пределы допуска даже на небольшой длине может привести к нарушению работоспособности сборочного соединения. В определенных условиях существенное влияние оказывает нестабильность геометрии, в частности, перепад размеров в пределах рабочего участка поверхности, например, при обработке подманжетных шеек валов, работающих в условиях гидродинамического трения.

Второй нестационарный период процесса выглаживания наблюдается на конечном участке обработки при выходе инструмента из контакта с деталью. Схема образования и форма переходного участка на выходе инструмента зависит от конструктивного выполнения торцевой части обрабатываемой поверхности.

При выглаживании поверхности с открытым торцом, т. е. при обработке «напроход», началом участка с отличающимся рельефом будет область контакта индентора с поверхностью, когда инструмент еще находится на некотором расстоянии от кромки детали, а валик металла, перемещающийся перед индентором, начинает выходить на кромку (рис. 2). Здесь валик металла деформируется, часть его перемещается на торец детали, площадь контакта, а следовательно, и сила сопротивления, уменьшается. Происходит нарушение силового равновесия в системе «индентор – поверхность». В результате выглаживающий наконечник углубляется больше в материал детали, чем на основном участке обрабатываемой поверхности. Характер дальнейшего углубления наконечника определяется величиной натяга, свойствами обрабатываемого материала, силой выглаживания и другими параметрами и режимами процесса обработки.

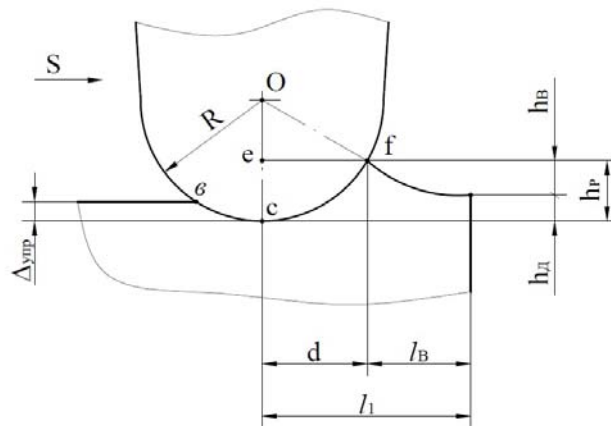


Рис. 2. Схема к расчету переходного участка на выходе инструмента

Максимальная длина переходного участка  $l_1$  (см. рис. 2) с заниженным диаметральной размером зависит от радиуса  $R$  рабочей части выглаживателя и длины волны  $l_b$  материала детали, образованной движением подачи  $S$  инструмента, и может составлять около 0,8 мм для твердых и 1,6 мм для мягких материалов.

При выглаживании поверхностей с закрытым торцом, т. е. при обработке «в упор», также образуется переходный участок, длина которого определяется аналогично. Только в отличие от поверхностей, обработанных «напроход», в этом

случае имеет место увеличение диаметральных размеров. На поверхности остается волновой валик металла *afc* (см. рис. 2). Его высота с учетом исходных микронеровностей составляет до 11 мкм – для твердых и до 17 мкм – для мягких материалов соответственно.

Переходные участки поверхности в большинстве случаев допустимы и не влияют на эксплуатационные свойства деталей машин и их работоспособность. Однако такие дефекты поверхности имеют существенное значение при изготовлении, например, золотниковых и плунжерных пар и других прецизионных деталей гидравлических машин.

В результате исследования получены следующие результаты. Физическая модель деформационно-силового воздействия инструмента на деталь свидетельствует о наличии нестационарных периодов формирования поверхности при алмазном выглаживании упругим инструментом. Нестабильность параметров контактного взаимодействия обуславливает вероятность образования дефектных участков на обработанной поверхности. Отклонение свойств поверхностного слоя на переходных участках следует учитывать при проектировании технологического процесса отделочно-упрочняющего выглаживания упругим инструментом.

УДК 614.8:621.9

#### РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ДАВЛЕНИЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ ПН-40У

И. И. Суторьма

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

Методика математического моделирования, предложенная в работе [1], была разработана на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных типа Навье–Стокса, замыкаемых уравнением неразрывности потока.

При этом указанная система дифференциальных уравнений рассматривается в рамках подхода Эйлера с осреднением по Рейнольдсу и имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0;$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = S_i;$$

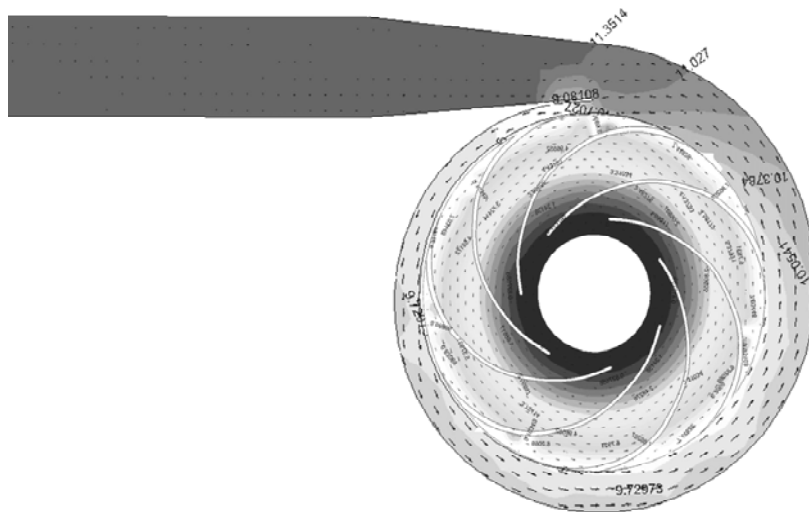
$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P) u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_H.$$

Сущность методики состоит в том, что течение жидкости в полости центробежного насоса носит турбулентный характер и формируется в результате вращения рабочего колеса с некоторой угловой скоростью  $\Omega$ .

В качестве численного метода решения в указанной работе использовался метод конечных объемов [2]. С целью дискретизации по пространству вся расчетная область покрывается расчетной сеткой, грани ячеек которой параллельны координатным плоскостям, используемой в расчете декартовой глобальной системы коор-

динат модели. Ячейки расчетной сетки имеют форму параллелепипедов. Область, в которой строится сетка, также имеет форму параллелепипеда. Расчеты проводятся только в ячейках, попавших в расчетную область, т. е. в пространство, заполненное в соответствии с постановкой задачи текучей средой. Значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек, а не в узлах расчетной сетки, как в методах конечных разностей. Такой метод носит название метода конечных объемов.

Расчеты проводились для подач насоса ПН-40У 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 л/с.



*Рис. 1. Распределение изолиний давления по сечению центробежного насоса*

На рис. 1 представлены результаты расчета при подаче на выходе 5 л/с. Из рисунка видно, что с увеличением расхода на выходе насоса давление уменьшается. Распределение давлений от центра к периферии – относительно равномерно. В результате действия центробежных сил давление увеличивается в направлении от центра к периферии рабочего колеса.

После входа в диффузор выпускного патрубка давление увеличивается. При расходах 5–15 л/мин на краях лопастей рабочего колеса наблюдаются локальные области повышения давления.

#### Литература

1. Суторьма, И. И. Математическая модель для исследования центробежных пожарных насосов / И. И. Суторьма, А. В. Лифанов // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : ГИИ МЧС Респ. Беларусь, 2008. – С. 75–76.
2. COSMOSFloWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. – СПб., 2005.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛАСТОМЕРНОГО ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА

В. Ф. Хиженок, А. И. Столяров

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

Железнодорожные вагоны и локомотивы для ослабления воздействий продольных ударов оборудуются поглощающими аппаратами (ПА) автосцепного устройства [1]. В настоящее время к наиболее перспективным ПА относятся аппараты, в котором в качестве рабочего элемента используется объемно сжимаемый высоковязкий полимер (эластомер). Эластомер, обладая высокой вязкостью, одновременно может выполнять функцию упругого и демпфирующего элемента. Сжимаемость материала в замкнутом объеме достигает 15–20 % при давлении 250–500 МПа. Это позволяет использовать его как гидропружину в режиме квазистатического сжатия, а применение различных видов дросселирования дает возможность значительно повысить силу сопротивления амортизатора при больших скоростях сжатия аппарата. Амортизаторы, использующие эластомеры, при равных габаритных размерах относительно других аппаратов имеют высокую энергоемкость при сравнительно простой конструкции. В то же время высокие давления требуют обеспечения прочности рабочих цилиндров и герметичности конструкции.

Целью данной работы было исследование влияния конструктивных параметров ПА на его напряженно-деформированное состояние. Расчет напряжений и деформаций проводили с помощью метода конечных элементов.

На рис. 1 показана конструкция ПА, в поршне 4 которого выполнены дросселирующие отверстия 6.

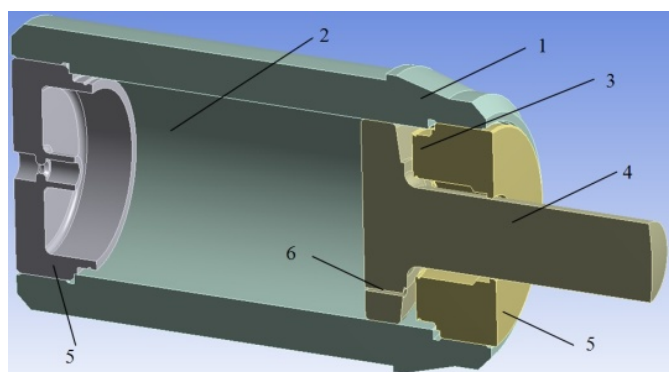


Рис. 1. Физическая модель поглощающего аппарата:

1 – цилиндр; 2 – камера сжатия; 3 – камера расширения;  
4 – шток с поршнем; 5 – крышки; 6 – дросселирующие отверстия

Материал элементов поглощающего аппарата: плунжера, штока и крышек – сталь 40ХС. Физико-механические свойства стали 40ХС: модуль упругости  $E = 2,19 \cdot 10^5$  МПа; плотность  $\rho = 7740$  кг/м<sup>3</sup>; предел прочности  $\sigma_b = 1220$ – $1670$  МПа, условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 1080$  МПа.



Свойства эластомера были приняты следующими: плотность  $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ ; динамическая вязкость  $\mu_0 = 3000 \text{ Па} \cdot \text{с}$  [2].

Для определения динамической вязкости была принята реологическая модель Кросса [3]:

$$\mu^* = \frac{\mu_0}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^n},$$

где  $\lambda$  – параметр, имеющий размерность время,  $\lambda = 0,3 \text{ с}$ ;  $n$  – показатель степени,  $n = 0,7$ .

Расчет напряжений и деформаций, возникающих в деталях поглощающего аппарата, проводили для следующих конструктивных вариантов: вариант 1 – поршень с тремя цилиндрическими отверстиями, вариант 2 – с тремя и вариант 3 – с четырьмя тангенциальными каналами. Для вариантов 1–3 варьировали значение диаметра дроссельных отверстий: 6 мм (а), 6 мм (б) и 7 мм (в) (рис. 2).

Расчет напряженного состояния проводили для условий моделирования соударения вагонов на сортировочных горках при следующих условиях начальной скорости вагона-бойка – 12 км/ч (2,78 м/с). Инерционность вагона-бойка моделировали в виде присоединенной массы по отношению к штоку поглощающего аппарата.

На рис. 2 и 3 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в поршне со штоком и крышке корпуса ПА.

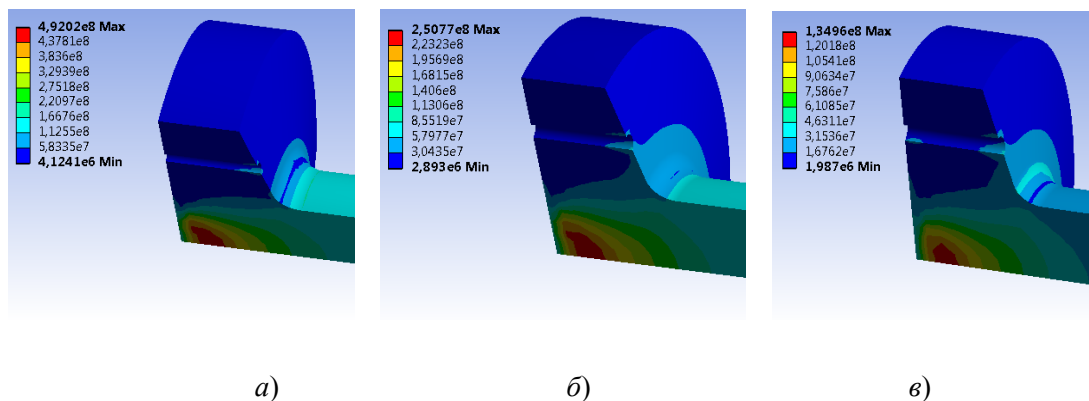


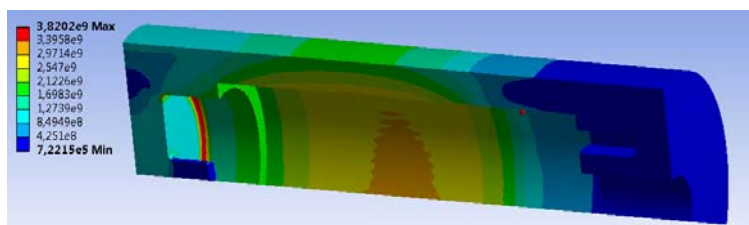
Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в поршне для расчетного варианта 1, МПа: а – диаметр отверстий 5 мм; б – 6 мм; в – 7 мм

Расчеты показали, что наибольшее значение напряжений наблюдается в деталях ПА вариантов конструкций 2 и 3: для плунжера напряжения локализованы в глухой крышке, для поршня со штоком – в галтели. Это связано с тем, что в этих вариантах конструкций дроссельные каналы обладают значительным гидравлическим сопротивлением, что приводит к повышению давлений в камере сжатия ПА. Полученные значения напряжений значительно превышают предел прочности стали, используемой для изготовления деталей ПА.

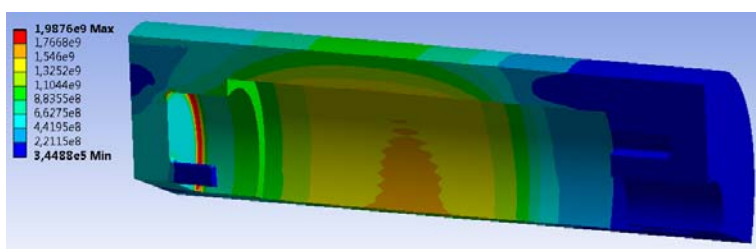
Эквивалентные напряжения в деталях ПА меньше предела прочности стали (1500 МПа) наблюдаются только для варианта 1 с диаметром дроссельных отверстий 7 мм. Следовательно, диаметр дроссельных отверстий в поршне не должен

### 34 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

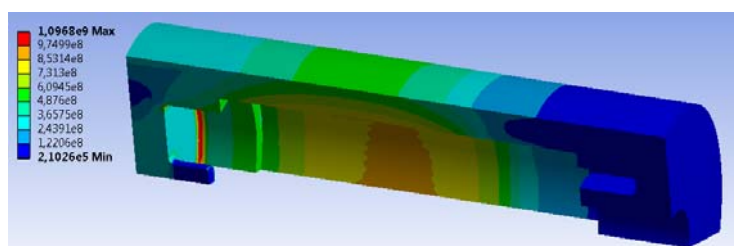
быть меньше данного значения (при принятой величине и законе изменения вязкости модельного эластомера), чтобы не создавать значительное сопротивление движению поршня со штоком.



а)



б)



в)

Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в цилиндре и крышках для расчетного варианта 1, МПа:  
а – диаметр отверстий 5 мм; б – 6 мм; в – 7 мм

Учитывая, что напряжения в деталях ПА по варианту 3 выше предела прочности, можно сделать вывод, что предпочтительным является вариант конструкции поршня с дроссельными каналами с уменьшенным гидравлическим сопротивлением.

#### Литература

1. Манашкин, Л. Гасители колебаний и амортизаторы ударов рельсовых экипажей / Л. Манашкин, С. Мямлин, В. Приходько. – Днепропетровск : ДИИТ, 2007. – 196 с.
2. Приемочные испытания поглощающего аппарата класса Т2 ПМКЭ-110 / Б. Г. Кеглин [и др.] // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2007. – № 4 (16). – С. 50–58.
3. Матвеевко, В. Н. Вязкость и структура дисперсных систем / В. Н. Матвеевко, Е. А. Кирсанов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. – 2011. – Т. 52, № 4. – С. 243–276.

УДК 621-047.58:004

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА К СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**И. Р. Ящук, А. В. Литвин, С. Б. Паньков**

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Стремительное развитие технологий, в частности технологии индустрии 4.0 (машинное обучение, большие данные, облачные вычисления, аддитивное производство, цифровое клонирование и т. д.), порождает их симбиоз с другими отраслями, в результате чего создается современный продукт. По этим причинам возникает актуальная задача создания новых и совершенствования существующих методов поиска инженерных решений, которые позволят эффективно решать задачу синтеза оптимальных конструкций с применением современных технологий. Именно на стыке машиностроения с машинным обучением сгенерировался современный подход к решению задач изобретательства. В основе предложенного комбинированного подхода к синтезу инженерных решений заложенный классический метод морфологического исследования и искусственная нейронная сеть.

Искусственные нейронные сети стали активно использовать в медицине, экономике, производстве, робототехнике и многих других областях науки и техники для решения задач, связанных с кластеризацией, прогнозированием, классификацией, аппроксимацией, распознаванием образов и т. д. [1]. Применение нейронных сетей в задачах технического творчества обеспечит процесс синтеза инженерных решений интеллектуальной составляющей и позволит расширить технический уровень разработанных конструкций, сократив при этом время их проектирования.

Получение оптимального синтезированного технического решения заключается в выявлении и устранении конструктивно-функциональной проблемы существующей конструкции на основе поиска наилучшего решения из множества альтернатив. Оптимальная конструкция – это техническое решение, которое сохраняет или улучшает характеристики существующей конструкции или синтезирует новую, на основе предварительно заявленных требований [2]. Общий подход к синтезу инженерного решения на основе эвристического метода морфологического исследования приведен на рис. 1.

Как показывает практика, при создании новых технических решений использование только эвристических методов является не всегда целесообразным, поскольку инженер не может решать и моделировать задачи высокой сложности без использования машинной поддержки. Поэтому основным недостатком данного подхода при проектировании оптимальных машиностроительных конструкций является большое количество вариантов реализации и их множество альтернатив [3].

Так, для решения данной проблемы предлагается комбинированный подход к синтезу инженерных решений, в основе которого заложенный классический метод морфологического анализа и синтеза для формирования множества альтернатив, а также искусственная нейронная сеть – для проведения математических расчетов и формирования рекомендации оптимальной конструкции.



Рис. 1. Общий подход к синтезу решений на основе эвристического метода

Структурно-функциональная модель синтеза инженерных решений на основе предложенного комбинированного подхода приведена на рис. 2.

Декомпозиция данной модели позволяет выделить пять ключевых этапов:

1. Постановка задачи – формирование первоначальной цели или постановка проблемы, с помощью которых отражаются основные требования к проектируемой конструкции.

2. Морфологическое исследование – проведение морфологического анализа и синтеза, при которых осуществляется построение дерева целей, формирование морфологической таблицы и заполнение ее альтернативами.

3. Формирование и структуризация альтернатив – определение множества альтернативных вариантов и основных критериев для выбора из них наиболее подходящих. На этом этапе проводится математическая обработка данных с целью уменьшения выборки альтернатив, отсева несовместимых или менее подходящих вариантов технического решения.

4. Оценка альтернатив – проведение оценки и выбор подходящих альтернатив. Оценка осуществляется в соответствии классифицированных функциональных и конструктивных признаков на основе числовых значений, отражающих качество альтернатив по выбранным критериям.

5. Решение задачи – анализ и интерпретация полученных результатов. Осуществляется проверка на соответствие полученных решений начальной задаче, если решение оптимальное – оно будет рекомендовано пользователю, если нет – состоится перебор других альтернатив.

Использование комбинированного подхода к синтезу оптимальных конструкций, в основе которого лежит современная технология нейронных сетей, в задачах изобретательства, поможет инженерам:

- оптимизировать процесс проектирования новых, более адаптированных и универсальных технических решений;
- получить экспертную поддержку принятия решения на основе анализа множества альтернатив с возможностью адаптации к конкретной задаче;
- сократить время на обработку большого количества информации;
- провести сложные математические расчеты.

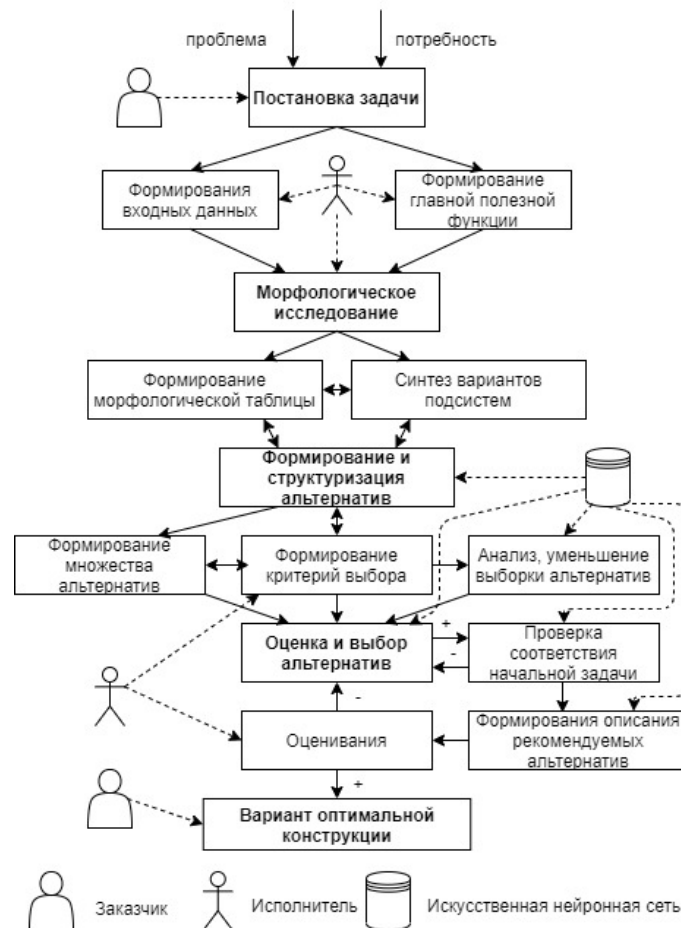


Рис. 2. Структурно-функциональная модель синтеза инженерных решений на основе комбинированного подхода

Представленные результаты работы будут использованы в дальнейших исследованиях с целью разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений, для решения задач синтеза инженерных конструкций в машиностроении.

#### Литература

1. Литвин, О. В. Аналіз передумов застосування нейронних мереж при синтезі конструкцій в машинобудуванні / О. В. Литвин, І. Р. Яшук, С. Б. Паньков // Наукові нотатки. – 2018. – № 64. – С. 92–98.
2. Андрейчиков, А. В. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике: Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций : учеб. пособие для вузов / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – 2013. – С. 304.

3. Ящук, И. Р. Синтез компоновок зажимных патронов эвристическими методами с использованием нейронных сетей / И. Р. Ящук, С. Б. Паньков, А. В. Литвин // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 40–42.

УДК 621.98.04

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИЗГИБА СО СЖАТИЕМ УПРОЧНЕННЫХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. Томило, М. Л. Нестерович

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

При изготовлении кузовов бронированных автомобилей часто находят применение упрочненные листовые материалы. Их особенность состоит в том, что они имеют высокую твердость, предел текучести  $\sigma_T$  и предел прочности  $\sigma_0$ . Однако в большинстве случаев увеличение прочности материала сопровождается снижением его пластических свойств. В этой связи, упрочненные листовые материалы плохо поддаются операциям холодной штамповки. При изгибе таких листовых материалов имеет место образование трещин вдоль линиигиба.

Для предупреждения образования трещин вдоль линиигибки возможно применять силовую интенсификацию. В этом случае изменяется механическая схема деформации, что возможно при нагружении очага деформации дополнительными видами нагрузок. Так, один из способов силовой интенсификации при изгибе – сжатие с торцов заготовки. В результате сжатия нейтральный слой в заготовке становится фиктивным и перемещается ближе к наружной поверхности заготовки [1]. Схема напряженного и деформированного состояния при изгибе со сжатием показана на рис. 1.

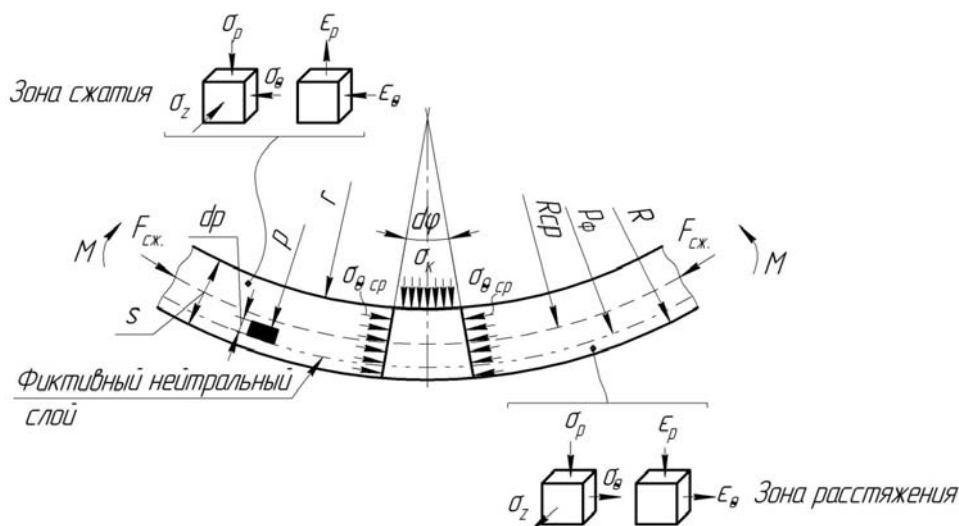


Рис. 1. Схемы напряженного и деформированного состояний при изгибе со сжатием

После совместного решения уравнения пластичности и уравнения равновесия получаем выражения для распределения напряжений. Для зоны сжатия:

$$\begin{cases} \sigma_p = -\sigma_T \ln \frac{\rho}{r} + \sigma_k; \\ \sigma_\theta = -\sigma_T \left( \ln \frac{R}{\rho} + 1 \right) + \sigma_k. \end{cases} \quad (1)$$

Для зоны растяжения:

$$\begin{cases} \sigma_p = -\sigma_T \ln \frac{R}{\rho}; \\ \sigma_\theta = \sigma_T \left( 1 - \ln \frac{R}{\rho} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sigma_k$  – контактные напряжения со стороны пуансона, необходимые для соблюдения условий равновесия.

С учетом равенства тангенциальных напряжений для зоны растяжения и сжатия положение нейтрального слоя можно найти по формуле [1]:

$$\rho_\phi = \sqrt{Rr \exp\left(\frac{\sigma_k}{\sigma_T}\right)}. \quad (3)$$

Связь между сжимающими напряжениями  $\sigma_{\text{оср}}$  и напряжениями  $\sigma_k$ :

$$\sigma_k = \sigma_{\text{оср}} \frac{s}{r}. \quad (4)$$

Если проанализировать формулы (3) и (4), то можно сделать вывод, что с ростом сжимающих напряжений  $\sigma_{\text{оср}}$  радиус фиктивного нейтрального слоя также будет изменяться в большую сторону и при достижении значения  $\sigma_{\text{оср}} = \frac{\sigma_T r}{s} \ln \frac{R}{r}$  выйдет на наружную поверхность заготовки, а зона растяжения будет отсутствовать. В результате изгиб будет происходить только с напряжениями сжатия в тангенциальном направлении. Сжатие в тангенциальном направлении будет препятствовать удлинению и растяжению наружных слоев заготовки и, таким образом, препятствовать образованию трещин вдоль линии гибки. Реализовать такую схему изгиба можно способами, предложенными авторами [2], [3].

В условиях ОАО «МЗКТ» при изготовлении кузовов бронированных автомобилей нашла применение высокопрочная сталь Miilux Protection 500 с  $\sigma_T = 1250$  МПа,  $\sigma_\theta = 1600$  МПа, твердость 480–560 НВ. На производстве при изготовлении деталей из таких сталей приходится прибегать к сварному варианту. Это связано с тем, что по рекомендациям производителя данные стали, во избежание образования трещин, возможно изгибать только относительно большими радиусами  $r = (6-8)s$  [2]. Большой радиус в детали снижает жесткость изогнутых элементов, что может негативно сказаться на общей жесткости собираемой конструкции. Поэтому разработка технологии гибки стали Miilux Protection 500 на радиус, равный толщине материала ( $r = s$ ), является актуальным вопросом и позволит в конечном

#### 40 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

итоге сократить большое количество сварных швов при изготовлении кузовов броневых автомобилей.

С целью проверки теоретических основ изгиба со сжатием в условиях ОАО «МЗКТ» был проведен эксперимент по схеме, изображенной на рис. 2. Суть его заключается в следующем: во фрезерованный паз подложки из листового проката ( $S = 12$  мм, сталь 09Г2С ГОСТ 19281–2014, класс прочности 345) устанавливали сегмент толщиной  $S = 4$  мм из стали Miilux Protection 500. Далее подложку вместе с сегментом укладывали на матрицу листогибочного прессы сегментом вверх и изгибали радиусом пуансона  $r = 4$  мм. При такой толщине подложки сегмент из стали Miilux Protection 500 неминуемо изгибается в условиях тангенциального сжатия.



Рис. 2. Результат эксперимента изгиба сегмента из стали Miilux Protection 500 в условиях тангенциального сжатия

Изогнутый сегмент, полученный в результате эксперимента, проверяли на наличие дефектов вдоль линии гибки с помощью системы рентгенотелевизионного контроля. Фотография исследования представлена на рис. 3.



Рис. 3. Рентгенограмма сегментов из стали Miilux Protection 500

Светлая линия на фотографии, полученной в результате рентгенотелевизионного исследования – линия гибки. Из рисунка видно, что дефекты вдоль линии гибки отсутствуют.

Следовательно, изгиб с тангенциальным сжатием способствует получению деталей из упрочненных листовых материалов, что объясняется теоретическими выкладками и подтверждается результатами экспериментов.



Разработка технологии гибки по способам, предлагаемыми авторами [2], [3] в перспективе позволит уйти от большого количества сварных соединений, что в конечном итоге скажется на прочностных и эстетических характеристиках готового изделия.

Литература

1. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки : учеб. пособие для вузов / Е. А. Попов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с. : ил.
2. Клубович, В. В. Технология гибки высокопрочных сталей / В. В. Клубович, В. А. Томило, М. Л. Нестерович // *Металлургия : респ. межведомств. сб. науч. тр. / редкол.: И. А. Иванов (гл. ред.) [и др.]*. – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 40. – С. 212–220.
3. Томило, В. А. Технология и инструмент для гибки листов из высокопрочных сталей / В. А. Томило, М. Л. Нестерович // *Литье и металлургия*. – 2020. – № 1. – С. 50–55.

УДК 004.942:532

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ  
ГИДРОПРИВОДА ПИТАЮЩЕГО АППАРАТА  
И АДАПТЕРА КОМБАЙНА В СРЕДЕ FLUIDSIM**

**В. В. Артемьев, Ю. А. Андреев**

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

Современные гидравлические приводы являются сложными мехатронными системами, при проектировании которых необходимо учитывать работу самого гидравлического привода, систему электронного управления, кинематику и динамику движения машины. Создание нового технического объекта – сложный и длительный процесс, в котором стадия проектирования имеет решающее значение в осуществлении замысла и достижении высокого технического уровня. Моделирование является одним из важнейших этапов проектирования любого технического объекта, в том числе и современных гидравлических систем, позволяя заменить или значительно сократить этапы наладки и натурных испытаний [1].

Имитационное моделирование позволяет решить задачи управления, регулирования, статики, кинематики, динамики и энергетики гидравлических механизмов с единых методических позиций и представляет собой объединяющее ядро расчетного комплекса.

Программа FluidSim представляет собой программное обеспечение для моделирования работы и управления системами гидропривода. Программа была разработана компанией Festo Didactic с целью конструирования схем гидропривода и гидроавтоматики с ручным, электрическим и электронным управлением [2].

Целью работы является применение современных прикладных программ проектирования для сокращения сроков исследовательской работы на начальных этапах проектирования изделия на примере программы FluidSim.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследования являлась разработка имитационной модели привода питающего аппарата и адаптера комбайна КВК-800 (рис. 1, а) и возможность применения программного пакета FluidSim 5 для предварительной оценки параметров системы.

Исполнительными механизмами данного гидропривода являются гидромотор привода питающего аппарата М1 и гидромотор привода адаптера М2.

## 42 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

В программе FluidSim была построена гидросхема привода питающего аппарата и адаптера (рис. 1, а). Для создания схемы используем элементарные схемы гидравлических аппаратов, которые заложены в библиотеку FluidSim (рис. 2). Они разделены на несколько групп: элементы питания (насосы, насосные установки, бак, резервуар, теплообменник, фильтр и РВД), клапаны контроля давления, пропорциональные клапаны распределители и т. д. В библиотеке FluidSim заложены стандартные схемы агрегатов.

Для построения имитационной модели необходимо последовательно создать новый файл модели; расположить блоки из библиотеки в окне модели. Проблемой любого имитационного моделирования гидросистем является применение в реальной гидросистеме гидроустройств, не имеющих стандартных аналогов в библиотеке программы.

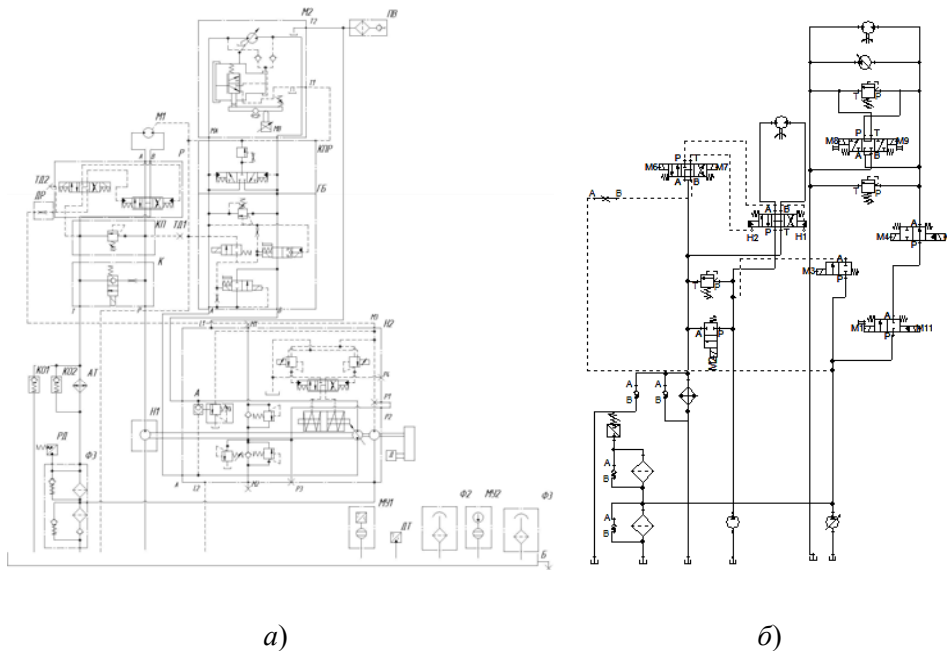


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема привода питающего аппарата и адаптера (а); принципиальная гидравлическая схема, построенная в программе FluidSim (б)

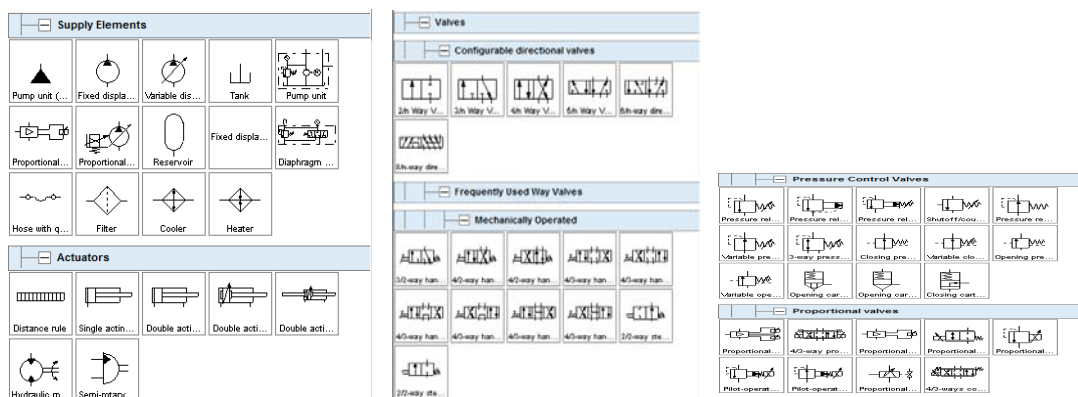
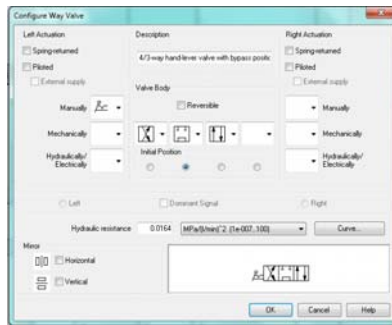


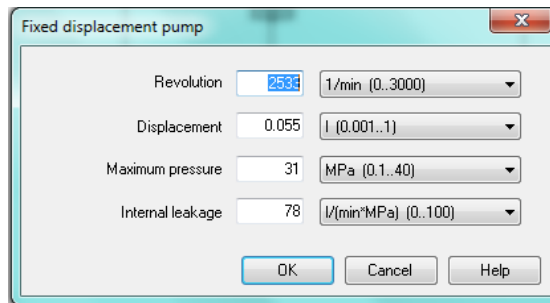
Рис. 2. Пример библиотек стандартных элементарных схем гидроаппаратов FluidSim

Однако программа FluidSim позволяет создавать специальные гидроаппараты или изменять стандартные в специальном окне (рис. 3, а).

Далее требуется изменить параметры блоков, установленных программой «по умолчанию» в окне вписывания параметров (рис. 3, б).



а)

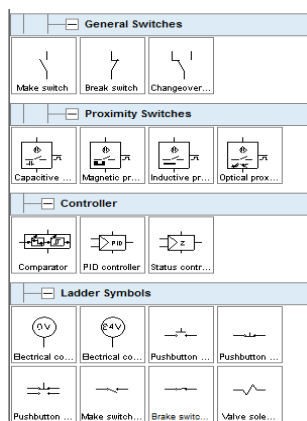


б)

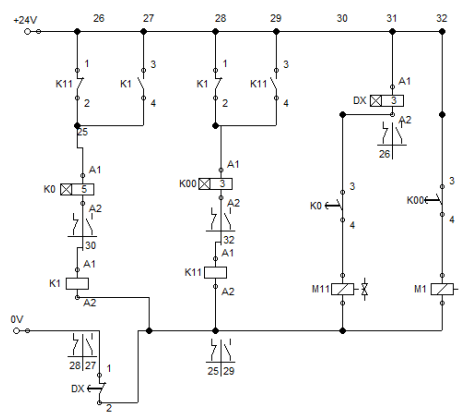
Рис. 3. Окно изменения элементарной схемы распределителя (а); окно вписывания параметров насоса (б)

Помимо гидравлических элементов в библиотеке также находятся и электрические (рис. 4, а) для создания различных электрических цепей.

Следующим шагом в построении имитационной модели является создание системы электронного управления с помощью составления электрических схем для автоматического переключения управляющих электромагнитов распределителей в заданный момент времени (рис. 4, б). Электрические схемы для отражения реальной работы гидропривода должны составляться для каждого распределителя в отдельности.



а)



б)

Рис. 4. Схема автоматического переключения магнитов

После этого в логическом модуле собирается управляющая программа с помощью основных логических элементов, которая реализует необходимый порядок работы гидромоторов. Далее «связываются» элементы гидравлической (распределители) и электрической (электромагниты) схем, таким образом создается электрогидравлическая схема привода.

Затем в режиме моделирования можно визуализировать работу гидросистемы на основе созданной имитационной модели.

Результатом создания модели в программе FluidSim являются графики изменения расходов на моторах привода питающего аппарата и адаптера (рис. 5).

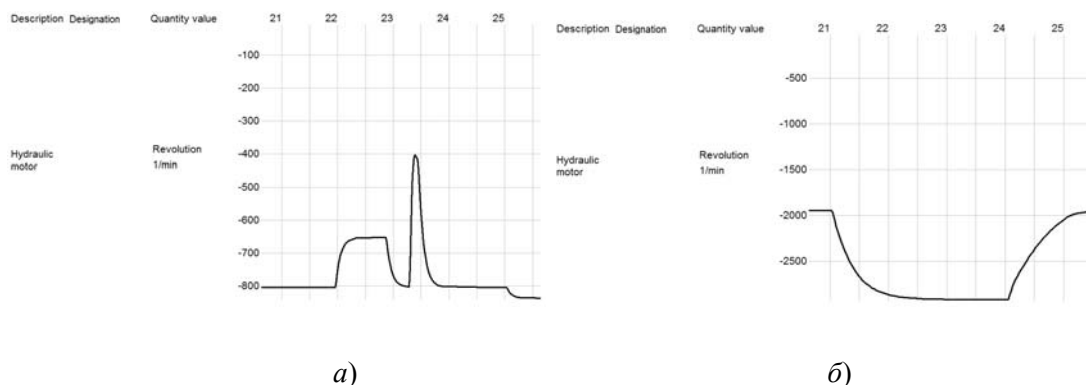


Рис. 5. Графики изменения частоты вращения от времени в гидромоторах:  
а – привода адаптера; б – привода питающего аппарата

Таким образом, на основе гидропривода питающего аппарата и адаптера комбайна создана электрогидравлическая имитационная модель, учитывающая параметры гидросистемы и порядок работы гидродвигателей. Программный пакет FluidSim является сравнительно простым для восприятия, но в то же время достаточно функциональным для проектирования и моделирования гидравлических систем с электронным управлением. Данный программный пакет позволяет визуализировать работу гидросистемы, получать выходные параметры без произведения расчетов и сравнивать их с техническим заданием на проектирование. Однако работа с программой FluidSim требует достаточных знаний в области построения гидро- и электросхем, способности анализировать полученные результаты и знания логики автоматизированного управления.

#### Литература

1. Шорников, Ю. В. Компьютерное моделирование гидравлических систем / Ю. В. Шорников, С. А. Мяндин // Молодой ученый. – 2017. – № 22. – С. 104–110.
2. Боровиков, А. В. Исследование работы гидропривода с помощью программы fluidsim / А. В. Боровиков // Междунар. студ. науч. вестн. – 2019. – № 5 (Ч. 1).

УДК 621.923.044:669

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

А. С. Матвеевков, Г. В. Петришин

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

Магнитно-абразивная обработка (МАО) как финишный процесс предназначена для полирования наружных и внутренних поверхностей изготавливаемых деталей, улучшения их качественных характеристик, в том числе упрочения тонкого поверхностного слоя. Режущий инструмент формируется из магнитной и абразивной частей

под воздействием магнитного поля, создаваемого электромагнитом. Микрорезание осуществляется в результате контактного давления на поверхность заготовки режущих кромок ферромагнитного порошка и зависит от плотности магнитного поля [1].

Поскольку жесткость абразивного инструмента определяется величиной магнитной индукции и напрямую влияет на производительность процесса, возникает необходимость прогнозирования распределения магнитной индукции при проектировании обрабатывающей системы, что и достигается благодаря математическому моделированию индукторов.

В настоящей работе будет рассмотрена типовая схема MAO согласно классификации, приведенной Ю. М. Бароном [2], для полирования наружных поверхностей вращения с индуктором на постоянных магнитах (рис. 1). Данная схема выбрана из-за простоты ее реализации в производстве на базе станков токарной группы.

Предполагается осуществить компьютерное моделирование схемы для определения величины электромагнитной индукции в обрабатывающей системе и картины ее распределения при обработке заготовок из неферромагнитных материалов (в нашем случае алюминиевая заготовка).

Цель исследования – разработка математических моделей типового и усовершенствованного варианта схемы магнитно-абразивной обработки тел вращения для качественной и количественной оценки влияния геометрии инструмента на распределение магнитных полей в системе.

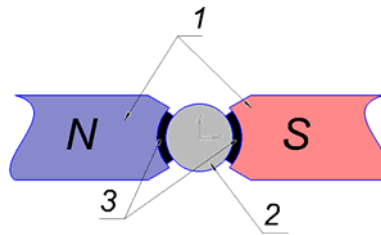


Рис. 1. Общий вид схемы:

1 – постоянные магниты; 2 – обрабатываемая заготовка;  
3 – магнитно-абразивная смесь

Магнитное поле постоянных магнитов удерживает абразивную смесь в зазоре между поверхностями магнитов и обрабатываемой заготовки, а создаваемая ими индукция задает жесткость инструмента. При вращении заготовки происходит обработка ее наружной поверхности.

Распределение магнитной индукции в исходном варианте данной схемы приведена на рис. 2.

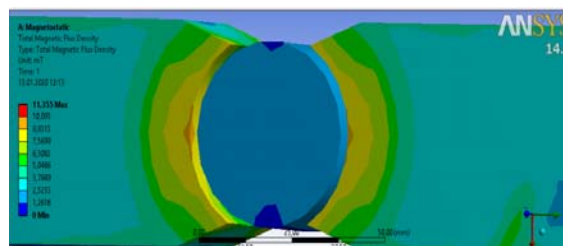


Рис. 2. Распределение магнитной индукции для алюминиевой заготовки (исходный вариант)

При моделировании в качестве материала для постоянных магнитов использовался НмБ 200/80 ГОСТ 24897–81, а в качестве заготовки – алюминий АЛ2 ГОСТ 1583–93. Величина магнитной индукции постоянного магнита 0,3 Тл.

Схема обработки заготовки из алюминия (рис. 2) показывает равномерное распределение магнитной индукции с максимальной ее величиной – 0,11 Тл. В данном случае абразивная смесь у поверхности обрабатываемой заготовки вращается вместе с ней из-за действующих сил трения и малой жесткости инструмента, что приводит к снижению интенсивности процесса. Значит, концентрация магнитной индукции непосредственно в центральной части зоны обработки и еще большее уплотнение магнитной смеси позволит минимизировать миграцию инструмента и тем самым увеличит эффективность МАО.

Поскольку наибольшие величины магнитной индукции достигаются в местах резкого изменения геометрии, можно предположить, что добавление сквозных пазов в постоянных магнитах приведет к концентрации индукции непосредственно в местах между пазами. Конструкция данной обрабатываемой системы представлена на рис. 3.

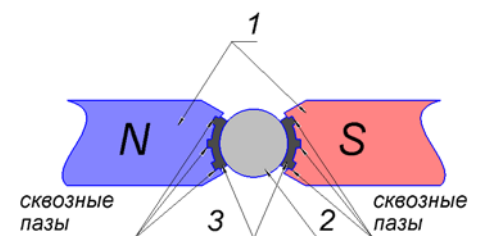


Рис. 3. Общий вид усовершенствованной схемы:  
1 – постоянные магниты; 2 – обрабатываемая заготовка;  
3 – магнитно-абразивная смесь

В данной схеме изменена геометрия рабочей поверхности постоянных магнитов за счет добавления концентраторов магнитной индукции в виде сквозных прямоугольных пазов.

В результате моделирования была получена картина распределения магнитной индукции (рис. 4).

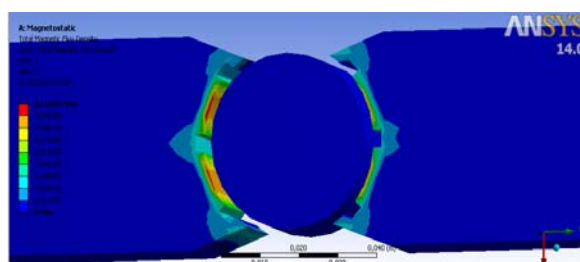


Рис. 4. Распределение магнитной индукции для алюминиевой заготовки

Здесь наибольшая величина электромагнитной индукции 0,11 Тл наблюдается в промежутках между прорезанными в постоянных магнитах пазами, что объясняется прохождением большего числа линий магнитного поля через меньшую площадь постоянного магнита. Такое распределение индукции приводит к уплотнению

магнитно-абразивной смеси непосредственно в зоне обработки. Небольшие участки постоянного магнита на входе и выходе из этой зоны формируют локальное увеличение магнитной индукции, препятствующее миграции абразивной смеси.

По результатам исследования можно сделать вывод, что при изменении геометрии постоянных магнитов за счет добавления концентраторов магнитной индукции наблюдается наибольшее уплотнение магнитно-абразивной смеси непосредственно в зоне обработки, за счет чего и повышается эффективность процесса МАО.

#### Литература

1. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.
2. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение ; Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.

УДК 621.778

### **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ТОНКОЙ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ**

**Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов, И. А. Цырганович**

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

В современном метизном производстве имеется тенденция к повышению производительности производственного процесса. Самым очевидным решением является повышение скорости производства проволоки путем увеличения скорости волочения. Однако увеличение скорости волочения согласно классической теории пластичности приводит к увеличению показателя скорости пластической деформации, что приводит к изменению деформационной картины, к изменению параметров сопротивления пластической деформации. В некоторых случаях повышение скорости деформации может приводить к изменению комплекса механических свойств проволоки. Для более четкого понимания изменения деформационной картины целесообразно оценивать изменение распределения микротвердости по сечению тонкой проволоки.

Цель работы – изучить влияние скорости деформации на микротвердость тонкой стальной проволоки.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи: группировка и подготовка образцов тонкой проволоки диаметром 0,35 мм класса прочности НТ, изготовленной на различных скоростях (1, 4, 6, 8, 10 м/с); изготовление микрошлифов тонкой проволоки; составление плана и карты эксперимента; проведение испытаний на микротвердость тонкой проволоки на приборе ЛОМО ПМТ-3; построение диаграмм микротвердости, изучение распределения микротвердости по сечению тонкой проволоки.

Микротвердость измеряют путем вдавливания в образец (изделие) алмазного индентора под действием статической нагрузки в течение определенного времени выдержки. Число твердости определяют (как и по Виккерсу) делением приложенной нагрузки в Н или кгс на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка в мм<sup>2</sup>.

Основным вариантом испытания является метод восстановленного отпечатка, когда размеры отпечатков определяются после снятия нагрузки. Для случая, когда требуется определение дополнительных характеристик материала (упругое восстанов-

ление, релаксация, ползучесть при комнатной температуре и др.), размеры отпечатка определяют на глубине вдавливания индентора в процессе приложения нагрузки.

Практически микротвердость определяют по стандартным таблицам для конкретной формы индентора, нагрузки и полученных в испытании размеров диагоналей отпечатка.

В качестве инденторов используют алмазные наконечники разных форм и размеров в зависимости от назначения испытаний микротвердости. Основным и наиболее распространенным наконечником является четырехгранная алмазная пирамида с квадратным основанием (по форме подобна индентору, применяющемуся при определении твердости по Виккерсу).

Процесс волочения характеризуется неравномерностью деформаций по сечению проволоки. Избыточные растягивающие напряжения на поверхности проволоки приводят к снижению пластических свойств проволоки в целом. Неравномерность деформации является также источником возникновения остаточных напряжений и деформаций, ухудшающих технологические свойства проволоки и металлокорда. В идеальном случае неравномерность деформации должна отсутствовать, а в реальном – должна быть минимизирована. Распределение деформации в проволоке в очаге деформации в каждой волоке различно. По мере продвижения проволоки к последней волоке неравномерность деформации повышается и накапливается. Формирование в проволоке высокого градиента неравномерной деформации негативно сказывается на пластических свойствах проволоки и является причиной появления остаточных напряжений, которые снижают технологичность свивки проволоки в металлокорд.

С целью экспериментального анализа неравномерности деформации по сечению проволоки и по скорости при волочении использовали метод определения микротвердости металла в разных точках поперечного сечения тонкой проволоки. Микротвердость по поперечному сечению проволоки определяли проведением испытаний на микротвердомере ПМТ-3 по вдавливанию микроиндентора в поперечное сечение проволоки согласно [1]. На рис. 1, а показана схема контрольных точек для измерения микротвердости проволоки, а на рис. 1, б – образец тонкой проволоки с отпечатками после внедрения микроиндентора для определения распределения микротвердости в поперечном сечении проволоки.

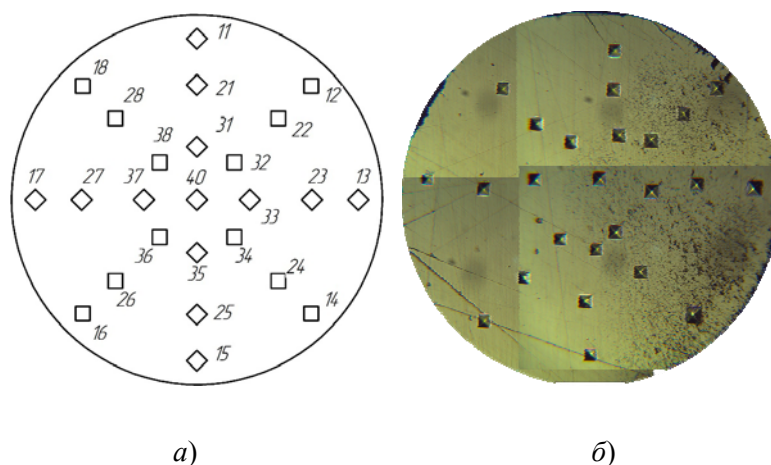


Рис. 1. Определение микротвердости в поперечном сечении проволоки  $d = 0,35$  мм:  
а – схема внедрения микроиндентора в образец проволоки;  
б – сечение образца проволоки после измерения микротвердости



Значение твердости по Виккерсу вычисляют по формуле [2]:

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2},$$

где  $F$  – нагрузка, Н;  $P$  – нагрузка, кгс;  $\alpha$  – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный  $136^\circ$ ;  $d$  – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

По результатам определено, что наибольшей равномерностью распределения микротвердости обладают образцы проволоки, изготовленные со скоростью волочения 4 и 10 м/с. Среднеквадратичное отклонение значений для этих скоростей составляет 35 и 74 HV соответственно. Наибольшей твердостью обладает проволока, изготовленная со скоростью волочения 10 м/с (средняя твердость по сечению 614 HV), наименьшей твердостью обладает проволока, изготовленная со скоростью волочения 4 м/с (средняя твердость по сечению 321 HV).

Определено, что при увеличении скорости волочения наблюдается рост микротвердости проволоки по следующей зависимости:

$$HV = 359^2 - 151,89 + 484,14,$$

где HV – твердость по Виккерсу, ед.;  $\vartheta$  – скорость волочения, м/с.

Увеличение микротвердости в зависимости от увеличения скорости волочения связано с увеличением скорости деформации при волочении, с изменением температурных и контактных условий деформации, а также изменением сопротивления пластической деформации тонкой проволоки в процессе волочения.

#### Литература

1. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М. : Изд-во стандартов, 1987.
2. Федосов, С. А. Определение механических свойств материалов микроиндентированием / С. А. Федосов, Л. Пешек // Соврем. зарубеж. методики. – М. : Физ. фак. МГУ, 2004.

УДК 631.358

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОИЗМЕЛЬЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ВАЛЬЦЕВОГО ТИПА КОРМОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ТИПА**

**В. Б. Попов, В. В. Малащенко**

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

В большинстве отечественных сельхозорганизаций основным компонентом рационов крупного рогатого скота является кукурузный силос. Кукуруза является основным поставщиком энергии в рацион. При этом коровы получают энергию не только из крахмала зерна, но и из стенок клеток. Поэтому кукурузу широко используют в рационах крупного рогатого скота в виде цельного зерна, молотого зерна, плющеного зерна, силоса из молодой кукурузы, шредледжа и, конечно, силоса из початков кукурузы.

Классический силос – это кукуруза специальных сортов, собранная в фазе молочно-восковой спелости с влажностью 60–70 % и законсервированная в герметических условиях с применением консерванта. Кукурузный силос является стандартным

## **50 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении**

компонентом большинства рационов дойных коров и в последнее время его доля увеличивается, так как у него есть ряд преимуществ как в кормлении, так и в выращивании.

Для уборки кукурузы в фазе восковой спелости применяется доизмельчающее устройство, которое улучшает степень дробления зерен кукурузы вплоть до 100 %. Активное доизмельчающее устройство представляет собой два вальца, стянутых пружинами и вращающихся в противоположные стороны с различной линейной скоростью. В результате чего происходит перетиравание массы, расплющивание и повреждение зерен кукурузы. С целью получения корма наилучшего качества доизмельчающее устройство регулируется по силе прижатия валцов.

Для компенсации дополнительных затрат мощности и повышения производительности комплексов с обеспечением требований к качеству корма, в соответствии с отраслевым регламентом изготовители рекомендуют устанавливать длину резки и зазор между доизмельчающими вальцами:

- восковой спелости – от 4 до 6 мм;
- полной спелости – от 2 до 4 мм;
- длина резки – от 10 до 13 мм.

Такие настройки и использование доизмельчающего устройства с классическим профилем зуба позволяют заготавливать корм лучшего качества и с большей производительностью. Однако помимо измельчения, короткой длины резки появилась возможность использовать более длинную. Длинная сечка, или шредледж – это сечка длиной свыше 20 мм, появившаяся впервые в США. После выставки Agritechnica-2015 эти виды корма становятся все более популярными и обсуждаются практиками все чаще и чаще. Цель их применения – экологически сбалансированная оптимизация кормления с учетом здоровья животных, их продуктивности и усвоения корма, а в конечном итоге – снижение расходов фермеров.

На мировом рынке сельскохозяйственной техники кормоуборочные комбайны, имеющие в своей комплектации доизмельчающие устройства вальцевого типа, представлены различными как отечественными, так и зарубежными компаниями.

Рассмотрим кормоуборочные комбайны таких фирм как: «Krone» (Германия), модель Big X 680; «Claas» (Германия), модель Jaguar 930; «Гомсельмаш» (Республика Беларусь), модель KBK-800-36; «Ростсельмаш» (Российская Федерация), модель RSM 1401; «John Deere» (США), модель 8100.

Комбайны компаний «Ростсельмаш», «Гомсельмаш», «Krone» используют стандартные вальцевые доизмельчающие устройства с пилообразным профилем зуба (рис. 1).

Обычно это два вальца, имеющие разницу скоростей не более 30 % между ними, с количеством зубьев от 100 («Гомсельмаш» и «Ростсельмаш») до 175 («Krone»).

Вальцы, имеющие данный профиль зубьев, обладают преимуществами в виде: повышение плотности растительной массы до 25 %, низкая активность микроорганизмов на площади среза, меньшие потери энергии, лучшие вкусовые качества корма, меньшие транспортные затраты, уплотнять массу легче и качество уплотнения выше, ускоренное выделение клеточного сока.

Комбайны компаний «Claas» и «John Deere» обладают преимущественно вальцевыми доизмельчающими устройствами с модифицированным профилем зуба, использующими технологию Shredlage (рис. 2).



Рис. 1. Вальцы доизмельчающих устройств («Krone», «Гомсельмаш», «Ростсельмаш»)

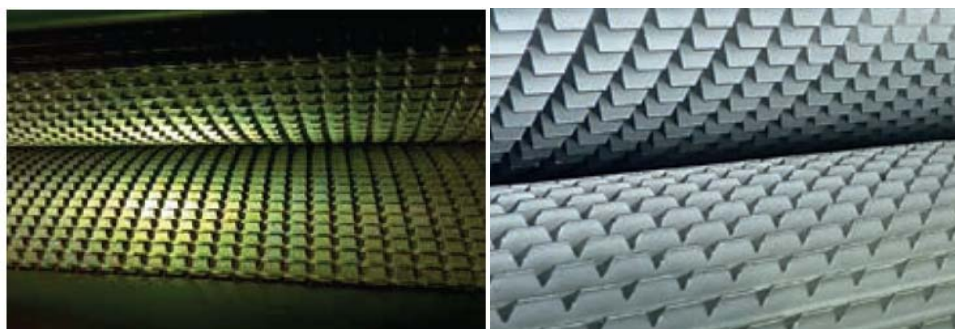


Рис. 2. Вальцы доизмельчающего устройства с использованием модифицированных вальцев («John Deere», «Claas»)

К преимуществам данных вальцев можно отнести: лучшее расщепление и разрушение зерен кукурузы (за счет спиральных канавок, нанесенных на валец, дополнительно улучшающих измельчение), большая энергоэффективность по сравнению с использованием вальцев со стандартным профилем зуба, превосходная усваиваемость растительной массы крупнорогатым скотом, более эффективное силосование силоса, объемная плотность выше, улучшение протекания процесса ферментации, быстрое начало молочнокислого брожения, увеличение молочной и мясной продуктивности, а также улучшение здоровья скота.

В данной статье были представлены два типа вальцев дизельных устройств самоходных кормоуборочных комбайнов. Вальцы с модернизированным профилем зуба повышают качество заготавливаемых кормов. Они обеспечивают более полное разрушение зерен кукурузы, а это, в свою очередь, улучшает усваиваемость растительной массы в рубце желудка коровы, уменьшает износ зубов у крупного рогатого скота в целом, а в совокупности положительно сказывается на общем состоянии животных.

УДК 631.356.4

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕПАРИРУЮЩИХ ТРАКТОВ  
КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО  
И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**В. Б. Попов, А. А. Петух**

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

Сбор урожая является одним из наиболее трудоемких процессов в картофелеводстве, на который приходится более 40 % общих затрат и около 70 % затрат ручного труда.

Конструкция картофелеуборочной машины должна удовлетворять предъявляемым агротехническим требованиям:

– сильно развитую зеленую ботву высотой более 50 см скашивают за 2–3 дня до начала уборки;

– клубни должны быть полностью подкопаны, количество не подкопанных и оставленных на поверхности клубней не должно превышать 4 %;

– количество поврежденных клубней с забоинами и неглубокими царапинами не должно превышать 2 %, порезанных – 1,5 %;

– количество не отделенных от ботвы клубней не должно превышать 5 %, а количество примесей (земли, камней, ботвы) в собранном картофеле – 2 % и не более по массе.

Технологический процесс работы комбайнов состоит из операций подкопа рядков с картофелем и последующего отделения клубней от почвы и ботвы. Комбайны применяют на почвах с влажностью от 6 до 28 % при урожайности от 8 до 80 т/га.

В более тяжелых условиях и при большой урожайности для уборки рекомендуются применять картофелекопатели.

Применяют также комбинированный способ уборки, при котором клубни с двух или четырех рядков укладывают при помощи картофелекопателя-валкоукладчика в междурядья двух соседних необработанных грядок. Оборудованный таким образом комбинированный валок убирается за один проход комбайна.

Повреждение клубней картофеля при уборке неизбежно. При механизированной уборке процент поврежденных клубней возрастает в зависимости от погодных условий, степени зрелости клубней, применяемого комплекса машин и др.

Однако повреждения могут быть снижены путем:

– выбора рациональной технологии возделывания и уборки;

– подбора сортов, менее склонных к повреждению;

– своевременности проведения работ от посадки до уборки;

– использования всех имеющихся регулировок рабочих органов машин;

– применения транспортных средств, приспособленных к перевозке картофеля.

Эффективной мерой уменьшения механических повреждений являются: скорость движения агрегата, оптимальные регулировки рабочих органов картофелеуборочных машин и выбор оптимальных сепарирующих трактов.

Для устранения сгуживания (бульдозирования) подкапываемого пласта скорость первого элеватора должна быть в 1,3–1,6 раза больше скорости движения комбайна с целью интенсификации процесса сепарации вороха (за счет растягивания пласта).

Наибольшее повреждение картофельные клубни получают при прохождении сепарирующих трактов картофелеуборочного комбайна.

Сепарирующий тракт картофелеуборочного комбайна предназначен для отделения клубней картофеля от примесей (таких как земля, крупные и мелкие растительные остатки).

Для меньшего травмирования картофеля производители картофелеуборочных комбайнов подбирают разные компоновочные схемы сепарирующих трактов в зависимости от типа почвы, урожайности и засоренности поля.

Сепарирующие тракты бывают:

- транспортерного типа (рис. 1), различающиеся размером ячейки (расстоянием между прутками), наличием покрытия или без покрытия (при этом для меньшего травмирования клубней прутки часто покрывают слоем резины); резинопальчикового типа (рис. 2), когда на прутки V-образно наплавлены резиновые пальчики;
- вальцевого типа (рис. 3), различающиеся формой вальца, наличием покрытия и спиралевидного шнека.



*Рис. 1.* Сепарирующие тракты транспортерного типа



*Рис. 2.* Сепарирующие тракты резинопальчикового типа



*Рис. 3.* Сепарирующий тракт вальцевого типа

При сравнительном анализе картофелеуборочных комбайнов отечественных (таких как КПК-2-05, ПКБ-2 фирмы «Гомсельмаш»; Лидчанин-1 фирмы «Агропромсельмаш») и зарубежных (Dr-1500 фирмы «Gimme»; Superia фирмы «Dewulf» и т. д.) у всех у них первый сепарирующий тракт идет транспортерного типа, чаще всего без покрытия. Это обусловлено тем, что изначально попадает сепарирующая масса, которая содержит большой процент земли. Обрезиненные транспортеры применяют в том случае, если земля быстро сепарируется через транспортер, и поэтому для уменьшения травмированности корнеплода используют обрезиненные транспортеры (они могут быть покрыты через один пруток).

После первого сепарирующего тракта корнеплоды попадают на второй сепарирующий тракт. Он, как правило, также представлен транспортером, но уже целиком обремененным, так как земля, проходя первый сепарирующий тракт, в своей большей массе просыпается и пропадает земляная подушка. Поэтому для уменьшения травмированности корнеплодов чаще всего применяют транспортеры с покрытием.

Второй сепарирующей тракт отделяет и крупные растительные остатки (ботва клубня, сорняки и т. д.). Для этого второй сепарирующий тракт помещают внутри крупноячеистого транспортера (рис. 4). За счет больших ячеек происходит отделение корнеплода от большой скошенной ботвы, картофель проваливается на обремененный транспортер, а ботва уходит по транспортеру за пределы комбайна.



Рис. 4. Транспортер крупной ботвы

Также второй сепарирующий тракт может быть вальцевого типа, в основном он применяется на машинах зарубежных производителей («Grimme», «Dewulf» и т. д.). В основном это связано с трудоемкостью и дороговизной изделия.

Вальцы устанавливаются один за другим на всю длину второго сепарирующего тракта. Ворох земли, клубней, растительных остатков после прохождения первого сепарирующего тракта попадает на вальцовый стол, где дальше очищается. Вальцы за счет своих круговых вращений затягивают в щели между собой землю, ботву и сорняки, а клубни остаются на вершине вальцов и двигаются дальше по технологическому тракту, за счет этого происходит лучшее отделение примесей от клубней, чем на транспортерном тракте.

На некоторых зарубежных аналогах эти вальцы могут регулироваться по горизонтали комбайна (т. е. менять межосевое расстояние), что позволяет производить так называемую первичную калибровку. За счет раздвижения вальцов увеличивается зазор и мелкие клубни проваливаются и остаются на поле, тем самым уменьшают транспортные и сортировочные расходы.

Комбайны с вальцевыми механизмами очень хорошо зарекомендовали себя на уборке раннего картофеля, так как ботва держится еще за картофель (в связи с его физической незрелостью), а вальцы способствуют ее лучшему отделению.

Третий сепарирующий тракт служит для отделения мелких примесей (таких как корневище, мелкая ботва). Состоит он из расположенного под углом ( $45 \pm 5^\circ$ ) резинопальчикового транспортера. Когда масса вороха попадает на резинопальчиковый транспортер, то клубни скатываются за счет своей округлости, а примеси цепляются за V-образные пальчики и двигаются дальше. На многих комбайнах для снижения потерь сверху над транспортером ставят валец, который вращается навстречу транспортеру.

Таким образом, в статье представлены наиболее распространенные сепарирующие тракты картофелеуборочных комбайнов, качество подбора которых зависит от разных факторов (таких как тип почвы, влажность почвы, от периода уборки, засоренности и т. д.).

УДК 621.9.02

## ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРИ ВИХРЕВОЙ ОБРАБОТКЕ

**Д. В. Никитенко**

*ОАО «Гомельское конструкторское бюро «Луч», Республика Беларусь*

**М. И. Михайлов**

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

**А. А. Кафанов**

*ОАО «Гомельский завод станочных узлов», Республика Беларусь*

Производительность процесса вихревого фрезерования зависит от числа зубьев. Однозубые головки просты в наладке, но не обеспечивают высокой производительности. Поэтому на производстве получили распространение головки с тремя, четырьмя и шестью зубьями [1]–[3]. Обзор современных конструкций вихревых головок показал, что количество зубьев ограничено только возможностью их размещения и закрепления на инструментальном диске [4], [5].

Количество зубьев ограничивалось стремлением к тому, чтобы в контакте с заготовкой находился постоянно один зуб, объясняя это стремлением сократить вспомогательное время за счет отвода вихревой головки без ее радиального перемещения [1]. При этом зазор между зубом и заготовкой создавался поворотом головки за счет эксцентриситета. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы диаметр вершин зубьев (резцов) был больше рассчитанного по формуле [1]:

$$d_{\text{pmin}} = \frac{r_1 \left(1 - \cos \frac{\pi}{z}\right) + \sqrt{2r^2 \left(1 - \cos \frac{\pi}{z}\right) - r_1^2 \left(1 - \cos^2 \frac{\pi}{z}\right)}}{1 - \cos \frac{\pi}{z}}, \quad (1)$$

где  $r$  – наружный радиус резьбы;  $r_1$  – внутренний радиус резьбы;  $z$  – число зубьев (резцов).

Условие (1) не является обязательным, так как отвод вихревой головки в исходное положение возможен после совмещения осей заготовки и вихревой головки. В работе [6] показано, что отвод вихревой головки в исходное положение без ее радиального перемещения возможен, даже если диаметр вершин зубьев меньше диаметра заготовки, но превышает средний диаметр обрабатываемой резьбы. Отвод вихревой головки в исходное положение выполняется при связанных движениях вращения заготовки и осевого перемещения головки, при этом зуб остается в обработанной винтовой канавке, не касаясь ее.

При вихревом фрезеровании, даже при минимальной разности диаметров вершин зубьев вихревой головки и заготовки, процесс обработки отличается большой неравномерностью. Опыты по осциллографированию крутящего момента и сил резания показали, что при однорезцовой обработке максимальная величина окружной силы в 4–10 раз превышает среднюю величину силы [7], [8]. Резкое изменение силы резания создает неблагоприятные условия обработки, вызывая вибрации, ограничивающие работу с максимальными подачами даже при наличии поддерживающих и направляющих люнетов. Наличие вибраций оказывает влияние не только на качество обрабатываемой поверхности, но и сокращает срок службы режущего инструмента [9]. Для устранения вибраций необходимо стремиться к тому, чтобы число одновременно работающих зубьев было как можно больше, и по крайней мере не менее двух. Этого можно добиться, изменяя диаметр вершин зубьев.

В [1] диаметр вершин зубьев рекомендуется выбирать из диапазона  $(1,2-1,4)d$  – при обработке метрической резьбы и  $(1,05-1,3)d$  – при обработке трапецеидальной резьбы и червяков. При выборе диаметра вершин зубьев по указанным соотношениям в процессе резания может участвовать как один, так и более зубьев.

Предлагается выбирать диаметр вершин зубьев (резцов) из условия участия в процессе резания двух зубьев по приведенной зависимости:

$$d_p = \frac{r_1 \sin \psi + \sqrt{(r_1 \sin \psi)^2 + (r^2 - r_1^2)(1 - (\sin \varepsilon \cos \psi)^2)}}{\sin \psi (1 - (\sin \varepsilon \cos \psi)^2)}, \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\alpha - \beta}{2}, \quad \alpha = 2\pi / z, \quad \beta = \pi n_3 / (2z n_n),$$

где  $\varepsilon$  – угол наклона оси вихревой головки относительно оси заготовки;  $\alpha$  – угловой шаг резцов вихревой головки;  $n_3$  – частота вращения заготовки;  $n_n$  – частота вращения инструмента.

Так, при вихревом фрезеровании резьбы ходового винта токарного станка с шагом 12 мм ( $r = 22$  мм,  $r_1 = 15,5$  мм,  $z = 6$ ,  $\varepsilon = 7^\circ$ ,  $n_3 = 12$  об/мин,  $n_n = 600$  об/мин) диаметр вершин резцов, рассчитанный по зависимости (2), равен 50,9 мм.

Таким образом установка вершин зубьев на диаметр, равный либо меньший рассчитанному по зависимости (2), позволяет повысить равномерность вихревого фрезерования за счет участия в процессе резания двух и более зубьев, что повышает точность обработки и стойкость инструмента.

#### Литература

1. Виксман, Е. С. Скоростное нарезание резьб и червяков (вихревое нарезание вращающимися резцами) / Е. С. Виксман. – М. : Машиностроение, 1966. – 91 с.
2. Буш, В. В. Четырехрезцовая вихревая головка / В. В. Буш, Л. В. Гусева // Хим. и нефтяное машиностроение. – 1976. – № 3. – С. 43.
3. Михайлов, М. И. Повышение надежности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 272 с.
4. Gewindewirbeln mit 12 Schneiden // deomagazine. – 2009. – № 51. – P. 41–44. – Mode of access: <https://www.tornos.com/en/content/deomag-51>. – Date of access: 31.09.2020.
5. Außen-Wirbelaggregat L5 min mono // Burgsmüller GmbH. – Mode of access: <https://www.burgsmueller.de/de/aggregate-3>. – Date of access: 31.09.2020.
6. Linsinger, E. Erfahrungen und Fortschritte bei Gewindeschälern / E. Linsinger // Werkstatt und Betrieb. – 1958. – Heft 9. – P. 111–116.



7. Авксентьев, И. Г. Сила резания и расход мощности при скоростном фрезеровании резьбы / И. Г. Авксентьев // Вестн. машиностроения. – 1954. – № 10. – С. 68–71.
8. Cutting forces analysis in whirling process / J. H. Son [et al.] // International Journal of Modern Physics. – 2010. – Vol. 24. – P. 2786–2791.
9. Васин, С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С. А. Васин. – М. : Машиностроение, 2006. – 384 с. – Серия «Библиотека инструментальщика».

УДК 621.9.02

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
РАБОТОСПОСОБНОСТИ НАПАЙНЫХ РЕЗЦОВ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ 18ХГТ**

**М. И. Михайлов, О. А. Лапко, А. В. Хихлуха**

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

Исследовалось влияние композиционного покрытия на основе полимеров с абразивным наполнителем контактных поверхностей на работоспособность режущего инструмента.

Цель исследования – повышение стойкости режущего инструмента путем применения покрытия на основе полимеров с абразивным наполнителем.

**Методика эксперимента.** Производственные испытания проводили по известной методике [1] на заводе «Гомсельмаш». Исследовали резцы с напайными пластинами (рис. 1). Материал пластин Т15К6. Резцы выполнены по ГОСТ 18879–73. Первоначально испытывали резец с применением подкладных пластин из стали 45. Во втором эксперименте с двух сторон резца устанавливали подкладные пластины с композиционным покрытием (рис. 2).

Для экспериментального исследования были изготовлены прямоугольные пластины из стали 45, на поверхности которых был нанесен слой эпоксидной смолы, модифицированной полиэфирной смолой, поверх которой был нанесен слой карбида кремния [2].

Поверхность пластин со слоем карбида кремния фотографировали через микроскоп Digital Microscope (см. рис. 2).



*Рис. 1. Фотографии рабочего места*

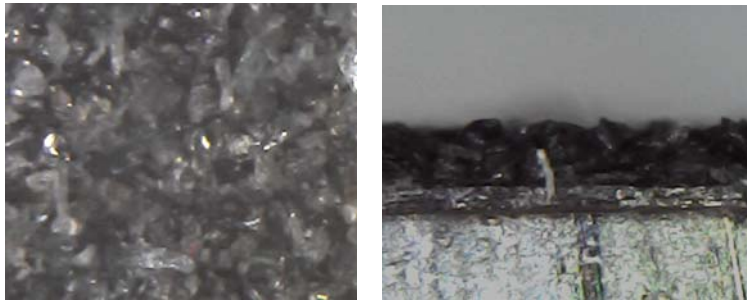


Рис. 2. Фотографии образцов под микроскопом:  
покрытие карбидом кремния

Испытания проводили на токарно-винторезном станке модели 16К20. Заготовка типа вал из стали 18ХГТ (см. рис. 1). Режимы резания, при которых проводились испытания:  $V = 87\text{--}118$  м/мин;  $S = 0,8$  мм/об;  $t = 2$  мм.

После каждого прохода, который составлял 2,5 мин, под микроскопом определяли характер износа режущей кромки. Обработку продолжали до тех пор, пока режущая кромка не достигала допустимого износа.

**Результаты исследования и их анализ.** В результате проведения испытаний после каждого прохода делали соответствующие фотографии под микроскопом (рис. 3).

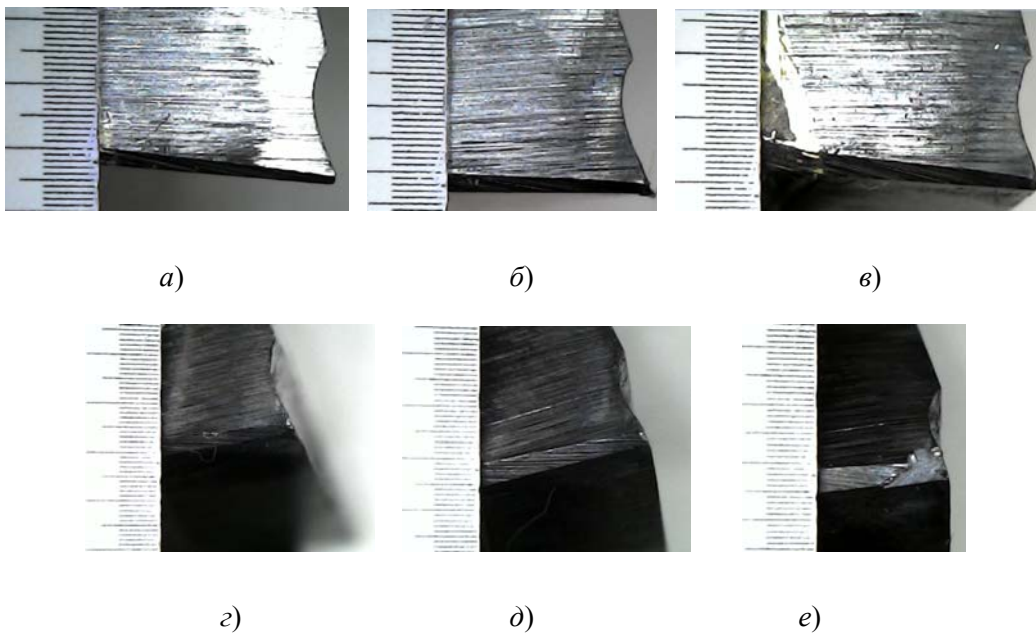


Рис. 3. Фотографии резца под микроскопом (с подкладными пластинами без композиционного покрытия):  
*a* – резец со стороны вспомогательной задней поверхности перед обработкой; *б* – время обработки 2,5 мин; *в* – время обработки 5 мин;  
*г* – время обработки 7,5 мин; *д* – время обработки 10 мин;  
*е* – время обработки 10,6 мин

Фотографии резца под микроскопом с подкладными пластинами с композиционным покрытием представлены на рис. 4.

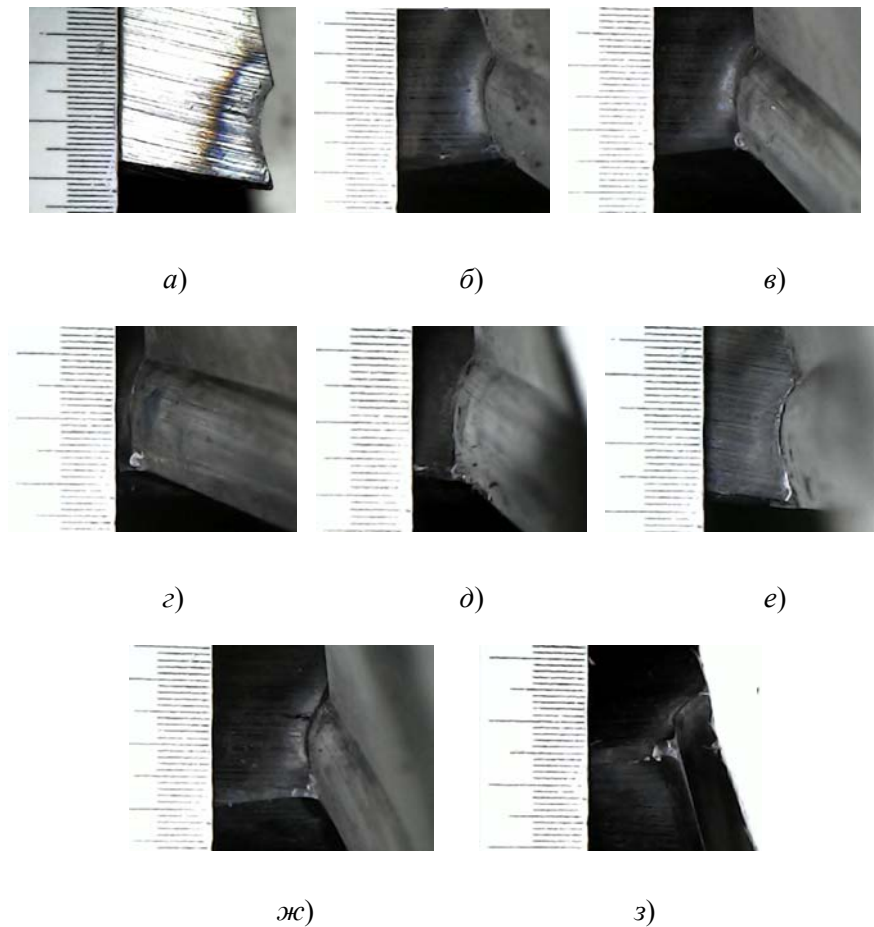


Рис. 4. Фотографии резца под микроскопом (с подкладными пластинами с композиционным покрытием):

*a* – время обработки 2,5 мин; *б* – время обработки 5 мин;  
*в* – время обработки 7,5 мин; *г* – время обработки 10 мин;  
*д* – время обработки 12,5 мин; *е* – время обработки 15 мин;  
*ж* – время обработки 17,5 мин; *з* – время обработки 20 мин

По полученным данным величины износа были построены графики зависимости величины износа от времени для двух экспериментов (рис. 5).

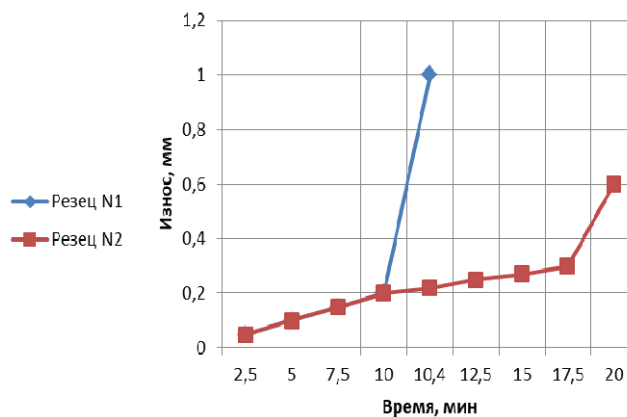


Рис. 5. График зависимости износа от времени

Анализируя полученные данные видно, что в первые пять минут работы износ минимален для двух условий работы, в следующие пять минут наблюдается износ по задней поверхности как для первого условия, так и для второго и по высоте отличаются незначительно. На одиннадцатой минуте в первом эксперименте резец имеет значительное увеличение износа, что видно на рис. 3, *е*. Резец, работающий во вторых условиях, получил наработку на отказ в течение 20 мин.

В результате проведенных исследований установили, что стойкость инструмента увеличилась в 2 раза в результате применения при обработке подкладных пластин с композиционным покрытием.

#### Л и т е р а т у р а

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

УДК 631.354.2.076

### **ВЛИЯНИЕ СЖАТОГО СЛОЯ РАСТИТЕЛЬНОЙ МАССЫ НА КРИТИЧЕСКУЮ СИЛУ РЕЗАНИЯ**

**П. Е. Родзевич**

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

Процессу резания растительной массы воздействием лезвия ножа предшествует процесс ее предварительного сжатия до возникновения на кромке лезвия разрушающего контактного напряжения  $\sigma_p$ . Момент возникновения разрушающего напряжения определяется значением усилия  $P_{кр}$ , прикладываемого к ножу, преодолевающего ряд сопротивлений различного происхождения, возникающих в растительной массе. В большинстве случаев при резании однородных, упруго-вязких материалов усилие  $P_{кр}$ , при котором завершается процесс сжатия материала и начинается резание, является максимальным из всех усилий, возникающих в процессе резания. При анализе силового взаимодействия лезвия с растительной массой критическая сила  $P_{кр}$  и факторы, влияющие на нее и на энергоемкость резания, становятся важным объектом исследования.

При углублении лезвия ножа в слой подпрессованной растительной массы на величину  $H_{сж}$  на его режущей кромке возникает разрушающее контактное напряжение  $\sigma_p$  и начинается процесс резания (рис. 1).

В момент начала резания подпрессованного слоя растительной массы критическая сила  $P_{кр}$ , приложенная к ножу, должна преодолеть сумму всех сил, действующих в вертикальном направлении: силу резания массы  $P_{рез}$ , силу сжатия  $P_{сж}$  до начала резания, силу трения о переднюю и заднюю стенки ножа  $T_1, T_2'$ , т. е.

$$P_{кр} = P_{рез} + P_{сж} + T_1 + T_2'$$

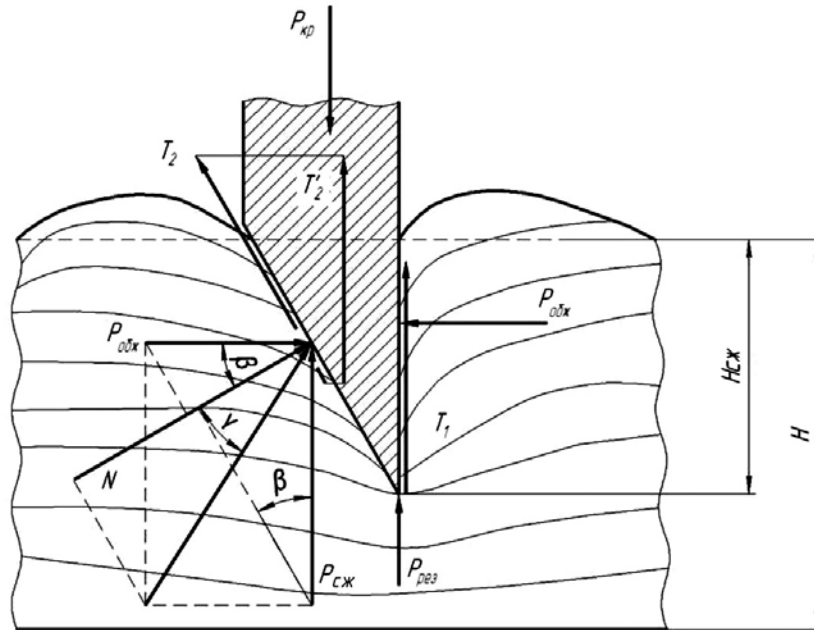


Рис. 1. Схема силового взаимодействия лезвия ножа с растительной массой

Силу  $P_{рез}$  можно определить как произведение площади заточенной кромки лезвия  $F_l$  на разрушающее напряжение  $\sigma_p$  :

$$P_{рез} = F_l \sigma_p = \delta l \sigma_p,$$

где  $\delta$  – толщина кромки лезвия;  $l$  – длина лезвия.

Разрушающее напряжение  $\sigma_p$  является параметром, присущим данному виду материала, и определяют его экспериментально.

Сила сжатия определяется с использованием закона Гука при растяжении-сжатии и может быть определена следующей формулой:

$$P_{сж} = \frac{E}{2H} H_{сж}^2 \operatorname{tg}\beta,$$

где  $E$  – модуль продольной упругости первого рода.

Силы трения определяются выражениями:

$$T_1 = fP_{обж} \text{ и } T_2' = f \left( \frac{1}{2} P_{сж} \sin 2\beta + P_{обж} \cos^2 \beta \right).$$

Сила, обжимающая фаску лезвия ножа, с учетом коэффициента Пуассона  $\mu$  и высоты  $H$  перерезаемого слоя, определяется по выражению

$$P_{обж} = \mu \frac{E}{h} \int_0^{H_{сж}} H_{сж} dH_{сж} = \mu \frac{E}{2} \frac{H_{сж}^2}{H}.$$

## 62 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

Окончательно выражение, определяющее величину критического усилия  $P_{кр}$ , которое необходимо приложить к ножу для того, чтобы под действием лезвия растительная масса начала разделяться на части, имеет вид:

$$P_{кр} = \delta \sigma_p + \frac{E}{2} \frac{H_{сж}^2}{H} [\operatorname{tg} \beta + f \sin^2 \beta + \mu (f + \cos^2 \beta)].$$

В полученное выражение входят как конструктивные параметры лезвия ножа – его острота  $\delta$  и угол заточки  $\beta$ , так и кинематические параметры слоя растительной массы, подаваемого вальцами питающего аппарата: толщина  $H$  перерезаемого слоя и толщина  $H_{сж}$  слоя, сжатого лезвием перед моментом начала резания, а также ряд физико-механических параметров: модуль упругости материала  $E$ , коэффициент трения материала о лезвие ножа  $f$ , разрушающее контактное напряжение на кромке лезвия  $\sigma_p$ .

На рис. 2 представлены результаты расчета критических сил резания при угле заточки  $30^\circ$ , для диапазона толщин кромки лезвия с учетом затупления в процессе эксплуатации (от 0,1 до 0,5 мм), а также от изменения величины сжатого слоя  $H_{сж}$  от 1 до 15 мм для различной высоты  $H$  слоя.

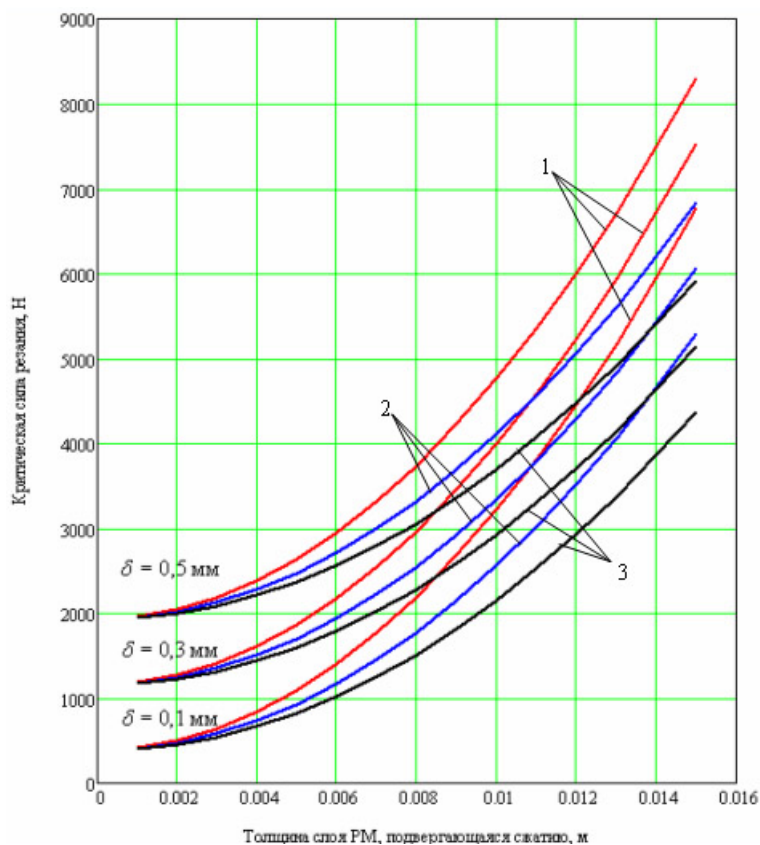


Рис. 2. График зависимости критической силы резания от сжатого слоя растительной массы с учетом остроты лезвия при различной высоте слоя  $H$ :  
1 – слой  $H = 100$  мм; 2 – слой  $H = 130$  мм; 3 – слой  $H = 160$  мм

Таким образом, критическая сила резания и энергоемкость процесса разделения растительной массы зависит не только от остроты  $\delta$  лезвия, но и в значительной мере определяется соотношением величины сжимаемого ножом слоя  $H_{сж}$  к высоте  $H$  самого слоя, подпрессованного вальцами питающего аппарата комбайна. Данное соотношение определяет относительную поперечную деформацию слоя, уменьшение величины которой приводит к снижению критической силы резания и, как следствие, к снижению энергоемкости всего процесса.

#### Литература

1. Резник, Н. Е. Кормоуборочные комбайны / Н. Е. Резник. – М. : Машиностроение, 1980. – 375 с.
2. Влияние углов установки на напряженно-деформированное состояние ножа измельчающего барабана кормоуборочного комбайна / П. Е. Родзевич [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 1. – С. 31–37.

УДК 62-82:519

### ИЗМЕНЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ПОРШЕНЬ ГИДРОЦИЛИНДРА ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

В. Б. Попов

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

Эксплуатация колесных тракторов белорусского и российского производства показывает, что в процессе функционирования подъемно-навесного устройства (ПНУ) важным режимом работы, выполняемым ПНУ с навесным орудием (НО), является его перевод из рабочего в транспортное положение. Шлейф навешиваемых на тракторы орудий и машин имеет тенденцию к росту, при этом многократно повторяемый процесс подъема НО выполняется, как правило, неэкономично.

Одной из причин, затрудняющих эффективное агрегатирование колесных тракторов с разными НО, следует назвать несоответствие применяемых методик расчета ПНУ. Проблема обеспечения грузоподъемности ПНУ связана с обеспечением требуемой динамики (закона) движения поршня гидроцилиндра  $S(t) = f(\ddot{S}, \dot{S}, S, t)$ .

В технических университетах России и Беларуси расчет грузоподъемности ПНУ обычно ведется по известному из учебника [1] выражению

$$m = \frac{F_{шт}^{\max} \eta_{МН}}{g i_s}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса поднимаемого груза (НО) при максимально допустимом усилии на штоке гидроцилиндра  $F_{шт}^{\max}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\eta_{МН}$  – средний КПД МН;  $i_s$  – передаточное число МН, определяемое графоаналитически.

Цель работы – предложить уточненный аналитический расчет параметров уравнения движения нагруженного гидроцилиндра (гидроцилиндров) ПНУ и выражение для расчета его грузоподъемности.

Для формирования адекватной динамической модели нагруженного со стороны механизма навески (рис. 1) гидропривода ПНУ важно получить правильное описание движения поршня гидроцилиндра (ГЦ). При подстановке в уравнение Лагранжа

второго рода выражения для кинетической энергии движущегося НО, считая при этом, что обобщенная сила равна разности между силой, движущей поршень и силой сопротивления движению, после некоторых преобразований получим выражение

$$m(S)\ddot{S} + \frac{1}{2} \frac{dm(S)}{dS} \dot{S}^2 = F_{дв} - [F(S) + F_{тр}^{пр}(S)], \quad (2)$$

где  $S$ ,  $\dot{S}$ ,  $\ddot{S}$  – соответственно обобщенная координата (ход поршня), ее скорость и ускорение;  $m(S)$  – приведенная масса;  $m'(S)$  – производная от приведенной к штоку ГЦ массы по обобщенной координате;  $F_{дв}$  – движущая сила;  $F(S)$  – полезная нагрузка;  $F_{тр}^{пр}(S)$  – приведенная сила трения.

Анализируя левую часть уравнения (2), представляющую выражение для приведенной к штоку ГЦ силы инерции, отметим, что, в отличие от [1], у нас оно состоит из двух компонент. Первая компонента определяет часть силы инерции, зависящую от ускорения поршня, а вторая компонента зависит от скорости поршня и постоянно присутствует в период его установившегося движения.

Приведенная к штоку ГЦ масса НМ определяется из выражения для кинетической энергии элементов замкнутой кинематической цепи, включающей звенья МН и НМ.

$$m(S) = m_6 I_v^2(S) + J_6 \varphi_6'^2(S), \quad (3)$$

где  $m_6$ ,  $J_6$  – соответственно масса и момент инерции НМ;  $I_v(S)$  – аналог линейной скорости центра тяжести НМ;  $\varphi_6'(S)$  – аналог угловой скорости НМ.

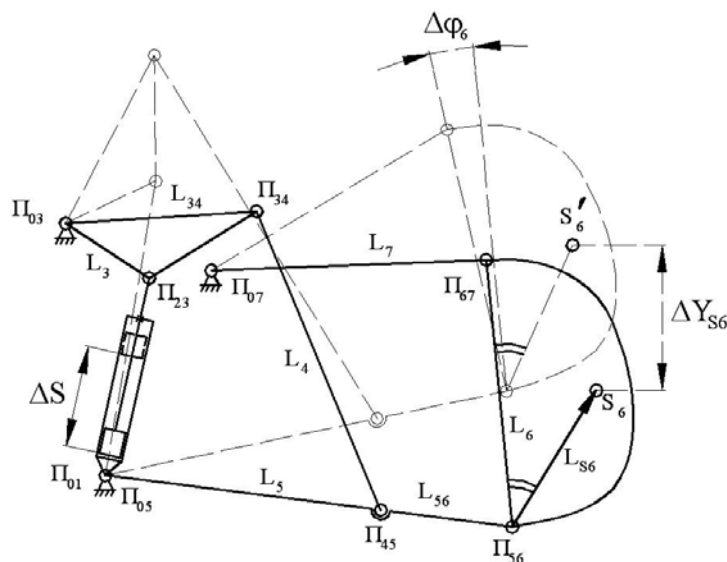


Рис. 1. Схема подъема механизмом навески навесного орудия

В учебной литературе [1], [2] первая компонента определяется через аналог вертикальной скорости центра тяжести НМ –  $I_{S6}(S)$ , что справедливо только в случае плоскопараллельного подъема НМ, а стандарт [3], между тем, допускает завал стойки  $\Delta\varphi_6$  до 15 град (см. рис. 1), при этом вторая компонента в [1] не рассматривается.



вается. Однако с появлением тяжелых рабочих орудий и машин при ограниченной мощности гидропривода ПНУ необходим учет влияния как приведенной силы трения, так и компонент приведенной силы инерции.

Аналог угловой скорости НМ представляет собой производную от угла наклона стойки  $L_6$  по обобщенной координате, связывающей угловые скорости подъемного рычага и НМ и определяется по выражению [4]:

$$\varphi'_6(S) = \varphi'_3(S)U_{63}(S), \quad (3)$$

где  $\varphi'_3(S)$  – аналог угловой скорости поворотного рычага  $L_3$ ;  $U_{63}(S)$  – передаточное отношение угловых скоростей звеньев  $L_6$  и  $L_3$ .

Передаточное отношение  $U_{63}(S)$  определяется в результате кинематического анализа замкнутой кинематической цепи (см. рис. 1), выполняемого при помощи метода замкнутых векторных контуров [5].

В выражении (3) массы и моменты инерции звеньев МН не учитываются, так как они почти на два порядка меньше соответствующих параметров НМ. Аналог линейной скорости центра тяжести НМ определяется как отношение скорости центра тяжести НМ к скорости поршня ГЦ:

$$I_v(S) = \frac{v_{S6}(S)}{\dot{S}}, \quad (4)$$

где  $v_{S6}$ ,  $\dot{S}$  – линейная скорость центра тяжести НМ и поршня ГЦ соответственно.

Поскольку  $v_{S6} = \sqrt{\dot{X}_{S6}^2 + \dot{Y}_{S6}^2}$ , т. е. всегда  $I_v(S) \geq I_{S6}(S)$ , постольку определение приведенной массы НМ по выражению  $m(S) = m_6 I_{S6}^2(S)$  из [1] для случая агрегатирования трактора с тяжелым рабочим НО некорректно. Подставив в выражение для определения  $v_{S6}$  значения для  $\dot{X}_{S6}^2$  и  $\dot{Y}_{S6}^2$  и выполнив некоторые преобразования, получим:

$$I_v(S) = \varphi'_5 \sqrt{[L_{S6}^2 + U_{65}^2 L_{S6}^2 + 2U_{65} L_{S6} L_{S6} \cos(\varphi_5(S) - (\varphi_{S6} + \varphi_6(S)))]}, \quad (5)$$

где  $\varphi'_5$  – аналог угловой скорости нижней тяги.

Производная от приведенной массы определяется по выражению

$$m'(S) = 2[(m_6 I_v(S) I'_v(S) + J_6 \varphi'_6(S) \varphi''_6(S)], \quad (6)$$

где  $I'_v(S)$  – производная от  $I_v(S)$  по обобщенной координате;  $\varphi''_6(S)$  – аналог углового ускорения НМ.

Что касается присутствующей в уравнении (1) приведенной силы трения, то вывод ее аналитического выражения уже рассматривался в [6]. Здесь важно отметить ее переменный характер в отличие от принятого в [1] «усредненного» значения.

Движущая сила в уравнении (1) по величине равна приведенной нагрузке, полезная и основная часть которой равна произведению веса НО на передаточное число:

$$F(S) = P_6 I_{S6}(S), \quad (7)$$

Расчет приведенной массы  $m(S)$  в учебном пособии [1] ведется в соответствии с выражением

$$m(S) = m_6 I_{S6}^2(S). \quad (8)$$

Как следует из выражений (2) и (8), различия между формулами существенны.

Аналитическое выражение для передаточного числа МН позволяет определить соответствующую заданным  $L_{S6}$  и  $\phi_{S6}$  грузоподъемность  $G_{S6}$  ПНУ УЭС:

$$G_{S6} = \frac{p_{\text{ГЦ}}^{\text{max}} F_c - [F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S^*) + F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S^*)]}{I_{S6}^{\text{max}}}, \quad (9)$$

где  $p_{\text{ГЦ}}^{\text{max}}$  – максимальное давление в ГЦ;  $F_c$  – площадь поршня ГЦ;  $F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S^*)$  – приведенная сила инерции и  $F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S^*)$  – приведенная сила трения, определенные для значения обобщенной координаты, соответствующей максимуму передаточного числа (для ПНУ УЭС обычно соответствует транспортному положению НМ).

В данной работе представлено формализованное описание движения поршня гидроцилиндра, нагружаемого от НО через механизм навески ПНУ колесного трактора. Использование этого уравнения уточняет закон движения поршня и расчет грузоподъемности ПНУ трактора.

Формализованное описание выражений для определения приведенной силы инерции позволяет точнее оценить КПД и грузоподъемность базового, модернизированного или проектируемого ПНУ, что важно при ограниченной мощности его гидропривода в случае агрегатирования колесного трактора (или другого мобильного энергетического средства) с тяжелыми НО.

Вес НО и удаление его центра тяжести от оси подвеса МН трактора имеют тенденцию к росту, а траектория подъема НМ может быть воспроизведена только при обеспечении достаточной грузоподъемности ПНУ.

Передаточные числа МН тракторов изменяются по мере подъема НО, а их максимальные значения с одной стороны ограничивают вес поднимаемой НМ, а с другой – существенно влияют на динамику подъема НО.

Разработанная методика автоматизированного расчета приведенных сил инерции и трения в ПНУ УЭС может использоваться для идентичных по структуре ПНУ тракторов, самоходных шасси и фронтальных погрузчиков.

#### Литература

1. Гуськов, В. В. Тракторы. Часть III. Конструирование и расчет / В. В. Гуськов. – Минск : Выш. шк., 1981. – 383 с.
2. Василенко, В. В. Расчет рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин : учеб. пособие / В. В. Василенко. – Воронеж : Истоки, 2004. – 194 с.
3. ГОСТ 10677–2001. Устройство навесное заднее сельскохозяйственных тракторов классов 0,6-8. Типы, основные параметры и размеры. – Минск, 2002. – 8 с. – (Межгосударственный стандарт).
4. 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.
5. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М. : Машиностроение, 1988. – 640 с.
6. Попов, В. Б. Снижение диссипативных потерь в механизмах навески мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 1. – С. 41–48.

## СЕКЦИЯ 2. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАНОМАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

---

УДК 539.2:660(2-8)

### СТРУКТУРА И СТАБИЛЬНОСТЬ БЕССВИНЦОВОГО СПЛАВА ZN-10 мас. % SN, ПОЛУЧЕННОГО СВЕРХБЫСТРЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ

Д. А. Зерница

*Учреждение образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина», Республика Беларусь*

В. Г. Шепелевич

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

Оловянно-цинковые сплавы широко используются в различных отраслях промышленности, в качестве материалов для создания защитных покрытий и припоев. Сплавы системы Sn–Zn являются альтернативой токсичным свинецсодержащим сплавам, поскольку имеют низкую температуру плавления и более высокую прочность [1], [2]. Также к достоинствам следует отнести высокую электропроводность, твердость и прочность на растяжение по сравнению с эвтектическим сплавом Sn–Pb. Получение оловянноцинковых сплавов методом сверхбыстрой кристаллизации позволяет улучшить технические качества за счет формирования пересыщенного твердого раствора, микрокристаллической структуры, дисперсных включений второй фазы.

Целью настоящего исследования является исследование структуры поверхностного слоя и поперечного сечения, а также стабильности при выдержке и термической обработке быстрозатвердевшего (БЗ) заэвтектического сплава Zn-10 мас. % Sn.

Исходные компоненты для приготовления сплавов (чистота не ниже 99,99 %) расплавились в кварцевой ампуле, с последующей заливкой в графитовые тигли (скорость охлаждения  $10^2$  К/с). Далее кусочек сплава расплавлялся и инжестировался на полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра (линейная скорость вращения составляла около 15 м/с). В результате были получены ленты длиной 15 см, шириной 10 мм, толщины находились в интервале 30–100 мкм. Скорость охлаждения сплава, согласно расчетам [3], составляла не менее  $10^6$  К/с. Микроструктура и распределение элементов по поверхности фольги БЗ сплава Zn-10 мас. % Sn исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1455 VP (Carl Zeiss, Германия). Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) и фазовый анализ HKL EBSD Premium System Channel 5 (Oxford Instruments, Великобритания) проводились с помощью приставок к растровому электронному микроскопу. Параметры микроструктуры фольг определены методом хорд случайных секущих, фазовый состав и текстура зерен исследовалась дифрактометром Rigaku Ultima IV с медным анодом (записи дифрактограмм проводились со скоростью  $2^\circ$ /мин). Измерения параметра элементарной ячейки кристаллической решетки  $c$  проведены в соответствии с положением дифракционной линии 0004, используя ПО OriginPro 2018. Полюсные плотности  $p_{hkl}$  дифракционных линий рассчитывались методом Харриса [4]. Микротвердость  $H_u$  по Виккерсу снима-

лась на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 20 г и временем индентирования 60 с. Изохронный отжиг исследуемой системы проводился с интервалом 20 °С и выдержкой 20 мин для температур от 20 до 180 °С.

Установлено, что БЗ сплав Zn-10 мас. % Sn является двухфазным, состоящим из твердых растворов цинка и олова. На дифрактограммах фольг наблюдаются четкие дифракционные линии олова (200, 101, 211, 301 и др.) и слабоинтенсивные пики, принадлежащие цинку (0002,  $10\bar{1}0$ ,  $10\bar{1}1$ ,  $10\bar{1}2$ , и др.). Отметим, что в БЗ фольге формировалась текстура (0001) [5]. Известно, что параметр кристаллической решетки  $c$  чистого цинка составляет 4,944 Å. При легировании цинка оловом происходит увеличение значения  $c$  параметра элементарной ячейки, что указывает на образование пересыщенного твердого раствора замещения на основе олова. В исследуемом сплаве после его получения параметр  $c$  составляет 4,947 Å.

На рис. 1 представлены микрофотографии поверхности (рис. 1, а) и поперечного сечения (рис. 1, б) БЗ фольги сплава Zn-10 мас. % Sn. Полученные с помощью РЭМ изображения в отраженных электронах демонстрируют светлые и темные области (рис. 1, а). Распределение цинка и олова вдоль линии сканирования, полученные с использованием метода РСМА, показали, что серые участки на изображении соответствуют цинку, а светлые – оловянным включениям. Максимумы в распределении олова соответствуют пониженным значениям цинка, что означает преимущественное нахождение олова в виде частиц в матрице цинка. Черные участки на изображении свидетельствуют об образовании окислов. Выделения олова имеют преимущественно равноосную форму, расположены равномерно по поверхности фольги. Средний размер частиц второй фазы на поверхности составляет 0,24 мкм.

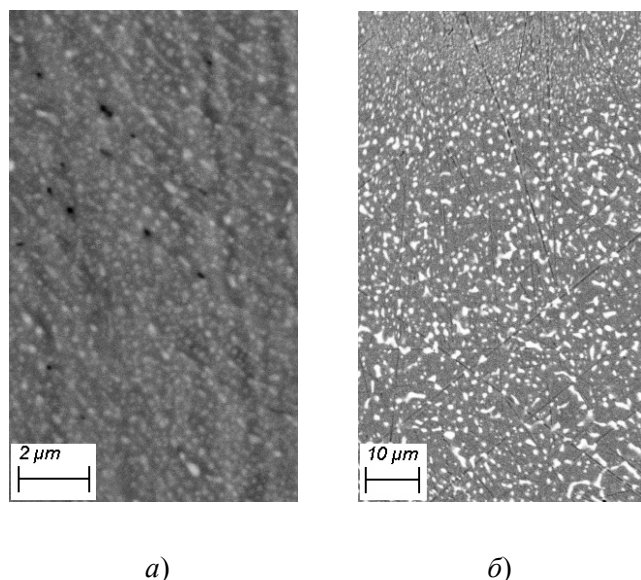


Рис. 1. Микрофотографии:  
 а – поверхности БЗ фольги сплава Zn-10 мас. % Sn;  
 б – поперечного сечения фольги сплава Zn-10 мас. % Sn

Приведенная на рис. 1, б микрофотография поперечного сечения фольги показывает неоднородное распределение частиц второй фазы от расстояния. Верхняя часть фольги контактировала с кристаллизатором в процессе затвердевания. По мере

перемещения фронта кристаллизации скорость охлаждения расплава и величина переохлаждения снижались. Поскольку затвердевание расплава сопровождается выделением тепла, которое приводит к уменьшению переохлаждения последующих слоев, оно способствует уменьшению скорости зародышеобразования олова, что является причиной увеличения средней хорды по мере перемещения фронта кристаллизации. Так, в поверхностном слое БЗ фольги (до 15 мкм) средний размер частиц второй фазы составляет 0,34 мкм и увеличивается до 0,73 мкм в последующих слоях. Средний размер частиц Sn в поперечном сечении 0,55 мкм, а удельная поверхность межфазных границ  $1,22 \text{ мкм}^{-1}$ .

Полученные БЗ сплавы Zn-10 мас. % Sn находятся в неустойчивом состоянии, и выдержка при комнатной температуре вызывает изменение параметра  $c$  элементарной ячейки. Как следует из таблицы, в течение первых шести часов наблюдается уменьшение параметра элементарной ячейки с 4,947 до 4,944 Å, причем дополнительная выдержка в течение двух суток не приводит к изменению  $c$ . Изменение параметра элементарной ячейки целесообразно связать с распадом пересыщенного твердого раствора на основе олова, при котором атомы Sn покидают узлы кристаллической решетки матрицы цинка, вызывая уменьшение параметра  $c$ .

#### Влияние времени выдержки на параметры элементарной ячейки сплава Zn-10 мас. % Sn

Время выдержки при 295 К, ч	Параметр элементарной ячейки $c$ , Å
1	4,947
3	4,945
6	4,944
50	4,944
1*	4,943

\*После 180 °С в течение 1 ч.

График на рис. 2, а демонстрирует изменение микротвердости БЗ фольги сплава Zn-10 мас. % Sn от времени выдержки. В первые шесть часов наблюдается резкое увеличение микротвердости с 670 до 750 МПа. Такой рост связан с выделением дисперсных частиц олова из матрицы цинка. В процессе получения БЗ фольг и их выдержки при комнатной температуре происходит движение дислокаций и малоугловых границ. Дисперсные частицы олова, выделившиеся в результате протекания распада, оказывают влияние на дислокации, тормозят их движение и задерживают миграцию малоугловых границ, с чем связано повышение микротвердости после получения фольги. Также фольги подвергались термической обработке. График изменения микротвердости при изохронном отжиге приведен на рис. 2, б. После 50 °С наблюдается монотонное уменьшение микротвердости, связанное с укрупнением частиц второй фазы [5]. Отметим, что отжиг до 160 °С не вызывает перераспределения полюсных плотностей в фольге, что свидетельствует о сохранении исходной текстуры (0001).

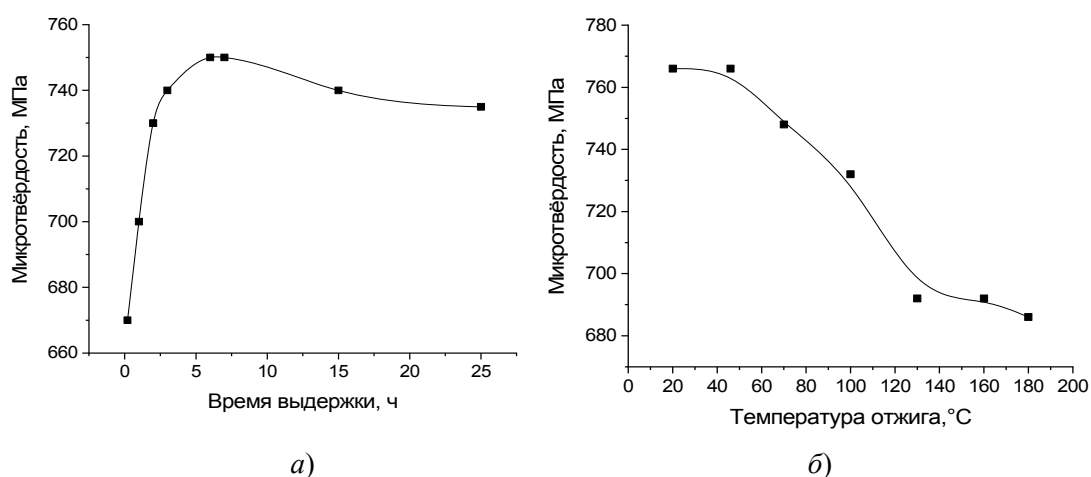


Рис. 2. Изменение микротвёрдости  $H_{\mu}$  фольги:  
 а – в процессе выдержки при температуре 20 °С; б – при изохронном отжиге

Таким образом, БЗ фольги Zn-10 мас. % Sn являются двухфазными, состоящими из твердого раствора цинка и олова. Фольги имеют микрокристаллическую структуру и текстуру (0001). Распределение выделений второй фазы в поперечном слое неоднородное, что связано с уменьшением скорости зародышеобразования олова. После получения БЗ фольг при комнатной температуре наблюдается распад пересыщенного твердого раствора. Дополнительная термическая обработка способствует активизации процесса коалесценции, при котором дисперсные частицы второй фазы образуют более крупные сегрегации. Температуры до 160 °С не вызывают изменения исходной текстуры.

#### Литература

1. Şahin, M. The effect of the solidification rate on the physical properties of the Sn-Zn eutectic alloy / M. Şahin, F. Karakurt // *Physica B: Physics of Condensed Matter*. – 2018. – Vol. 545. – P. 48–54.
2. Liu, S. Present status of Sn–Zn lead-free solders bearing alloying elements / S. Liu, S. Xue, P. Xue // *J Mater Sci: Mater Electron*. – 2015. – Vol. 26, iss. 7. – P. 4389–4411.
3. Мирошниченко, И. С. Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. – М. : Металлургия, 1982. – 168 с.
4. Русаков, А. А. Рентгенография металлов / А. А. Русаков. – М. : Атомиздат, 1977. – 488 с.
5. Зерница, Д. А. Влияние отжига на микроструктуру сплава Sn-8,8 мас. % Zn / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // *Приборостроение – 2019 : материалы 12 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 нояб. 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]*. – Минск, 2019. – С. 295–297.

УДК 621.785.92:620.178.167

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ У8А И 9ХС

Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин

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

При испытании материалов на контактную усталость в условиях воздействия циклических нагрузок основным параметром, определяющим предел контактной выносливости, является твердость сплава. Для сталей твердость металлической мат-

рицы возрастает с увеличением количества углерода. Проведенные исследования [1] показали, что на износостойкость материала большее влияние оказывает соотношение фаз в сплаве. Для изготовления холодновысадочного инструмента, работающего при пульсирующих напряжениях свыше 1000 МПа, наибольшее распространение получили инструментальные стали Р6М5, Х12МФ, 6Х4М2ФС и др. Однако большое содержание карбидообразующих элементов, в частности хрома, приводит к появлению в структуре крупных первичных карбидов, а также карбидной неоднородности в виде полосчатости. В совокупности эти факторы приводят к появлению первоначальных трещин на этапе получения гравюры холодновысадочных пуансонов. Для проведения исследований были выбраны инструментальные стали, в которых отсутствует карбидная неоднородность – 9ХС и У8А. На стойкость инструмента важно также учитывать и влияние других структурных составляющих сплавов – остаточного аустенита. Управляя его количеством, можно получить удовлетворительную стойкость инструмента за счет добавления вязкости при сохранении высокой твердости металлической матрицы. Целью работы является установление влияния количества остаточного аустенита на структуру, твердость и износостойкость в условиях воздействия пульсирующих контактных напряжений инструментальных сталей У8А и 9ХС.

**Методика проведения исследований.** Объектами исследований являлись инструментальные стали 9ХС и У8А. Для получения необходимых механических свойств проводили термическую обработку (см. таблицу). Для установления влияния объемной доли остаточного аустенита на стойкость сталей к контактному изнашиванию половина партий образцов подвергалась криогенной обработке, которую проводили в жидком азоте непосредственно после закалки. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностных слоях сплавов при многократном воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [2]. Установка обеспечивает контактное нагружение торцевой плоскости образца за счет его прокатывания по рабочей поверхности подпружиненного дискового контртела. Величина напряжений, действующих на материал, определяется площадкой контакта между образцом и контртелом. Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление поверхности сплава осуществляли 1–5%-м спиртовым раствором азотной кислоты. Твердость упрочненных сплавов определялась на твердомере Виккерса DuraScan 20 при нагрузке 98,07 Н. Фазовый состав поверхности упрочненных образцов определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.

**Режимы термической обработки и твердость сталей 9ХС и У8А**

Марка стали	Обозначение образцов	Термическая обработка				Твердость, HV/HRC	Аустенит A <sub>ост</sub> , об. %
		Температура закалки, °С	Охлаждающая среда	Криогенная обработка, °С	Температура отпуска, °С		
У8А	▲	780	Вода	–	200	685/59,5	9 ± 1
	Δ			–196		740/61,8	5 ± 1
9ХС	◆	860	Масло	–		730/61,4	5 ± 1
	◇			–196		770/2,9	3 ± 1

После термической обработки основу металлической матрицы инструментальных сталей У8А и 9ХС составил мартенсит отпуска и остаточный аустенит. Данные рентгенофазового анализа показали, что после проведения криогенной обработки объемную долю  $\gamma$ -фазы снизилась с 9 до 5 % в стали У8А и с 5 до 3 % в стали 9ХС. В стали 9ХС дополнительно присутствуют равномерно распределенные мелкодисперсные сферические карбиды размером не более 2 мкм, доля которых может достигать 10–11 % [3].

В результате испытаний образцов циклическими контактными напряжениями с амплитудой  $1300 \pm 65$  МПа получены кривые износа, отражающие зависимость глубины лунки износа от числа циклов нагружения (рис. 1). Изнашивание стали У8А характеризуется двумя этапами (рис. 1, а). После этапа приработки, длительностью 2 тыс. циклов, следует этап высокой стойкости к изнашиванию. При наработке 30 тыс. циклов нагружения суммарная глубина лунки износа достигла 0,10 мм. Проведение криогенной обработки оказало существенное влияние на зависимость изнашивания – появлением этапа ускоренного износа, регистрируемого после 13 тыс. циклов нагружения. Это связано с уменьшением количества остаточного аустенита с 9 до 5 % после охлаждения до температур ниже конца мартенситного превращения, что повысило твердость, а соответственно, и хрупкость стали.

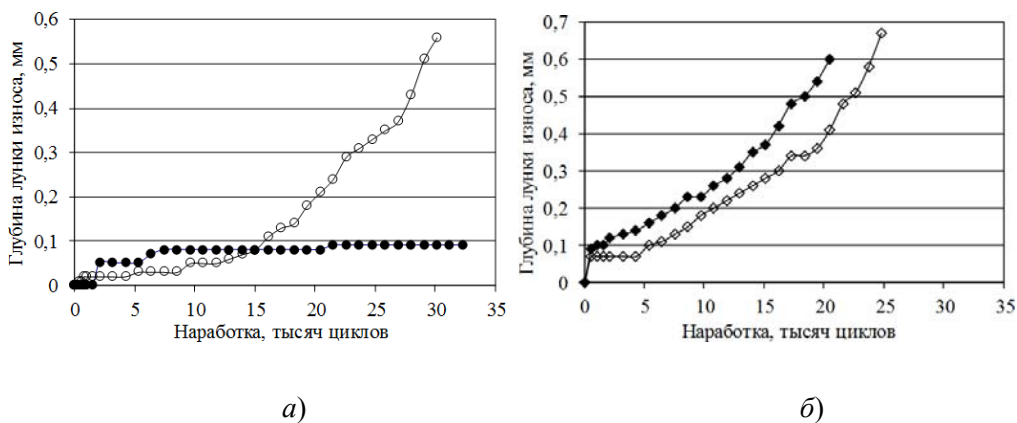


Рис. 1. Зависимости изнашивания от числа циклов нагружения стали У8А (а) и 9ХС (б) в процессе контактного нагружения амплитудой  $1300 \pm 65$  МПа (светлыми маркерами обозначены стали, дополнительно подвергнутые криогенной обработке)

Испытаниями на контактную усталость определено, что сталь 9ХС при напряжениях  $1300 \pm 65$  МПа обладает низкой стойкостью к изнашиванию (рис. 1, б). Это объясняется пониженным содержанием остаточного аустенита 5 % и легированием сплава кремнием, который повышает твердость и предел текучести твердого раствора. Также повышенная концентрация кремния в стали может приводить к снижению значений энергии дефекта упаковки в ней [4], что, в свою очередь, увеличивает вероятность появления трещин при циклическом нагружении [5]. Указанные особенности снижают вязкость и трещиностойкость стали 9ХС. Охлаждение стали 9ХС ниже температуры конца мартенситного превращения способствует небольшому уменьшению объемной доли  $\gamma$ -фазы с 5 до 3 %, которое практически не отражается на износостойкости материала. Изнашивание поверхностного слоя исследованных сталей сопровождается выкрашиванием и отслоением чешуек деформированного сплава с контактной поверхности образцов (рис. 2).



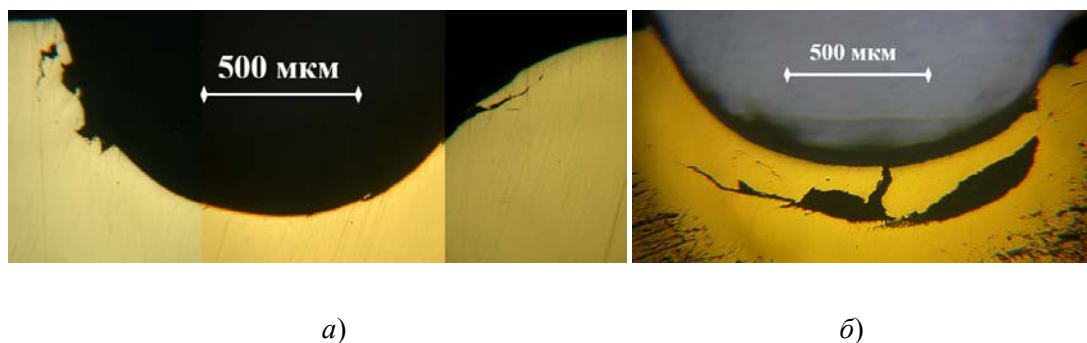


Рис. 2. Разрушение рабочей части образцов из стали У8А (а) и 9ХС (б) в процессе контактного нагружения амплитудой  $1300 \pm 65$  МПа

В результате проведенных испытаний на контактную усталость установлено, что при действии циклических контактных напряжений с амплитудой  $1300 \pm 65$  МПа износостойкость стали У8А значительно превышает износостойкость стали 9ХС. Это связано с пониженным содержанием  $\gamma$ -фазы и дополнительным легированием стали 9ХС кремнием. Указанный легирующий элемент несколько снижает вязкость и трещиностойкость второго сплава. При этом проведение криогенной обработки снижает период высокой стойкости стали У8А и мало отражается на износостойкости стали 9ХС.

#### Литература

1. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев стали 40Х и 35ХГСА / И. Н. Степанкин [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 104–116.
2. Устройство для испытания на контактную усталость и износ : полез. модель 7093 U Респ. Беларусь : МПК G 01N 3/00 / И. Н. Степанкин, В. М. Кенько, И. А. Панкратов. – Оpubл. 28.02.2011.
3. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали : справочник / Ю. А. Геллер. – М. : Metallurgy, 1984. – 584 с.
4. Вдовин, К. Н. Влияние энергии дефекта упаковки на абразивную стойкость отливок из стали Fe-12Mn-1,2C / К. Н. Вдовин, Д. А. Горленко, Н. А. Феокистов // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 9. – С. 603–609.
5. Вишняков, Я. Д. Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов / Я. Д. Вишняков. – М. : Metallurgy, 1975. – 480 с.

УДК 621.785.92

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЦЕМЕНТОВАННЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ 40Х И 42СRМO54

**И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков, А. В. Ковалевич,  
Н. С. Коноваленко, А. В. Радионов, А. А. Кривенкова**

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

Для большого количества деталей машин и инструментальной оснастки, работающих в условиях усталостного изнашивания, основным эксплуатационным фактором является износостойкость материалов. Износостойкость сталей зависит от твердости материала, которая повышается с увеличением углерода в ней. На способность

материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях циклического нагружения немаловажную роль оказывает морфология и размеры включений, а также их равномерное распределение в металлическом каркасе, который воспринимает внешние нагрузки. Самым распространенным и действенным технологическим процессом повешения твердости сталей является цементация [1]. Но после окончательной термической обработки твердость сердцевины деталей не превышает 40 HRC. Повышенную несущую способность сердцевины можно получить при науглероживании среднеуглеродистых сталей. Их твердость сердцевины после закалки может превышать 50 HRC [2]. Однако в литературе практически отсутствуют данные о влиянии температуры отпуска на морфологию и количество карбидной фазы науглероженных слоев, а также превращения металлической матрицы. Полученные данные могут быть применены для проведения дальнейших исследований диффузионных слоев на контактную усталость.

**Методика проведения исследований.** Объектом исследований являлись термомодиффузионно-упрочненные слои сталей 40X и 42CrMoS4, сформированные на образцах для проведения испытаний на контактную усталость. Диффузионное насыщение образцов осуществлялось путем проведения цементации при температуре 920 °С в течение 8-ми и 12-ти часов в древесно-угольном карбюризаторе с добавлением карбоната бария BaCO<sub>3</sub>. Окончательная термическая обработка предполагала проведение закалки в масле с температуры 860 °С и отпуска при 200, 400 и 600 °С. Исследования микроструктуры упрочненных слоев проводились на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление микрошлифов проводилось в 2,5–5%-м спиртовом растворе HNO<sub>3</sub>. Распределение микротвердости термомодиффузионно-упрочненных слоев определяли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,2 кгс. Химический состав сталей 40X и 42CrMoS4 приведен в таблице.

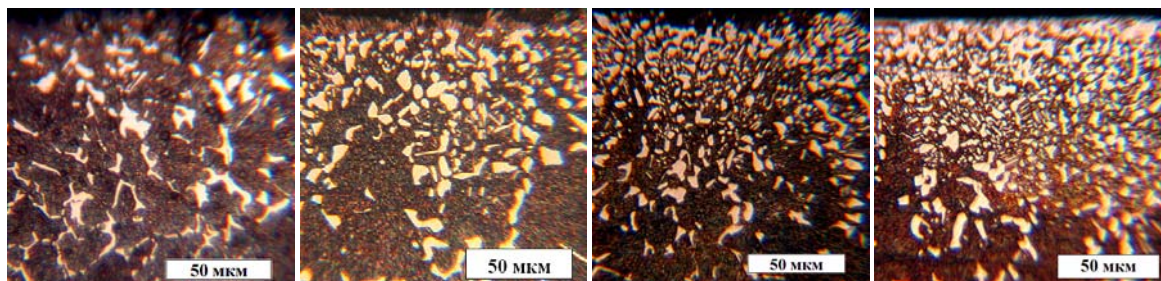
**Химический состав сталей 40X и 42CrMoS4, мас. %**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti	V
0,404	0,249	0,655	0,011	0,010	0,922	0,114	0,197	0,020	0,015	0,001	0,003
0,44	0,23	0,76	0,011	0,031	1,06	0,12	0,22	0,030	0,21	0,002	0,003

Структура металлической матрицы термоупрочненных науглероженных слоев сталей 40X и 42CrMoS4, окончательно подвергнутых низкому отпуску (200 °С), представляет собой мартенсит отпуска и остаточный аустенит с присутствием карбидной фазы. Включения карбидной фазы распространяются на глубину 0,6–0,7 мм и отличаются морфологически. В поверхностном слое стали 40X после 8-часовой цементации объем карбидной фазы составил 20 ± 5 %. Фаза представлена преимущественно разрозненными остроугольными включениями с наибольшими размерами около 15 мкм, расположенными на границах мартенситных блоков (рис. 1, а). При увеличении времени науглероживания до 12-ти часов зерна представлены в виде тонких пластин и в виде округлых включений. Количество фазы увеличилось до 30 ± 5 %, а наибольшие размеры отдельных карбидов составили 10–15 мкм (рис. 1, б).

Морфология науглероженных слоев стали 42CrMoS4 имеет значительные отличия от аналогичных слоев стали 40X. Присутствие молибдена в количестве 0,2 % позволило значительно измельчить аустенитное зерно, что привело к росту большого количества центров зарождения карбидов при охлаждении. В образце после 8-часового науглероживания карбиды имеют размер не более 10 мкм (рис. 1, в),

а в образце после 12-часовой ХТО (рис. 1, *з*) обнаружена коагуляция карбидов, размер которых достигает 30 мкм и более. Объем карбидной фазы при изменении длительности ХТО увеличивается с  $25 \pm 5 \%$  до  $35 \pm 5 \%$ .



а)

б)

в)

з)

Рис. 1. Структура заэвтектоидной зоны цементованных слоев сталей 40X (*а, б*) и 42CrMoS4 (*в, з*) после науглероживания в течение 8-ми (*а, в*) и 12-ти (*б, з*) часов, закалки и низкого отпуска

При повышении температуры отпуска до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  значительных изменений в морфологии и количестве карбидной фазы всех слоев не обнаружено. Однако при проведении высокотемпературного отпуска наблюдается коагуляция вторичных карбидов и выделение мелкодисперсных включений при распаде твердого раствора.

Анализ графиков распределения микротвердости по сечению диффузионных слоев показал, что толщина науглероженных слоев стали 40X, подвергнутых отпуску  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , составила около  $1,8\text{--}2,0 \text{ мм}$  (рис. 2, *а, б*). При увеличении длительности цементации с 8-ми до 12-ти часов максимальное значение твердости поверхностного слоя снизилось с 8500 до 7500 МПа, что может быть связано с увеличением количества остаточного аустенита в заэвтектоидной зоне. Микротвердость сердцевины в обоих случаях оказалась на уровне  $5800\text{--}6100 \text{ МПа}$ . При повышении температуры отпуска до  $400$  и  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  произошло снижение микротвердости по всем упрочненным слоям. Сравнение графиков распределения микротвердости показало, что они имеют достаточно близкие значения. После среднетемпературного отпуска микротвердость сердцевины составила  $4300\text{--}4800 \text{ МПа}$ , а после высокотемпературного – около  $3000 \text{ МПа}$ .

При изучении зависимостей распределения микротвердости науглероженных слоев стали 42CrMoS4 (рис. 2, *в, з*) установлено, что их распределения имеют близкие значения с аналогичными слоями, сформированными на стали 40X. Также следует отметить уменьшение твердости поверхности слоя после увеличения длительности цементации и проведения окончательного низкого отпуска.

Проведенные исследования термоупрочненных науглероженных слоев сталей 40X и 42CrMoS4 позволили установить следующие зависимости:

1. Поэтапное увеличение температуры отпуска с  $200$  до  $400$  и  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  оказало незначительное влияние на объемную долю карбидной фазы в заэвтектоидной зоне науглероженного слоя стали 40X после 8-часовой ХТО. Ее количество находится в интервале  $20 \pm 5 \%$ . В заэвтектоидной зоне после 12-часовой ХТО количество карбидной фазы возросло до  $30 \pm 5 \%$ . Присутствие небольшого количества молибдена в стали 42CrMoS4 приводит к повышению объемной доли карбидной фазы по сравнению с аналогичными слоями, сформированными на стали 40X. Ее количество

## 76 Секция 2. Современные материалы, наноматериалы в машиностроении

составило  $25 \pm 5\%$  и  $35 \pm 5\%$  после 8- и 12-часовой ХТО соответственно. Распространение карбидной фазы всех слоев отмечено на глубину 0,6–0,7 мм.

2. При увеличении температуры отпуска снижается градиент микротвердости от поверхности к сердцевине образцов всех слоев исследованных сталей.

3. При увеличении длительности цементации с 8-ми до 12-ти часов максимальное значение твердости поверхностного слоя образцов обеих исследованных сталей, подвергнутых окончательному низкому отпуску, снизилось с 8200–8500 МПа до 7300–7500 МПа. При этом твердость сердцевины во всех случаях составила около 6000 МПа. При дальнейшем проведении среднего и высокого отпусков кривые распределения микротвердости имеют близкие зависимости.

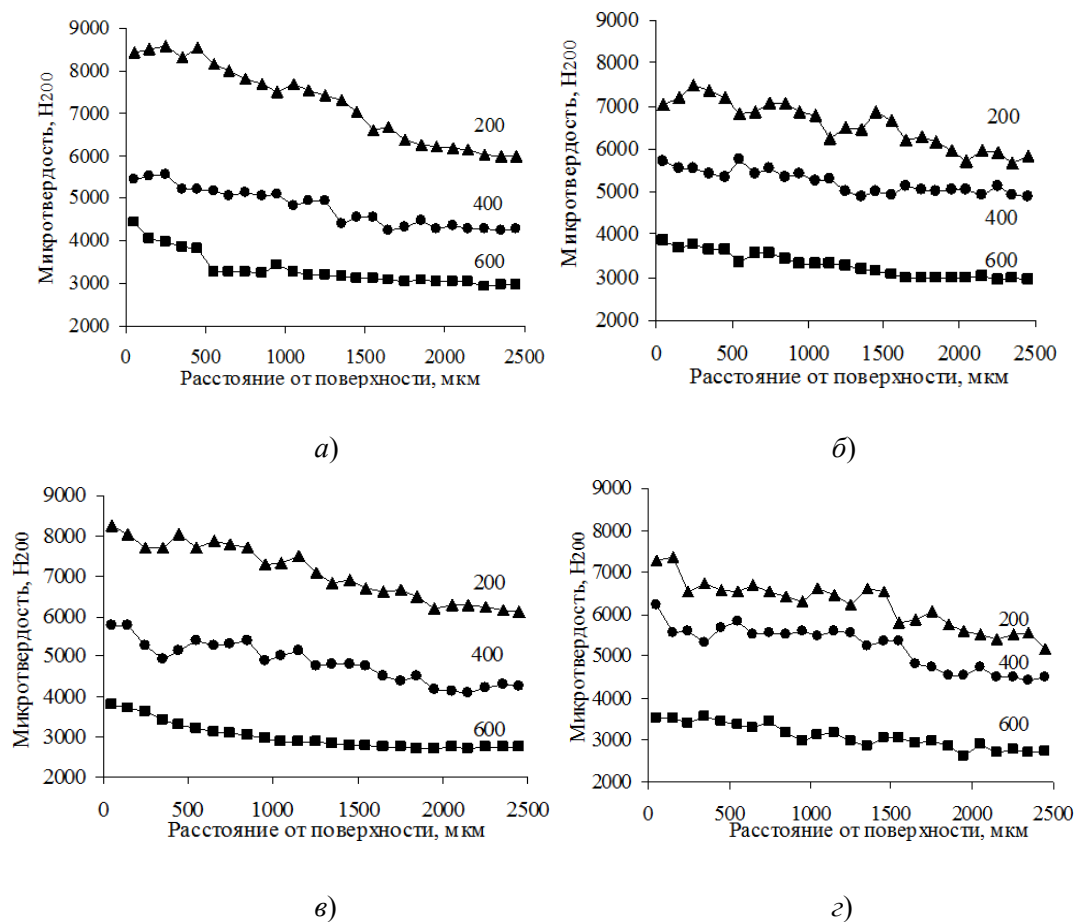


Рис. 2. Распределение микротвердости по сечению науглероженных слоев сталей 40X (а, б) и 42CrMoS4 (в, г) (цифры на графиках указывают температуру отпуска): а, в – 8-часовая цементация; б, г – 12-часовая цементация

### Литература

1. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов : учеб. для машиностр. вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1980. – 493 с.
2. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки : учеб. пособие / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – М. : Новое знание ; Минск : Новое знание, 2010. – 304 с.

УДК 621.771.25

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ НИОБИЕМ ВЗАМЕН ВАНАДИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ АРМАТУРЫ

Ю. Л. Бобарикин, А. И. Пости

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

Наиболее распространенным микролегирующим элементом при производстве арматуры класса 500 массового назначения является ванадий. Технология производства этой продукции является многостадийной и затратной, поэтому применение феррованадия делает производство ванадийсодержащей арматуры нерентабельной. В связи с этим возникла необходимость снижения себестоимости готовой продукции. Предложено заменить феррованадий на феррониобий с сохранением всех механических, физических и эксплуатационных характеристик металла арматуры.

Цель работы – определить влияние количественного содержания ниобия в стали при производстве горячекатаной арматуры S-500WC в бухтах на стане 370/150 ОАО «БМЗ» в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013 при различных температурно-скоростных параметрах проката.

Нормируемыми показателями механических свойств арматурной стали S-500WC всех арматурных профилей (№ 8–16) в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013 являются – предел текучести  $R_e = 500–650$  МПа, пластичность  $R_m/R_e = 1,15–1,35$ . Относительное удлинение  $A_{10}$  не менее 11 % и  $A_{gt}$  не менее 7,5 %.

Как правило, микролегирование ниобием ассоциируется с термомеханической (ТМ) прокаткой, при которой либо до, либо во время конечной прокатки происходит подавление рекристаллизации аустенита до такой степени, чтобы фактически рекристаллизация аустенита не произошла, т. е. прокатка при температуре, при которой не происходит рекристаллизация стали или кратко  $T_{nr}$ . При дальнейшей горячей прокатке аустенитные зерна будут эффективно «расплющиваться», т. е. удлиняться, что является положительным эффектом. Эту критическую температуру в °С можно приблизительно определить, используя опубликованные уравнения [1]:

$$T_{nr} = 887 + 464C + (6445Nb - 664Nb^{1/2}) + (732V - 230V^{1/2}) + 890Ti + 363Al - 357Si.$$

Широко известно, что замедление рекристаллизации аустенита связано с явлением примесного торможения атомами ниобия и главным образом за счет вызванного деформацией выделения «свежих» или «новых» фаз Nb (С, N). В результате при последующих восстановлениях аустенитные зерна становятся удлиненными и, таким образом, образуют большую эффективную площадь поверхности границ зерен. Вместе с образованием полос деформации внутри зерен способность к образованию ферритных зерен существенно увеличивается. Именно этот процесс образования расплющенного или удлиненного аустенита, который называют «улучшением» структуры и основной характеристикой классической термомеханической прокатки (ТМ), что, в свою очередь, приводит к развитию более мелкого ферритного зерна и, следовательно, более высокой прочности и улучшенной ударной вязкости (уравнение Холла–Петча).

В соответствии с общепринятой практикой для этого должно быть достаточное количество растворенного ниобия в начале процесса, так как в итоге количество рас-

творенного ниобия будет определяющим в эффективности ТМ прокатки за счет примесного торможения и выделения, вызванного деформацией. Следовательно, в целях максимально возможного увеличения эффективности ниобия требуется достаточно высокая температура предварительного нагрева заготовки для повторного введения ниобия в раствор в высокотемпературную аустенитную микроструктуру. Эта критическая температура в первую очередь зависит от содержания углерода С, азота N и ниобия в самой стали. Условия равновесия для растворения микролегирующего элемента можно рассчитать с помощью «произведения растворимости», которое эффективно обеспечивает управление этой критической температурой, при которой достигается полная растворимость. Обычно применяемое произведение растворимости в опубликованной литературе представлено Ирвином и Пикерингом [2]:

$$\text{Log}[\text{Nb}][\text{C} + 12/14\text{N}] = 2,26 - 6700/T,$$

где  $T$  – температура растворимости, °К.

Уравнение показывает, что путем снижения содержания углерода и азота можно использовать больше ниобия для процесса ТМ прокатки, а также для вторичного дисперсионного упрочнения. Кроме того, для заданного содержания углерода и азота применение более высокой температуры позволит использовать больше ниобия (в качестве растворенного вещества). Однако для коммерческой горячей прокатки арматуры существуют некоторые ключевые факторы, которые при первоначальном рассмотрении, исходя из вышеизложенного, позволяют предположить, что роль ниобия в арматуре может быть ограничена: 1) температурами нагрева < 1150 °С; 2) более высоким содержанием углерода > 0,20 % С; 3) высокими обычными температурами чистовой прокатки > 975 °С.

Освоение технологии производства арматуры S-500WC в бухтах четырехстороннего периодического профиля происходило на трех плавках с различным содержанием ниобия (см. таблицу).

**Содержание ниобия в разливочной пробе, углеродный эквивалент**

Номер плавки	Содержание ниобия, %	Углеродный эквивалент
1	0,0594	0,515
2	0,0282	0,448
3	0,0241	0,422

Температура поверхности непрерывно литых заготовок сечением 140 × 140 мм после нагрева в проходной нагревательной печи стана 370/150 и последующем прохождении гидросбива перед задачей в первую прокатную клетку составляла 1080 ± 20 °С.

На рис. 1 представлена зависимость механических свойств арматуры S-500WC плавки № 1 микролегированной ниобием от температуры самоотпуска в зоне виткообразователя. При каждой последующей прокатке увеличивалась температура в зоне виткообразователя (температура самоотпуска). Можно отметить, что до температуры 730 °С на виткообразователе, стабильно имеем предел текучести выше 500 МПа. При увеличении этой температуры значение предела текучести снижается и увеличивается пластичность металла. Во всех случаях прокатки эстафетных заготовок значение пластичности металла превышает требуемые (1,15–1,35) ввиду высокой прочности, данная ситуация объясняется химическим составом стали. Также во всех

случаях производства арматуры профилей № 8–14 при механических испытаниях образцов зафиксированы несоответствия  $A_{gt}$  при норме не менее 7,5 %, большинство значений ниже либо находятся на минимально допустимом уровне.

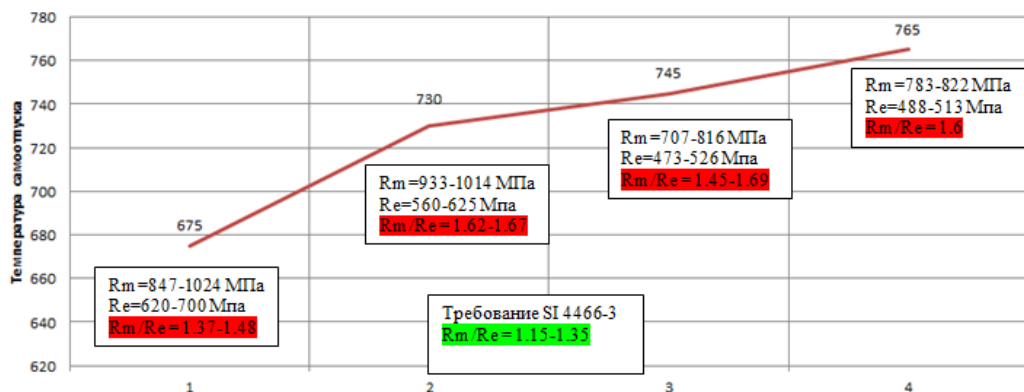


Рис. 1. Зависимость механических свойств арматуры S-500WC от температуры самоотпуска (в зоне виткообразователя): 1, 2 – профиль № 8; 3 – профиль № 10; 4 – профиль № 14

Ввиду неполучения требуемых механических свойств в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013 на плавке № 1 было принято решение провести эстафетную прокатку плавки № 2. Температурно-скоростные параметры производства представлены на рис. 2 со скорректированным химическим составом по количественному содержанию ниобия и углеродному эквиваленту (см. таблицу).

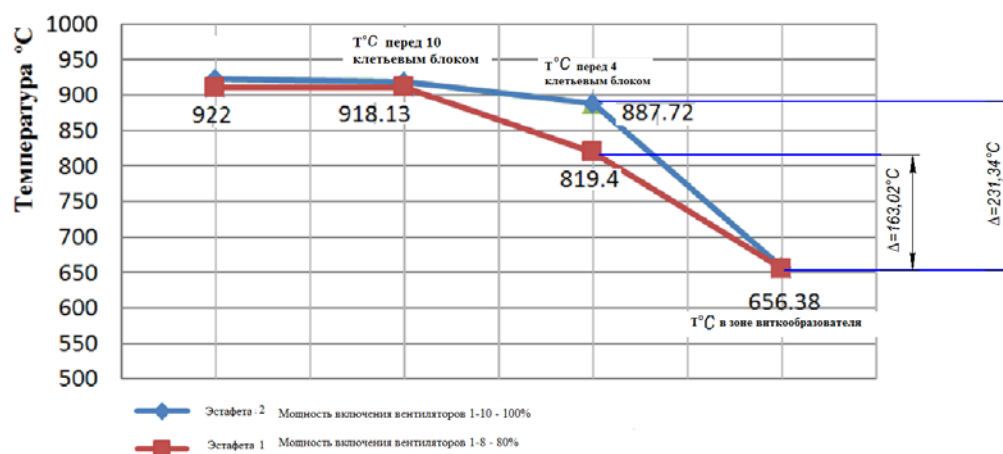


Рис. 2. Температурный режим производства арматурного профиля № 8 марки стали S-500WC плавки № 2

По результатам эстафеты № 1 плавки № 2 были получены несоответствующие значения механических свойств в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013, а именно отношение прочности к текучести  $R_m/R_e$  (при норме 1,15–1,35, факт 1,36–1,43), остальные значения соответствовали стандарту. Данное несоответствие объясняется высокими значениями предела прочности  $R_m = 711–736$  МПа.

С целью увеличения предела текучести для соответствия стандарту по механическим свойствам (показатель пластичности  $R_m/R_e$ ) была проведена вторая эстафета плавки № 2, в которой был увеличен градиент между температурой перед ТМВ и температурой самоотпуска в зоне виткообразователя. Режимы двухстадийного охлаждения арматуры эстафеты № 2 представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, температурный градиент увеличился на 68,32 °С. Положительных результатов также достигнуто не было.

После проката эстафет двух плавок № 1, 2 и, проанализировав полученные результаты механических испытаний, которые не соответствуют требованиям израильского стандарта, было принято решение скорректировать химический состав стали в сторону уменьшения легирующих элементов, а именно снижено содержание Nb и углеродного эквивалента – плавка № 3 (см. таблицу). Все результаты механических испытаний после производства плавки № 3 (см. таблицу) соответствуют требованиям израильского стандарта SI 4466-3:2013.

Таким образом, разработан химический состав стали, позволяющий получить механические свойства арматуры S-500WC в соответствии с SI 4466-3 с использованием микролегирования ниобием взамен ванадия.

На основе данного химического состава разработаны температурно-скоростные параметры производства арматуры S-500WC – профиля № 8, 12, 14, 16, микролегированной ниобием.

Выявлены основные факторы, влияющие на механические свойства арматуры S-500WC микролегированной ниобием, такие как температура конечной деформации, способ водяного распределения и охлаждения в водяных камерах, температура самоотпуска.

#### Литература

1. Yue S. and Jonas J. J. The three critical temperatures of steel rolling and their experimental determination. *Materials Forum*, 14, 1990. – P. 245–252.
2. Irvine K. J., Pickering F. B. and Gladman T., *J. Iron Steel Inst.*, 205 (1967). – P. 161–182.
3. Speich G. R. [et al.], in “Phase Transformations in Ferrous Alloys”, ed. A. R. Marder [et al.], (TMSAIME, Warrendale, PA, USA, 1984) – P. 341–390.

УДК 624

## **К ВОПРОСУ О НОВЫХ МАТЕРИАЛАХ**

**И. Н. Плющевский, Е. А. Бородавко**

*Государственное научное учреждение «НИЭИ Минэкономики  
Республики Беларусь», г. Минск*

Необходимость повышения эксплуатационной надежности и срока службы изделий различных отраслей промышленности, работающих в условиях той или иной степени экстремальности (температура, агрессивные среды, эрозионное воздействие), ставит задачу разработки новых материалов.

Зачастую предприятие интересуется новым материалом, как правило, в виде изделия, готового непосредственно для использования в производстве. В условиях, например, предприятий Министерства промышленности Республики Беларусь (далее – Минпром) говорить о новом материале требуемой функциональности можно, как правило, только как об изделии. Непосредственно материал как сырье или полуфабрикат, из которого изготавливается та или иная деталь или изделие, в случае металла



зачастую является импортной продукцией с требуемым соответствием ГОСТу. Тогда к новым следует относить изделие на металлической основе, сформированное определенным технологическим воздействием на материал с последующим созданием различных покрытий и слоев, повышающих свойства. Однако новым оно может быть, если применялся новый состав наносимого вещества, ранее нигде не использованного. Если же использовалось покрытие известного состава, то говорить о таком изделии (материале) можно как о видоизмененном или новом в пределах данного производства для конкретной детали.

В целом судить о возможностях организации производства новых материалов различного функционального назначения на предприятиях можно через призму актуальных технологических задач, а также задач импортозамещения.

Так, организациями и предприятиями Республики Беларусь различной ведомственной подчиненности<sup>1</sup> формируются запросы по созданию новых технологий и решению проблемных вопросов и сводятся в Межотраслевой задачник [1]. Анализ сформированных на 2020 г. запросов организаций Минпрома, направленных на получение от сторонних исследовательских организаций проработанных предложений, показал, что менее трети из них можно отнести сугубо к новым материалам и технологиям. То есть предприятия Минпрома, деятельность которых во многом связана с технологиями металлообработки и электротехнической продукции, не заинтересованы в разработке новых материалов как основных для своих производств.

Степень потребности производств в изделиях из новых материалов также косвенно можно оценить из задач импортозамещения. Так, Минпромом в рамках Схемы импортозамещения формирует перечень товарных позиций ТН ВЭД. Приблизительно по 70 % товарных позиций (360 наименований) продукция в целом не выпускается. При этом как таковых изделий из новых материалов не встречается, но отмечается ряд позиций (около 35 наименований), в которых гипотетически могут находиться изделия из новых материалов с иным химическим составом или с более высокими свойствами после воздействия определенными технологиями. В любом случае в настоящий момент невозможно прогнозировать вероятность использования тех или иных новых материалов и технологий при отсутствии производства соответствующей продукции.

В Республике Беларусь промышленность в большей степени имеет общемашиностроительный характер; металлические материалы как самостоятельный продукт либо как составная часть композита в большинстве своем является импортным товаром, а промышленность Республики Беларусь во многом – металлообрабатывающей. Вместе с тем, рассматривая вопрос организации производств новых материалов, разрабатываемых отечественными научными учреждениями, следует исходить из их востребованности и возможностей промышленного сектора. С этой целью проводился опрос предприятий Минпрома (21 респондент) и в целом можно резюмировать следующее.

*Во-первых*, установлено, что наиболее важными направлениями инновационной деятельности респонденты считают «разработку новых технологий производства своей традиционной продукции», а затем уже «разработку новых технологий производства своей новой продукции» (но в целом они практически находятся на одной ступеньке актуальности). Далее следуют такие направления, как «частичная модер-

---

<sup>1</sup>Министерство промышленности, Министерство энергетики, Министерство архитектуры и строительства, Министерство здравоохранения, концерн «Беллегпром», концерн «Белнефтехим», концерн «Беллесбумпром».

## 82 Секция 2. Современные материалы, наноматериалы в машиностроении

низация существующих технологических систем» и «адаптация закупаемого зарубежного оборудования/технологии». Можно констатировать недостаточную заинтересованность производственных организаций в разработках и внедрении новых материалов и технологий их обработки, что экстраполируется на отсутствие намерений у них производить новые материалы или изделия из них.

*Во-вторых*, в части перспективного использования новых материалов или изделий большинство предприятий не считают целесообразным собственное их производство и не видят ни заинтересованности, ни необходимости самим осваивать новый материал и, соответственно, перестраивать технологические участки с последующей постановкой продукции на производство на основе переданной технологии. Для себя они считают актуальным приобретение готового оборудования для выпуска продукции, отвечающего необходимым требованиям предприятия, независимо от страны происхождения.

*В-третьих*, предприятия не готовы организовывать собственное производство интересующих материалов при недостаточной мощности опытно-промышленных участков организаций-разработчиков.

*В-четвертых*, из 21 опрошенного предприятия более половины (13 респондентов) в области новых материалов совместными исследованиями и разработками со сторонними организациями не занимаются.

*В-пятых*, наибольшая заинтересованность предприятий Минпрома сводится к традиционным конструкционным и инструментальным материалам. При этом подавляющая часть респондентов сфокусирована на приобретении и использовании новых материалов в своем производстве, нежели на их разработке и производстве на собственном предприятии. Общие тенденции потребностей респондентов следующие:

- конструкционные детали и изделия, сформированные методом порошковой металлургии;
- инструмент с износостойкими покрытиями;
- твердые сплавы (из карбидов вольфрама, титана и др.);
- биметаллические материалы;
- сверхтвердые композиты на основе нано- и микропорошков кубического нитрида бора и алмазов для лезвийного и абразивного инструмента;
- конструкционные керамические материалы;
- стали и сплавы с нанесенными функциональными покрытиями различного назначения;
- общие конструкционные материалы.

Узкофункциональные и интеллектуальные материалы интересуют респондентов в единичных случаях, имеют весьма ограниченное применение и не носят критического уровня в потребностях, когда следует задумываться о собственном производстве для собственных нужд.

*В-шестых*, у большей части производственных предприятий Минпрома (около 2/3 респондентов) не имеется неудовлетворенных потребностей в новых материалах.

Также по средствам опроса были установлены факторы, в наибольшей степени препятствующие внедрению на производственные предприятия отечественных разработок в области новых материалов и технологий, а именно:

- высокие затраты на разработку новых материалов и изделий из них, новых технологических процессов в действующем производстве;

- высокая доступность соответствующих зарубежных материалов, оборудования и технологий (в первую очередь китайских), готовых к непосредственному использованию и эксплуатации и по более низким ценам;
- длительные сроки окупаемости.

Можно предположить, что если не будут найдены пути снижения затрат на разработки и получение результата высокого конкурентного качества, то продолжится ориентированность промышленного сектора на закупку соответствующей зарубежной продукции.

Дополнительно проводилась работа по выявлению факторов, препятствующих, по мнению научно-исследовательских частей (далее – НИЧ) учреждений Министерства образования Республики Беларусь (далее – Минобразования), внедрению отечественных разработок в области новых материалов и технологий. В качестве основных установлены:

- высокие затраты на разработку новых материалов и изделий из них, на внедрение новых технологических процессов;
- недостаток собственных средств для разработки и освоения.

Это в целом согласуется с мнением предприятий Минпрома. Вместе с тем наблюдается явный диссонанс в ответах, касающихся пункта о «высокой доступности соответствующих зарубежных материалов, оборудования и технологий, готовых к непосредственному использованию и эксплуатации и по более низким ценам». Если для предприятий Минпрома это она одна из основных, то с точки зрения НИЧ учреждений высшего образования данный фактор не принципиален. Следовательно, очевидна меньшая осведомленность научных подразделений о конкурентной зарубежной продукции. Это банально подчеркивает отсутствие рабочей взаимосвязи между реальным и научным секторами экономики. Отсюда вытекает и невосприимчивость предприятий-партнеров к новым материалам, которая, по мнению учреждений Минобразования, является одной из существенных причин. С учетом этого и принимая во внимание сложности вывода и реализации новой продукции на рынке, вероятность создания новых производственных участков области новых материалов на предприятиях Минпрома крайне ограничена.

Таким образом, предприятия Минпрома не заинтересованы в производстве новых материалов-изделий на собственной территории, а также не считают целесообразным производство при недостатке мощностей опытных производств у организаций разработчиков. Также не было получено положительных ответов на целесообразность формирования отдельного производственного предприятия или участка для каких-либо материалов или изделий. Перспективу в использовании или оценке применения предприятия видят в приобретении соответствующего оборудования для своих целей или новых материалов (изделий), производимых сторонними организациями-разработчиками.

#### Л и т е р а т у р а

1. Межотраслевой задачник: Запросы организаций и предприятий Республики Беларусь по созданию новых технологий и решению проблемных вопросов в 2020 году. – Режим доступа: [http://imu.icm.by/files/Zadachnik\\_2020.pdf](http://imu.icm.by/files/Zadachnik_2020.pdf). – Дата доступа: 02.10.2020.

УДК 538.975:539.216.2:621.793.18

**ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ И ОПТИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЕВ ЗОЛОТА  
ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ**

**Е. Н. Галенко**

*Учреждение образования «Мозырский государственный педагогический  
университет имени И. П. Шамякина», Республика Беларусь*

**С. А. Шарко, А. И. Серокурова**

*Государственное научно-производственное объединение  
«Научно-практический центр Беларуси по материаловедению», г. Минск*

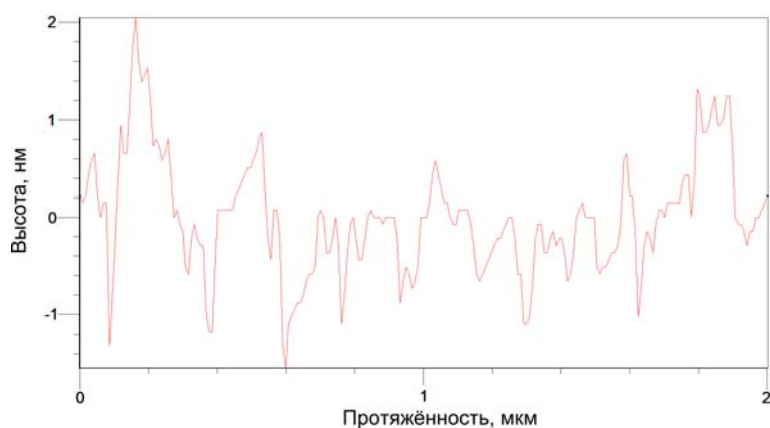
Уникальные свойства золота далеко не исчерпываются только лишь высокой коррозионной стойкостью и электропроводностью. Большой интерес представляют также его оптические свойства. Так, нанометровые слои золота пропускают до половины падающего электромагнитного излучения в оптическом диапазоне [1], что может быть успешно использовано при создании, например, лазеров на нитриде галлия. Золото также обладает высоким отражением (более 90 %) в диапазоне длин электромагнитных волн от инфракрасного до радиоволн и выше, что предопределяет его использование в качестве электромагнитных экранов.

Эффективным методом получения тонких слоев различных материалов (металлов, полупроводников, диэлектриков) как однокомпонентных, так и многокомпонентных систем является ионно-лучевое напыление (ИЛН). Преимуществом данного метода является пространственное разделение источников ионов, мишени и подложки [2], что позволяет гибко контролировать процесс напыления и воздействовать на свойства получаемых тонких пленок. С другой стороны, низкое давление в рабочей камере ( $10^{-1}$ – $10^{-3}$  Па), ограниченное лишь быстротой откачки, улучшает качество получаемых структур.

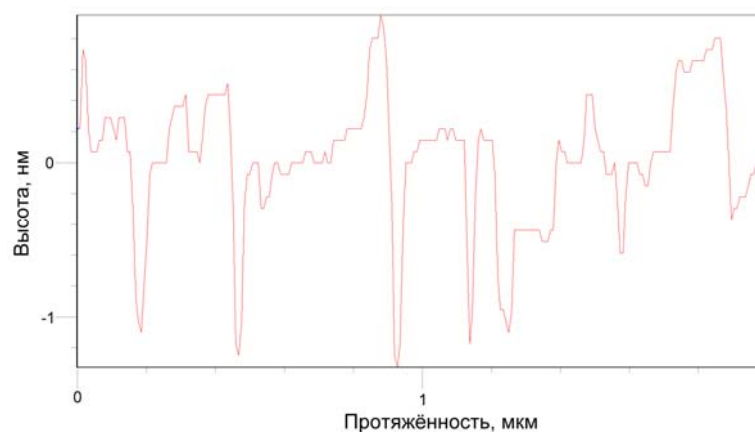
Основная проблема при получении тонких слоев золота заключается в низкой адгезии слоя металла к подложке. Для повышения адгезии перед формированием основного слоя в данной работе был использован метод ИЛН с дополнительным напылением и последующим распылением наноразмерного (1–2 нм) слоя золота и исследовались различия в морфологических и оптических свойствах наноразмерных пленок золота, полученных как при непрерывном напылении, так и при использовании дополнительной операции напыления – распыления.

Морфология поверхности исследовалась методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью программы MTM Surface Explorer. Оптические характеристики (коэффициент отражения) слоев золота на кварце были получены с помощью спектрофотометра НІТАСНІ-340.

Из рис. 1 видно, что образец, полученный повторным напылением, имеет меньшие значения среднеарифметической ( $R_a$ ) и среднеквадратической ( $R_z$ ) шероховатостей – соответственно, 0,3 и 0,4 нм и разброс высот от –1,3 до +0,95 нм, чем в аналогичных образцах, полученных непрерывным напылением ( $R_a = 0,6$  нм,  $R_z = 0,8$  нм, разброс –1,5 до +2 нм).



а)



б)

Рис. 1. АСМ профиль поверхности образца, полученного непрерывным напылением (а) и с применением методики повторного напыления – распыления (б)

На рис. 2 представлены спектры отражения двух образцов слоев золота толщиной 10 нм на кварце, полученных в разных условиях. Из графиков следует, что образец, полученный с использованием операции напыления – распыления, начиная примерно с 700 нм (красный и ближний ИК-спектр), имеет значения коэффициентов отражения  $R$  выше, чем аналогичный образец, полученный без применения данной операции. Причем анализ соотношений между оптическими коэффициентами на длине волны 850 нм для слоев золота, полученных с применением дополнительного напыления – распыления ( $R = 83,0\%$ ,  $T = 4,6\%$ ,  $A = 12,4\%$ ) и без его применения ( $R = 80,7\%$ ,  $T = 6,8\%$ ,  $A = 12,5\%$ ), позволяет заключить, что отражение увеличивается в основном за счет уменьшения пропускания, а не поглощения волн. Это свидетельствует о формировании более качественной структуры наноразмерных слоев, что подтверждается АСМ исследованиями.

Для объяснения формирования качественного слоя металла на поверхности подложки при использовании дополнительной операции напыления – распыления наноразмерного слоя золота следует учесть, что в указанных выше условиях ионного распыления на поверхность подложки падает поток распыленных атомов золота,

в котором условно выделяют три группы частиц. Более 80 % наиболее медленных атомов золота в потоке имеют среднюю энергию примерно 2 эВ, менее 15 % – примерно 5 эВ и около 5 % атомов золота характеризуются энергией более 12 эВ.

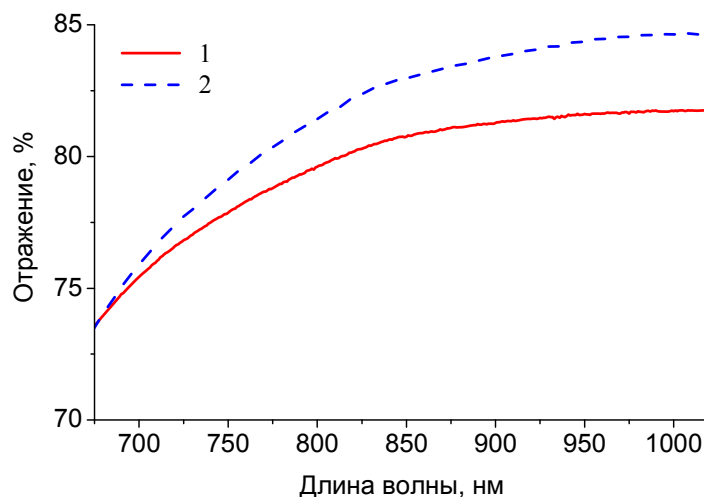


Рис. 2. Спектр отражения образцов золота толщиной 10 нм на кварце, полученных непрерывным напылением 1 и с применением повторного напыления – распыления 2

Высокоэнергетические атомы с энергией, более чем в два раза превышающей энергию связи подавляющего большинства известных оксидных и фторидных материалов, способны внедриться в приповерхностный слой подложки на глубину до пяти постоянных кристаллической решетки [3]. Глубина внедрения дефектов в несколько постоянных решетки сравнима с толщиной исходного нарушенного поверхностного слоя подложки естественного происхождения. При количестве этих дефектов менее 10 % от поверхностной плотности материала подложки не происходит ухудшения исходного качества поверхности подложки и ее основных свойств. Внедренные атомы золота являются, с одной стороны, точечными дефектами в приповерхностном нарушенном слое подложки, а с другой стороны, служат дополнительными центрами кластерообразования. Они приводят к улучшению адгезии из-за формирования дополнительных физических связей *внедренный атом золота – осажденный атом золота*. Повторное осаждение слоя золота в указанных выше условиях позволяет не менее чем в два раза увеличить число внедренных атомов золота, дополнительно усиливающих адгезионную связь.

Таким образом, метод ионно-лучевого напыления в сочетании с дополнительной операцией напыления – распыления позволяет получать наноразмерные слои золота высокого качества. Их поверхность характеризуется большей однородностью и является менее шероховатой. Улучшение качества слоев металла при использовании дополнительной операции напыления – распыления можно объяснить внедрением в подложку высокоэнергетических ионов золота, которые, с одной стороны, являются источниками точечных дефектов в приповерхностном нарушенном слое подложки, а с другой – служат дополнительными центрами кластерообразования. За счет этого обеспечивается сильная адгезия слоя металла к подложке. Метод ионно-лучевого напыления может быть успешно применен для получения качественных проводящих оптически прозрачных слоев металла в единицы – десятки нанометров.

Литература

1. Получение методом ионно-лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота / А. И. Стогний [и др.] // Журн. техн. физики. – 2003. – Т. 73, № 6. – С. 86–89.
2. Bundesmann, C. Tutorial: The systematics of ion beam sputtering for deposition of thin films with tailored properties / C. Bundesmann, H. Neumann // Journal of Applied Physics 124, 231102 (2018) ; Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.5054046>.
3. О неоднородном характере начальной стадии ионно-лучевого осаждения ультратонких пленок золота / А. И. Стогний [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, № 6. – С. 87–94.

УДК 537.531:678.073:678.046

**ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ  
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА**

**В. А. Банный**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
медицинский университет», Республика Беларусь*

**И. В. Царенко, С. И. Красюк**

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

Эксплуатация радиотехнических систем СВЧ приводит к повышению естественного уровня электромагнитного фона, вызывает проблемы электромагнитного загрязнения, электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости радио- и электронной техники. Одним из перспективных средств решения указанных проблем являются композиционные радиопоглощающие материалы (РПМ). Существующая номенклатура композиционных РПМ включает множество материалов, изготавливаемых по оригинальным технологиям. Свою нишу среди современных РПМ занимают композиты на основе конструкционных крупнотоннажно выпускаемых термопластов, в частности, полиэтилена (ПЭ) и функциональных наполнителей (ФН). Такие РПМ привлекают малой удельной массой и технологичностью, обеспечивая электромагнитную совместимость узлов электронной аппаратуры и регулируемый уровень электрических и магнитных потерь при взаимодействии с радиоизлучением.

Цель работы состояла в оценке электрических и теплофизических параметров композиционных РПМ на основе ПЭ.

Объектами исследований служили листовые композиционные РПМ на основе ПЭ (ГОСТ 16803-070). В качестве ФН использовали магнитные и электропроводящие вещества: дисперсные магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит (ММФ, ТУ 6-09-5111–84, марка 2500 НМС), углеродную ткань Бусофит Т-1, стеклосферы.

Методом термического прессования изготовлены экспериментальные образцы конструкционного листового РПМ. Образцы РПМ выполнены в соответствии с принципами размерно-рецептурной и структурной оптимизации по критерию наилучшего радиопоглощения [1], [2]. С применением комплекса физических и физико-химических методов исследования оценены электрические и теплофизические характеристики монолитных композиционных РПМ. Электро- и теплофизические характеристики РПМ определяли по стандартным методикам. Для измерения электрического сопротивления образцов РПМ использовали вольтметр универсальный цифровой В27А; для измерения тангенса угла диэлектрических потерь и электро-

проводности – измеритель Е7-8. Микрокалориметрический анализ осуществляли на дифференциальном сканирующем микрокалориметре ДСМ-3А. Испытания по определению температуры размягчения термопластов по Вика (ГОСТ 15088–83) проводили в воздушной среде на приборе FWV «Fritz Heckert».

Поглощение энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) композитным РПМ, как правило, сопровождается выделением значительного количества тепловой энергии, которая может быть разрушительна для материала [3]–[5]. Поэтому целесообразно было исследовать теплофизические параметры образцов разработанных композиционных материалов, прежде всего, теплопроводность и теплостойкость. Результаты исследований электрических и теплофизических параметров РПМ представлены в таблице, где для сравнения приведены аналогичные параметры РПМ марки ХВ-10,6 (ТУ 6-00-5761783-322–89), промышленно выпускаемого ООО «Гелиус» (г. Владимир, Россия).

**Электро- и теплофизические параметры листовых радиопоглощающих материалов**

Параметры	Наименование образцов					
	Промышленный ХВ-10,6, ТУ6-00-5761783-322–89; $h = 3,2$ мм	Экспериментальные, $h = 3$ мм				
		ПЭ 16803-070	ПЭ + ММФ (50 %, 63–100 мкм)	ПЭ + ММФ (50 %, 160–200 мкм)	ПЭ + ММФ (50 %, 160–200 мкм) + стеклосферы (10 %)	ПЭ + ММФ (50 %, 160–200 мкм) + углеткань
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,39	0,92	1,49	1,55	1,67	1,47
$T_{пл}$ , °С	–	108,0	108,4	105,1	–	–
$T_{кр}$ , °С	–	90,4	90,4	90,5	–	–
Теплостойкость по Вика, °С	–	92	93	97	96	95*
Теплопроводность, Вт/(м · К)	0,78	0,28	0,42	0,37	–	–
Электропроводность, Ом <sup>-1</sup> · м <sup>-1</sup>	–	10 <sup>-15</sup>	4 · 10 <sup>-6</sup>	1,72 · 10 <sup>-3</sup>	9,3 · 10 <sup>-4</sup>	1,29 · 10 <sup>-4</sup>
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,07	0,0005	0,37	–	0,02	–

Методом ДСК установлены температуры фазовых переходов РПМ на основе ПЭ и ММФ, полученных методом термического прессования. Был введен в полимерную матрицу на стадии смешения порошкообразных составляющих ММФ различной дисперсности. Установлено (см. таблицу), что наполнение ПЭ дисперсным ММФ (50 мас. %) с размером частиц 63–100 мкм, в одном случае, и 160–200 мкм – в другом, приводит к незначительному изменению температуры плавления и кристаллизации связующего термопластичных образцов РПМ. Иная картина наблюда-



ется при более «жестких» условиях переработки и изготовления композитных РПМ, в частности, для melt-blown нетканых РПМ [6], [7]. В этом случае взаимодействие наполнителя и связующего значительно влияет на фазовые и релаксационные переходы последнего.

Как и следовало ожидать, введение ММФ в полимер увеличивает теплопроводность композита и, соответственно, повышает температуру его размягчения (см. таблицу). Для определения температуры размягчения образец композита обычно медленно нагревают под действием небольшой нагрузки до заданного значения деформации, соответствующая ему температура и есть температура размягчения. Наиболее распространенным из методов определения температуры размягчения пластиков является метод Вика, который использован в настоящей работе. Теплостойкость по Вика оказалась выше для образцов ПЭ + ММФ с более крупными частицами ФН, что, по-видимому, объясняется более высокой теплоемкостью последних. С этим согласуется повышенная теплопроводность композита с размером частиц ФН 63–100 мкм, в сравнении с аналогичными образцами с дисперсностью частиц ММФ 160–200 мкм. Высокой теплопроводности способствует более плотная и равномерная упаковка в композите мелких теплопроводящих частиц ФН.

Эффективность поглощения и рассеяния энергии ЭМИ СВЧ диапазона композитными РПМ обеспечивается введением в полимерную матрицу ФН заданной дисперсности [1], [4], [8].

Определены электрофизические параметры композитных РПМ (см. таблицу). Результаты измерений электропроводности и тангенса угла диэлектрических потерь композитных материалов свидетельствуют, что они относятся к полупроводниковым материалам с электронным типом проводимости, т. е. их удельное сопротивление соответствует области  $10^{-4}$ – $10^{+10}$  Ом · см, характерной для полупроводников [9], [10]. Этого и следовало ожидать, зная электрофизические характеристики компонентов, составляющих композит. Полиэтилен – типичный диэлектрик. Его тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 50 Гц значительно ниже единицы (см. таблицу), также мала, но отлична от нуля электропроводность, удельное электрическое сопротивление достигает  $10^{15}$  Ом · см. Магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит, являющийся одним из ФН РПМ, представляет собой магнитную керамику с незначительной электронной электропроводностью, вследствие чего его относят к электронным полупроводникам.

Электрофизические параметры композита не аддитивны параметрам компонентов, но всегда поддаются объяснению. Следует отметить, что некоторые электрофизические параметры зависят от внешних факторов, в частности, температуры и частоты ЭМИ. Так, тангенс угла диэлектрических потерь, являясь функцией от частоты, позволяет классифицировать один и тот же материал в одних случаях как проводник, в других – как диэлектрик (в зависимости от частоты). Это создает дополнительные сложности в прогнозировании свойств РПМ, но в то же время открывает новые перспективы в создании РПМ с управляемыми характеристиками.

#### Л и т е р а т у р а

1. Bannyi, V. A. Radioabsorbing composite materials based on thermoplastics: production technology and structural optimization principles / V. A. Bannyi, A. V. Makarevich, L. S. Pinchuk // Proc. of 33rd European Microwave Conference (EuMC2003). – Munich, Germany, 2003. – P. 1123–1126.
2. Bannyi, V. A. Physico-technological peculiarities of forming of radioabsorbing materials based on composite thermoplastics / V. A. Bannyi // Proceeding of 16<sup>th</sup> International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2006), 2<sup>nd</sup> Microwave & Radar Week in Poland, Krakow, 22–26 May 2006. – P. 1–3.

3. Ковнеристый, Ю. К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарева, А. А. Раваев. – М. : Наука, 1982. – 164 с.
4. Алексеев, А. Г. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность / А. Г. Алексеев, О. М. Гусева, В. С. Семичев // НИИХ СПбГУ, 1998. – 296 с.
5. Банный, В. А. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена / В. А. Банный, И. В. Царенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 3. – С. 3–6.
6. Полимерные волокнистые melt-blown материалы / В. А. Гольдаде [и др.]. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2000. – 260 с.
7. Радиопоглощающий материал для верхней одежды : пат. 7364 ВУ, МКП 7 А41D31/00, G21F3/02 / В. А. Банный, Л. С. Пинчук, А. В. Макаревич. – № a20011080 ; заявл. 19.12.2001 ; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 3.
8. Банный, В. А. Модифицированные углеродным наполнителем радиопоглощающие композиционные материалы на основе полиэтилена / В. А. Банный, И. В. Царенко, С. И. Красюк // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 129–130.
9. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергия, 1969. – 408 с.
10. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая Рос. энцикл., 1994.

УДК 6217.014

### **МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

**М. Н. Верещагин<sup>2</sup>, М. Ю. Целуев<sup>2</sup>, С. Н. Целуева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Государственное научное учреждение «Институт механики  
металлополимерных систем имени В. А. Белого»  
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

Одной из распространенных технологических схем процесса лазерной обработки металлических деталей является лазерное «глазурирование» нанесенного тонкого слоя порошка на подложку [1], [5]. Взаимодействие лазерного излучения (ЛИ) с твердым телом обеспечивает возможность получения микрокристаллических и аморфных структур в тонких поверхностных слоях деталей [0]. Неравновесная структура образуется вследствие воздействия лазерного луча с высокой плотностью энергии на металл за короткий промежуток времени. При этом основная часть ЛИ идет на локальное расплавление малых объемов металла вблизи поверхности, тогда как основная масса детали остается «холодной». Наличие такого взаимодействия пары *расплав–деталь* позволяет фиксировать высокие скорости охлаждения около  $10^5$ – $10^7$  К/с. Импульсное плавление малых объемов металла на поверхности обеспечивает получение однородных жидкостей (расплавов), которые после кристаллизации могут фиксировать структуру жидкости с уникальными свойствами.

Основными физическими параметрами процесса импульсной лазерной поверхностной обработки (ИЛПО) твердых тел является удельная плотность мощности поглощенного лазерного потока ( $10^3$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) и время взаимодействия металла с лучом ( $10^{-3}$ – $10^{-5}$  с).

Целью работы является исследование процесса модифицирования поверхностных слоев металлических деталей импульсной лазерной обработкой.

Для экспериментального изучения влияния технологических факторов на свойства изделий, получаемых методом модифицирования поверхностных слоев лазерной обработкой, разработана экспериментальная установка, включающая лазерную установку для импульсной сварки, резки и термообработки Квант-15 и координатный стол.

Выполненные экспериментальные исследования показали, что результаты ИЛПО с изменением химического состава, определяемые конечными свойствами и структурой обработанных материалов, существенно зависят от уровня технологических факторов процесса.

Одним из наиболее значимых факторов процесса ИЛПО является плотность мощности (величина энерговклада) ЛИ на обрабатываемой поверхности. Полученные экспериментальные данные о результатах ИЛПО с изменением химического состава поверхности заготовки позволяют сделать вывод о наличии трех диапазонов энерговклада. При малом энерговкладе (отсутствует проплавление материала основы или присутствуют только локальные очаги оплавления) процессы легирования и наплавки не осуществляются в связи с отсутствием адгезионной связи между металлом основы и легирующим слоем. При среднем энерговкладе (однородное по длине лазерной дорожки проплавление материала основы на небольшую глубину) происходит процесс лазерной наплавки материала с незначительным изменением химического состава наплавляемого слоя, при этом за счет сплавления материала основы с наплавляемым металлом формируется высокая адгезионная связь между покрытием и заготовкой. При высоком энерговкладе (значительное проплавление материала основы) происходит процесс легирования поверхности изделия со значительным перераспределением легирующего слоя вглубь основы. При этом температура поверхности обработки значительно превышает температуру кипения материала, что приводит к удалению жидкой фазы из зоны обработки с образованием кратеров и наплывов на поверхности изделия. В общем случае при увеличении энерговклада происходит ухудшение характеристик качества поверхности изделия.

Конкретные диапазоны энергетических воздействий зависят от теплофизических и оптических характеристик обрабатываемых материалов, а также качества теплового контакта основы образца и предварительно нанесенного покрытия. В качестве образцов использовали стали Ст3, 45, 20Х13 и медь М2. Диаграммы результатов ИЛПО с изменением химического состава поверхности образцов из стали 45 и меди М2 с предварительно нанесенным слоем толщиной 100 мкм из аморфизируемого сплава  $Fe_{63}Ni_5Co_3Cr_7Mo_4V_{18}$  представлены на рис. 1. Для определения границ интервалов энерговклада, определяющих соответствующие результаты ИЛПО, использовали обработку экспериментальных данных (точки на графиках) методом наименьших квадратов [2]. Наплавка покрытия из сплава системы Fe–Ni–Co–Cr–Mo–V на металлическую основу из сталей Ст3, 45, 20Х13 начинается при плотности ЛИ на поверхности обработки 1800–2000 Вт/мм<sup>2</sup>, а легирование – при 3500–4000 Вт/мм<sup>2</sup>.

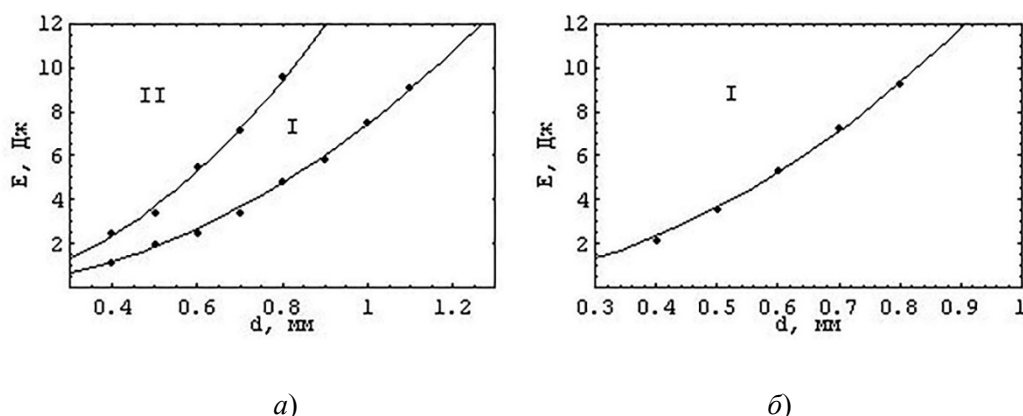


Рис. 1. Диаграммы результатов ИЛПО с изменением химического состава поверхности заготовки:  
 а – материал заготовки – сталь 45; б – материал заготовки – медь М2:  
 I – область наплавки; II – область легирования

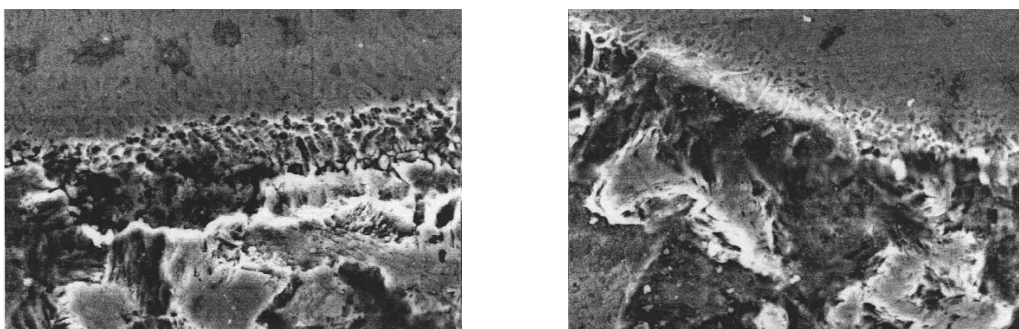
Другим важным фактором ИЛПО является частота следования импульсов ЛИ. С увеличением этого технологического параметра процесса происходит снижение времени остывания металла в паузах между импульсами, что ведет к повышению энергонакопления, а значит, и средней температуры в материале образца. В ходе экспериментов установлено, что для получения аморфно-кристаллического слоя на поверхности изделия частота следования импульсов ЛИ не должна превышать 3–8 Гц. При увеличении частоты следования импульсов ЛИ более 10 Гц аморфизация поверхности не происходит.

Поскольку при ИЛПО различные слои материала нагревались до разных температур, зона лазерного воздействия (ЗЛВ) имеет слоистое строение. По результатам измерения микротвердости и исследования микроструктуры по глубине ЗЛВ в общем случае зафиксировано три принципиально различных по природе фазовых превращений слоя. Первый слой от поверхности образца – зона оплавления, получен при закалке из расплавленного состояния. Количество аморфной фазы в поверхностном слое изделия составляло 70–80 %. Кристаллическая составляющая была представлена  $\alpha$ -фазой, интерметаллическими соединениями FeCr и FeCrMo и металлическим соединением  $Fe_2V$ . Микротвердость ЗО составляла 800–910 HV, причем большие значения наблюдались в нижней части зоны. Второй слой ЗЛВ – зона термического влияния (ЗТВ), получен при закалке из твердого состояния. Особенности структуры данного слоя для сталей обусловлены неполной и неомогенной (по углероду) аустенизацией материала основы образцов в условиях высокоскоростного лазерного нагрева и, как следствие, закалкой из двухфазной ( $\alpha + \gamma$ -фаза) области. Третий слой имеет структуру и микротвердость исходного состояния материала основы образцов.

Наибольший интерес представляет структура и микротвердость соответствующих слоев ЗЛВ в случаях, когда в процессе ИЛПО с изменением химического состава в поверхности зафиксирована аморфно-кристаллическая структура. При наплавке аморфизируемого сплава Fe–Ni–Co–Cr–Mo–V на металлическую основу из стали 45 (рис. 2, а) аморфно-кристаллический (до 25 % кристаллической фазы) слой имеет толщину 75–100 мкм и микротвердость 800–870 HV; ЗТВ характеризуется структурной неоднородностью: вблизи границы оплавления вокруг мартенсита, сформированного на месте бывших перлитных колоний, образуется тростито-ферритная сетка, переходящая в фер-

ритную вблизи к границе с зоной, имеющей исходную структуру основы металла; микротвердость ЗТВ 290–350 HV; ЗТВ имеет толщину 15–25 мкм и переходит в исходную феррито-перлитную структуру с микротвердостью 120–140 HV.

В случае обработки образцов с основой из стали 20Х13 (рис. 2, б) ЗО представляет собой аморфно-кристаллический слой (до 20 % кристаллической фазы) толщиной 70–90 мкм с микротвердостью 800–850 HV; ЗТВ толщиной 15–30 мкм имеет микротвердость 430–470 HV и состоит из мартенсита и большого количества остаточного аустенита; исходная структура основы образцов феррито-перлитная с микротвердостью 210–280 HV.



а) (×4000)

б) (×1000)

Рис. 2. Микроструктуры образцов после ИЛПО с изменением химического состава поверхности:

а – материал основы – сталь 45;  $\nu = 5$  Гц;  $E = 7$  Дж;  $d = 1$  мм;  
 б – материал основы – сталь 20Х13;  $\nu = 3$  Гц;  $E = 8$  Дж;  $d = 1$  мм

Для всех образцов, обработанных в режиме наплавания покрытия, анализ микроструктуры материала в месте контакта ЗО и ЗТВ показывает хорошую адгезию наплавленного слоя к металлической основе. На всем протяжении границы оплавления наличия пор, трещин или каких-либо других дефектов не обнаружено. Испытания на изгиб приводили к появлению сетки трещин на поверхности образцов, однако отделение наплавленного покрытия от основы образца не наблюдалось.

Результаты исследований триботехнических характеристик полученных образцов показывают, что ИЛПО с изменением химического состава поверхности в режиме наплавки позволяет получать износостойкие покрытия без пор и дефектов. У аморфно-кристаллического покрытия фактически отсутствует период приработки и снижается склонность к схватыванию, при этом коэффициент трения составляет 0,17–0,2.

В общем случае ИЛПО с оплавлением поверхности приводит к ухудшению качества рельефа поверхности, поскольку высокие градиенты температуры, имеющиеся в зоне оплавления, приводят к значительным градиентам поверхностного натяжения жидкой фазы и образованию циркуляционного движения в жидкости [4]. Обработка поверхности в режиме наплавки при средних величинах энергозатрат приводит к формированию зоны оплавления, имеющей небольшую глубину и относительно большую ширину. В случае увеличения энергозатрат происходит значительное резкое ухудшение качества поверхностного слоя, определяемое волнистостью (максимальной высотой напылов) и микрогеометрией (шероховатостью).

На основании полученного экспериментального материала при получении износостойких покрытий с аморфной и аморфно-кристаллической структурой на поверх-

ности металлических изделий методом ИЛПО с изменением химического состава поверхности рекомендуется использовать средний диапазон энерговклада (определяемый для различных материалов экспериментально или с помощью соответствующих математических моделей) и частоту следования импульсов излучения до 3–8 Гц.

Л и т е р а т у р а

1. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
3. Криштал, М. Л. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера / М. Л. Криштал, А. А. Жуков, А. Н. Кокора. – М. : Metallurgia, 1973. – 192 с.
4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
5. Леонтьев, П. А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов / П. А. Леонтьев, Н. Г. Чеканова, М. Г. Хан. – М. : Metallurgia, 1986. – 142 с.

УДК 541.124:542.952.6:547.313

**ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНОГО ДИОКСИДА  
ТИТАНА НА АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЬ–ОЛОВО**

**О. П. Бачко, А. В. Пянко, П. Б. Кубрак,  
О. А. Алисиенок, А. А. Черник**

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

Перспективным направлением в исследованиях является разработка и исследование материалов с исключительными физическими, химическими и функциональными свойствами. Потребность в улучшенных эксплуатационных характеристиках материалов приводит к разработке новых нанокomпозиционных покрытий. К таким покрытиям относятся антибактериальные покрытия, которые эффективно убивают бактерии на металлических поверхностях без необходимости ультрафиолетового излучения.

Для антибактериальных покрытий повышенные износостойкость и коррозионная стойкость являются ключевыми требованиями. Таким образом, цель работы заключалась в разработке состава электролита для формирования электрохимических антибактериальных покрытий и исследовании свойств осаждаемых покрытий. Высокая эффективность уничтожения бактерий требует высокого содержания серебра или меди в составе покрытий, что приводит к сильному снижению его твердости и, следовательно, его защитной способности. В связи с этим в качестве объекта исследования был выбран сплав олово–никель с внедрением наноразмерного диоксида титана [1]–[4].

Наноразмерный диоксид титана обладает способностью поглощать видимый свет, антибактериальными свойствами, имеет повышенную фотокаталитическую активность [3]. В связи с этим был разработан технологический процесс, позволяющий получать композиционное электрохимическое покрытие на основе сплава никель–олово, содержащее 65 % олова и 35 % никеля, с включением наночастиц золя  $\text{TiO}_2$  менее 1 %.

Исследовано влияние температуры осаждения и рН фторид-хлоридного электролита электрохимического формирования покрытия никель–олово–диоксид титана

на ход поляризационных кривых электрохимического осаждения и структуру осаждаемых покрытий. Установлено, что присутствие наноразмерного диоксида титана неоднозначно влияет на ход поляризационных кривых. Они смещаются в более электроотрицательную сторону, при этом угол наклона поляризационных кривых не изменяется.

Включение наноразмерного диоксида в состав покрытия приводит к незначительному снижению выхода по току электроосаждения покрытия никель–олово (1–2 %).

Исследовано влияние температуры на электрохимическое осаждение покрытия никель–олово–наноразмерного диоксида титана. При превышении допустимого температурного диапазона (60–70 °С) наблюдается подгар покрытий, а при повышении рН электролита (выше 3,5) наноразмерный диоксид титана значительно хуже растворяется в электролите, что влечет за собой образование матовых, неравномерных покрытий. Структура покрытия представлена на рис. 1.



а)

б)

в)

Рис. 1. СЭМ покрытия:

а – никель–олово; б, в – никель–олово–наноразмерный диоксид титана

Из рис. 1, б–в следует, что внедрение наноразмерного диоксида титана в состав покрытия приводит к образованию сфероидных структур диаметром 10–15 мкм в составе покрытия. Структура покрытий является плотной, без трещин и сколов.

Исследовано влияние методов синтеза наноразмерного диоксида титана на антибактериальность и качество осажденных покрытий. Внедрение наноразмерного диоксида титана в структуру покрытия позволяет получить равномерные, беспористые покрытия, которые прочно сцеплены с металлической подложкой и обладают рядом улучшенных физико-механических и химических свойств. Экспериментально установлено, что внедрение наноразмерного диоксида титана позволяет улучшить адгезию покрытия, микротвердость, коррозионную стойкость, гидрофобность покрытий.

Антибактериальная активность осажденных покрытий изучалась на двух штаммах бактерий: грамм-отрицательных (*Escherichia coli*) и грамм-положительных (*Staphylococcus aureus*). Антибактериальная активность покрытия по отношению к бактериям *St. Aureus* достигает около 90 %, а по отношению к *Staphylococcus aureus* – около 75 %.

Изучено влияние времени экспозиции в УФ-излучении на выживаемость бактерицидных клеток, подобрана оптимальная методика исследования металлических покрытий на бактерицидные свойства. При увеличении времени экспозиции антибактериальная активность образцов увеличивается, что, возможно, связано с высокой фотокаталитической активностью диоксида титана.

Таким образом, в ходе исследований был подобран оптимальный состав электролита, технологический режим процесса электрохимического осаждения композиционного покрытия никель–олово–наноразмерный диоксид титана, а также физико-химические и механические свойства, исследованы биоцидные свойства металлического покрытия.

В настоящее время эти покрытия могут быть осаждены на металлические поверхности как жестких, так и гибких подложек, например, в больницах, транспортных средствах (самолеты, автобусы, поезда и трамваи), кассовых и билетных автоматах, мебели в ресторанах, театрах, школах и других объектах. Электрохимическое покрытие никель–олово–наноразмерный диоксид титана может эффективно предотвращать перенос бактерий с металлических поверхностей к людям.

#### Литература

1. Lačnjevac, U. Č. Electrodeposition and characterization of Ni–Sn alloy coatings as cathode material for hydrogen evolution reaction in alkaline solutions / U. Č. Lačnjevac, V. D. Jović, B. M. Jović // *Zaštita materijala*. – 2011. – Vol. 52. – P. 153–158.
2. Synthesis and thermoanalytical study of SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> composites modified with macrocyclic endoreceptors / A. N. Murashkevich [et al.] // *Inorganic Materials*. – 2016. – Т. 52, № 3. – P. 294–300.
3. Композиционное покрытие олово–никель–диоксид титана / А. В. Пянко [и др.] // *Неорганические материалы*. – 2019. – Т. 55, № 6. – С. 609–616.
4. Пянко, А. В. Электрохимическое осаждение сплава олово–никель с внедрением наноразмерного диоксида титана / А. В. Пянко, А. А. Черник, О. А. Алисиенок // *Современные электрохимические технологии и оборудование – 2019 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2019.* – С. 320–322.

УДК 621.7.014

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ СПЛАВА СИСТЕМЫ CU–NI–P–SN–PB–MN–ZN ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ СТРУИ РАСПЛАВА ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА**

**М. Н. Верещагин, И. В. Агунович, Р. А. Судаков**

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

Развитие машиностроения и других отраслей промышленности требует разработки материалов с определенным комплексом физико-химических, механических и функциональных свойств. Производство изделий методами порошковой металлургии обладает большим потенциалом за счет возможности простого регулирования структуры материала как основного фактора, определяющего свойства изделия. Одним из новых методов получения порошковых материалов с улучшенными физико-механическими свойствами является метод быстрой закалки металла из жидкого состояния при диспергировании его газом–энергонесителем, имеющим поступательно-вращательно-колебательное движение [1].

На практике наиболее часто реализуется распыление струи поступательно движущимся газовым потоком. Схеме распыления расплава с одновременным использованием поступательного, вращательного и колебательного компонентов энергии газа с учетом ее потенциальной энергоемкости уделяется недостаточное внимание.



Целью данной работы является исследование особенностей получения металлических порошков в процессе диспергирования из жидкого состояния струи самофлюющей системы Cu–Ni–P–Sn–Pb–Mn–Zn газовым потоком на поверхность вращающегося кристаллизатора, а также проведение анализа гранулометрического состава получаемых порошков.

**Методика исследований.** В качестве исходного материала для получения порошка и дискретного волокна использовался сплав системы Cu–Ni–P–Sn–Pb–Mn–Zn со следующим содержанием легирующих элементов, мас. %:

- 1)  $\text{Cu}_{58,66}\text{Ni}_8\text{P}_{7,58}\text{Pb}_2\text{Fe}_{0,19}\text{Mn}_{0,5}\text{Zn}_{23,07}$ ;
- 2)  $\text{Cu}_{59,27}\text{Ni}_{8,07}\text{P}_{7,79}\text{Fe}_{0,64}\text{Sn}_{0,98}\text{Pb}_{1,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Zn}_{21,55}$ .

Гранулы сплава загружались в кварцевый тигель установки [1], где производилось плавление токами высокой частоты. В качестве газа-энергоносителя был использован сжатый воздух с давлением 0,4–1,5 МПа. Распыленный в распылительном устройстве расплав охлаждался в камере коробчатого кристаллизатора, где контроль и регулирование температуры проводился при помощи термодатчика, связанного с цифровым табло и электронным задатчиком температуры. Размер получаемых порошков определяли путем рассева в наборе микропрецизионных проводочных сит на специальном встряхивающем устройстве «Анализетте 3» в течение 30 мин с последующим определением массы каждой фракции при помощи аналитических весов. Морфология полученных частиц изучалась с использованием металлографического микроскопа METAM PB-22.

**Результаты исследования.** Исследования показали, что конечные размеры получаемых частиц зависят как от ряда технологических факторов: частота вращения кристаллизатора, ширина пазов, перегрев расплава, так и от химического состава сплава.

На рис. 1 представлена диаграмма распределения частиц в сплавах системы  $\text{Cu}_{58,66}\text{Ni}_8\text{P}_{7,58}\text{Pb}_2\text{Fe}_{0,19}\text{Mn}_{0,5}\text{Zn}_{23,07}$  и  $\text{Cu}_{59,27}\text{Ni}_{8,07}\text{P}_{7,79}\text{Fe}_{0,64}\text{Sn}_{0,98}\text{Pb}_{1,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Zn}_{21,55}$  в зависимости от массы, %, и размера фракции, мкм, при равных технологических параметрах.

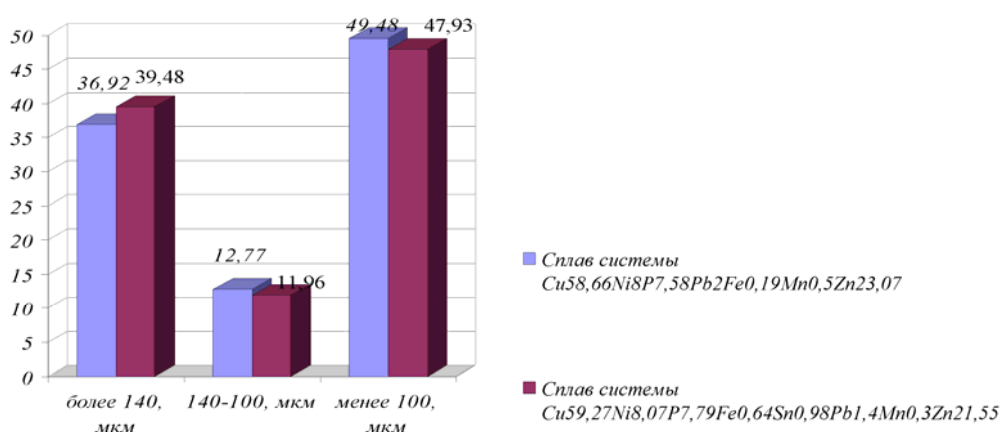
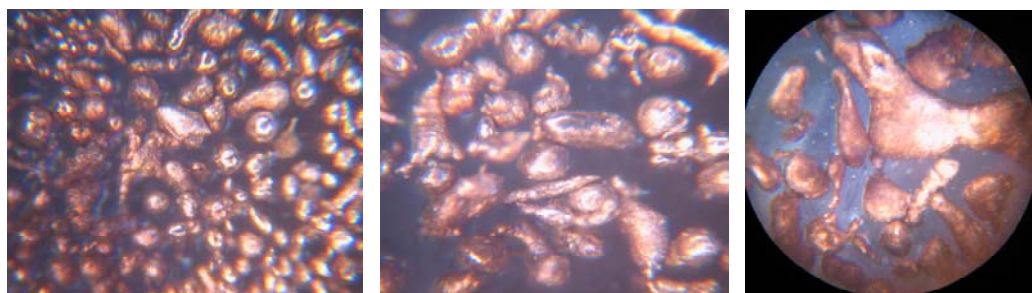


Рис. 1. Диаграмма распределения частиц в сплавах системы  $\text{Cu}_{58,66}\text{Ni}_8\text{P}_{7,58}\text{Pb}_2\text{Fe}_{0,19}\text{Mn}_{0,5}\text{Zn}_{23,07}$  и  $\text{Cu}_{59,27}\text{Ni}_{8,07}\text{P}_{7,79}\text{Fe}_{0,64}\text{Sn}_{0,98}\text{Pb}_{1,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Zn}_{21,55}$  в зависимости от массы, %, и размера фракции, мкм, при равных технологических параметрах

На рис. 2 и 3 представлены дискретные структуры первого и второго сплава.

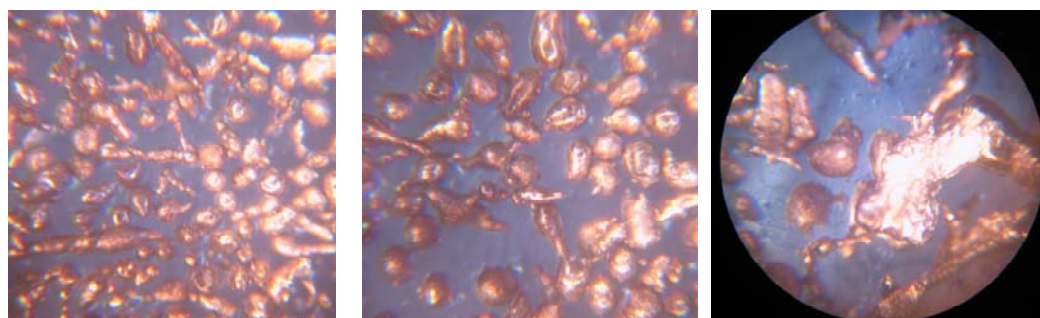


а)

б)

в)

Рис. 2. Структура дискретного порошка сплава системы  $\text{Cu}_{58,66}\text{Ni}_{8,58}\text{Pb}_{2}\text{Fe}_{0,19}\text{Mn}_{0,5}\text{Zn}_{23,07}$  разных фракций:  
а – менее 100 мкм; б – 100–140 мкм; в – более 140 мкм



а)

б)

в)

Рис. 3. Структура дискретного порошка сплава системы  $\text{Cu}_{59,27}\text{Ni}_{8,07}\text{P}_{7,79}\text{Fe}_{0,64}\text{Sn}_{0,98}\text{Pb}_{1,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Zn}_{21,55}$  разных фракций:  
а – менее 100 мкм; б – 100–140 мкм; в – более 140 мкм

На рис. 2 и 3 видно, что форма получаемых частиц фракции менее 100 мкм у первого сплава ближе к сферической, в то время как форма частиц второго сплава ближе к волокнам. С увеличением размера фракции доля волокон и их массовое содержание увеличивается.

Наибольшее влияние на геометрические размеры получаемых частиц оказывает частота вращения кристаллизатора (рис. 4), причем с увеличением частоты вращения до 6 тыс. об/мин при ширине пазов 0 и 3 мм имеет место увеличение доли частиц с приведенным диаметром  $< 100$  мкм. Длина получаемых дискретных частиц при этом составляет примерно  $(3 + 7)d$ , где  $d$  – приведенный диаметр частиц.

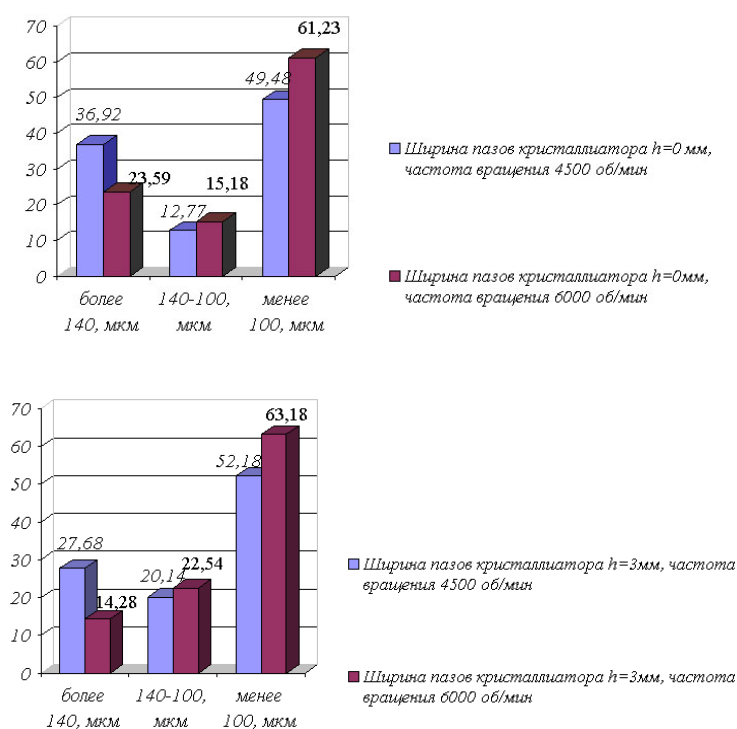


Рис. 4. Диаграммы распределения частиц в зависимости от ширины пазов кристаллизатора  $h$ , мм, и от частоты вращения  $n$ , об/мин

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать следующие выводы:

1. Получаемый при помощи метода диспергирования струи расплава газовым потоком на поверхность вращающегося кристаллизатора порошок имеет достаточно широкий фракционный состав, причем его определенная доля представляет собой сферические частицы, дискретные волокна и небольшое количество частиц неправильной формы. Это, по-видимому, связано с тем, что не все капли диспергируемого расплава полностью кристаллизуются на поверхности вращающегося кристаллизатора.

2. На форму (дискретные волокна или сферические частицы), конечные размеры получаемых частиц влияет ряд технологических факторов: частота вращения кристаллизатора, ширина пазов, перегрев расплава, зависят они также и от химического состава сплава, причем наибольшее влияние на выход мелкой фракции (менее 100 мкм) оказывает частота вращения кристаллизатора (с увеличением частоты вращения кристаллизатора выход мелкой фракции увеличивается).

3. С увеличением размера фракции доля волокон (их массовое содержание) увеличивается.

#### Литература

1. Верещагин, М. Н. Устройство для получения металлических порошков : пат. Респ. Беларусь № 4297 от 10.07.1998, МКИ В22F 9/08 / М. Н. Верещагин, Р. И. Вечер, Д. Л. Стасенко.
2. Верещагин, М. Н. Особенности диспергирования струи расплава газовым потоком со сложным движением / М. Н. Верещагин, Д. Л. Стасенко // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2001. – № 1. – С. 81–85.

УДК 621.77.01

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГОМОГЕНИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА БЛЮМОВ  
ПОДШИПНИКОВЫХ МАРОК СТАЛИ НА КАЧЕСТВО ПРОКАТА**

**И. В. Астапенко**

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

**С. А. Савченко**

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

Методы устранения карбидной ликвации лежат в основе технологии выплавки и разливки, в прокатном производстве при термообработке возможна лишь минимизация негативных факторов, влияющих на потребительские свойства подшипников. Основным мероприятием в прокатном производстве, направленным на уменьшение карбидной ликвации, является создание условий для диффузии – равномерное распределение атомов карбида железа по всему объему заготовки [1]. Равномерное распределение атомов карбида железа достигается при гомогенизирующем (диффузионном) отжиге. Гомогенизирующий отжиг проводят на слитках и непрерывнолитых заготовках при высоких температурах (около 1100–1200 °С), так как в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, обеспечивающие выравнивание химического состава по всему объему металла [2].

Для отработки технологии гомогенизирующего отжига было выбрано два основных маршрута: маршрут 1 – отжиг в печи прокатного стана 850; маршрут 2 – отжиг в печи прокатного стана 370/150.

Основным отличием маршрута 1 от маршрута 2 является возможность планирования отжига в печи стана 850 малыми партиями во время технологического ремонта прокатного оборудования. При этом максимальная вместимость печи на стане 850 составляет 150 т, на стане 370/150 – 550 т. Наиболее оптимальным был признан отжиг в печах стана 850, так как работа проводилась в период планового ремонта, поэтому простои прокатных станов были сведены к минимуму.

Главными критериями оценки эффективности гомогенизирующего отжига принята степень влияния процесса на снижение себестоимости продукции и уровень снижения брака по карбидной неоднородности в готовом сорте согласно SEP 1520.

Проведенные испытания показали, что оба варианта – термообработка малотоннажных партий в печи стана 850 и крупнотоннажных партий в печи стана 370/150 – позволили достигнуть требуемых значений карбидной неоднородности в готовом сорте CZ6 не более 6,3 и CZ7 не более 7,4.

**Риски, связанные с гомогенизацией.** Риски, связанные с проведением гомогенизации, можно разделить на очевидные и неочевидные. К очевидным рискам можно отнести увеличение угара металла и, как следствие, появление поверхностных дефектов, к неочевидным – получение аварийного брака по причине расслоения раската.

Интенсивное выгорание поверхности блюмов в окислительной атмосфере печи приводит к обезуглероживанию поверхностного слоя, а также способствует появлению поверхностных дефектов прокатного происхождения, таких как прокатная плена и чешуйчатость. Решить проблему удалось ограничением температуры и времени нагрева в печи, а также сохранением первородной и вторичной окалины [3]–[5].

## Секция 2. Современные материалы, наноматериалы в машиностроении 101

Основным риском, связанным с гомогенизацией, является аварийный брак, проявляющийся при прокате подшипниковых марок сталей, легированных марганцем и кремнием, таких как ШХ15СГ и ШХ20СГ. За период использования гомогенизирующего отжига с 01.01.2020 г. по 01.09.2020 г. было отмечено несколько случаев разрушения заготовки при прокате. При металлографических исследованиях дефект был классифицирован как расслой.

Расслой – продольное нарушение сплошности металла различной протяженности, приводящее к его разрушению [6]. Расслой, приведший к получению аварийного брака, произошел вследствие возникновения в осевой части заготовки напряжений, связанных со структурными превращениями при неравномерном нагреве. Зарождение трещины во всех зафиксированных случаях произошло на расстоянии от 300 до 500 мм от торцов непрерывнолитой заготовки. В процессе развития под действием структурных напряжений осевая трещина выходит на грани и торец блюма, достигает критического размера при прокатке и приводит к его разрушению по типу расслоя (рис. 1).



а)

б)

Рис. 1. Дефекты, выявленные при аварийном браке:  
а – внешний вид трещины на блюме 250 × 300 после гомогенизирующего отжига; б – расслой на прутке

Для поиска корневой причины были проанализированы режимы выплавки и разливки, охлаждение под колпаками и дальнейший гомогенизирующий отжиг, проведенный в печах прокатных станов 850 и 370/150. Было выявлено, что дефекты проявлялись только на первых блюмах плавков, которые проходили гомогенизацию на стане 850 [7], [8].

Ключевым фактором, выявленным в процессе анализа причин аварийного брака, является возникновение трещин на расстоянии около 400 мм, т. е. исключительно в местах контакта блюма с водоохлаждаемой балкой. Предположительно, негативному воздействию подвергались только первые заготовки ввиду большого градиента температур. По мере последующей загрузки блюмов в печь температура снижается и не происходит теплового удара на остальных заготовках. Для предотвращения возникновения дефектов была разработана альтернативная схема нагрева, заключающаяся в предварительном прохождении через подогревательную печь 850 с последующим нагревом в нагревательной печи 850 стана.

Проведение гомогенизирующего отжига привело к росту себестоимости продукции на стане 850 на 10 %, а на стане 370/150 около 3 %. Анализируя период применения гомогенизирующего отжига с 01.01.2020 г. по 01.09.2020 г, выход годной

продукции увеличился на 10 %, при этом снижение себестоимости продукции, с учетом проведения гомогенизирующего отжига, составило 7 %.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Гомогенизирующий отжиг позволил достичь уровня карбидной сегрегации, необходимого для выполнения контрактных требований CZ6 не более 6,3 и CZ7 не более 7,4.

2. Анализ аварийного брака показал, что ключевым фактором, негативно влияющим на качество заготовки, является высокий градиент температур и водоохлаждаемая балка, места соприкосновения с которой являются местами зарождения трещин. Для снижения вероятных причин брака была проведена корректировка режима гомогенизации.

3. Эффективностью проведения гомогенизирующего отжига является снижение себестоимости продукции на 7 % и увеличение выхода годной продукции с уровнем карбидной неоднородности в готовом сорте CZ6 (не более 6,3) и CZ7 (не более 7,4) на 10 %.

#### Литература

1. Бокштейн, Б. С. Атомы блуждают по кристаллу / Б. С. Бокштейн. – М. : Наука, 1984. – 208 с.
2. Чередниченко, В. С. Материаловедение / В. С. Чередниченко. – М. : Омега-Л, 2008. – 752 с.
3. Темлянцев, М. В. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением / М. В. Темлянцев, Ю. Е. Михайленко. – М. : Теплотехник, 2006. – 200 с.
4. Тлустенко, С. Ф. Теория и режимы нагрева и термообработки заготовок и деталей в процессах ОМД / С. Ф. Тлустенко. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 80 с.
5. Савченко, С. А. Анализ влияния деформационных параметров прокатки на качество прутка из шарикоподшипниковой стали в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ» / С. А. Савченко, И. В. Астапенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 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, 2019. – С. 116–119.
6. ГОСТ 21014–88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности.
7. 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.
8. Исследование дефектов непрерывнолитой заготовки диаметром 200 мм и причин их образования в условиях ОАО «БМЗ» / И. А. Ковалева [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 59–62.

УДК 669.27:519

### **РАСШИРЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ ОТЛИВОК НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТЕЙ**

**И. Б. Одарченко, В. А. Жаранов, И. Н. Прусенко**

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

Многокритериальная оценка технологической сложности отливок служит основой для выбора способа проектирования литниково-питающих систем (ЛПС)

и степени проработки вопросов литейной гидравлики методами математического моделирования.

Для построения классификатора технологической сложности необходимо определить, какие параметры (рис. 1) влияют на принятие решения о том, к какому классу принадлежит образец. Для оценки технологической сложности изготовления отливок предлагается методика с выделением следующих групп оценочных параметров, влияющих на технологические параметры и сложность изготовления.



Рис. 1. Группы параметров оценки технологической сложности отливки/литейной технологии

Процедура классификации была разработана на основе применения методов кластерного анализа с использованием нейронных сетей. Такой подход позволил перейти от интуитивных методов анализа выборки классифицируемых деталей к использованию строгого математического алгоритма анализа всего набора обрабатываемых объектов. Данный подход предполагает создание нейронных моделей анализа на стадии проектирования литых деталей с последующим внедрением в производственный процесс.

Для классификации деталей сеть обучается важнейшим их признакам, таким как геометрическая форма, относительное расположение важнейших элементов, площадь и характерные размеры отдельных элементов и т. д. В процессе обучения выделяются признаки, отличающие детали друг от друга, которые и составляют базу для принятия решений об отнесении деталей к соответствующим классам.

Конструкторско-технологическая классификация отливок может использоваться при технологической подготовке производства для анализа и группирования номенклатуры, с последующей разработкой типовых групповых технологических процессов и операций с применением компьютерной техники.

Разработанный комплексный метод (рис. 2) определения конструктивно-технологической сложности включает несколько уровней точности оценки, характеризующихся разным уровнем детализации информации.

С применением методов компьютерного нейросетевого анализа оптимизация технологий и конструкторская проработка проекта ведется одновременно и парал-

## 104 Секция 2. Современные материалы, наноматериалы в машиностроении

тельно, базируясь на параметризации геометрических моделей. Параметрические функции обеспечивают идентичность размеров во всех электронных документах, связанных с изменяемой 3D моделью, быстро и точно изменяют конструкторскую и технологическую документацию, когда в цифровую модель вносятся изменения.

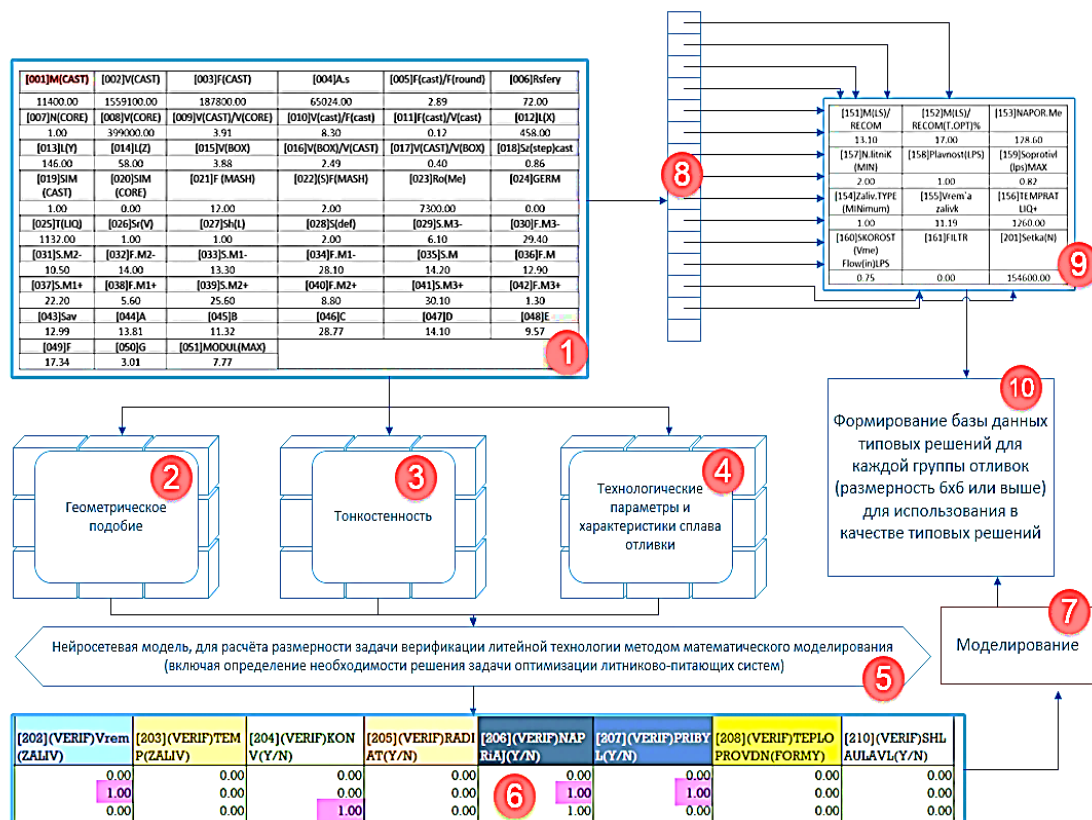


Рис. 2. Общий алгоритм применения разработанной методики при проектировании и оптимизации литниково-питающих систем:

- 1 – исходные параметры; 2 – модель оценки подобия; 3 – модель оценки тонкостенности; 4 – модуль технологической оценки; 5 – модуль планирования расчетов; 6 – план экспериментов; 7 – моделирование (модуль анализа); 8 – матрица классификации; 9 – блок технологических рекомендаций; 10 – база технологических решений (шаблонов)

Так, опыт применения методов определения интервальной оценки толщины отливок (рис. 3) на машиностроительных предприятиях показывает высокий уровень реализации потенциала таких программ. Основные возможности дополняются значительным повышением качества проектных работ как при подготовке производства самих отливок, так и при выпуске технологической оснастки на стержни и иные элементы литейной технологии. Очевидно также, что потенциал внедрения таких продуктов существует в том числе при проектировании конфигурации литниково-питающих систем, поскольку также дает возможность находить массивные или тонкие элементы в литниках и прибылях.



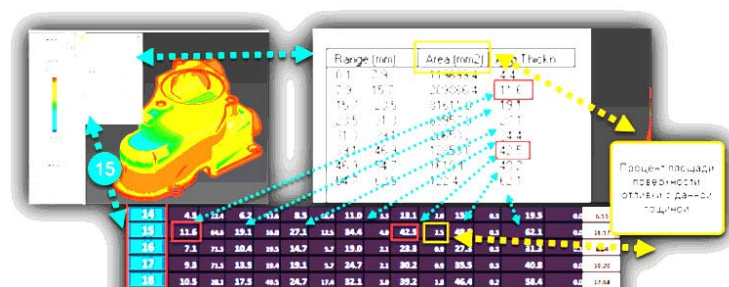


Рис. 3. Формирование интервальной оценочной базы данных по толщине отливок

Возможность качественного разбиения отливок на группы и подгруппы и однозначной классификации конкретной детали позволяют распространить применение удачных технологических решений и алгоритмы компьютерной проверки (с использованием программ моделирования технологии) качества на все отливки, для которых принципиально есть возможность получения в данных производственных условиях.

Групповая нейросетевая классификация, обеспечивающая выделение групп подобных отливок, позволяет создать универсальный инструмент, разделяющий детали по важнейшим признакам. Она позволяет быстро (после числового описания геометрии детали) получить ответ на ряд производственно важных вопросов, в частности: оценить себестоимость получения отливки; сделать заключение о целесообразности выпуска данной детали определенным методом литья; применить типовую технологию и шаблон литниково-питающей системы из существующей базы данных.

Благодаря внедрению инструментов, обеспечивающих фактически параметрическое редактирование моделей ЛПС, их адаптация к производству конкретной отливки сокращается в несколько раз. Для технологически подобных отливок успешные, ранее разработанные и апробированные решения можно использовать повторно, с оперативной доработкой параметризованных трехмерных моделей. Такое проектирование осуществляется быстрее, поскольку позволяет эффективно использовать существующие на предприятии базы 3D моделей ЛПС.

Потенциальная эффективность нейросетевых моделей заключается в том, что с их помощью можно сделать применение программ для численного моделирования литейной технологии значительно более результативным. Это обеспечивается за счет того, что моделирование на основе метода робастного планирования Тагучи проводят только для отливок определенного класса, с вычислением по результатам регрессионного анализа комплекса оптимальных технологических параметров процесса литья.

УДК 621.745

### УСТАНОВКА СЛИВА МЕТАЛЛА ИЗ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ВАГРАНОК

В. А. Жаранов, А. Э. Гордеенко

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

Современные минераловатные вагранки закрытого типа являются наиболее распространенными агрегатами в промышленности строительных материалов. К числу их достоинств относятся высокая удельная производительность по расплаву

## **106 Секция 2. Современные материалы, наноматериалы в машиностроении**

до 150 т/м<sup>2</sup> сутки, тепловой КПД до 60–70 %, относительная простота регулирования тепловым и газодинамическим режимами, низкий уровень удельных эксплуатационных затрат, высокие экологические характеристики, компьютерное управление.

Продукцией вагранок является минеральный расплав, который с помощью центрифуг, установленных на сливе расплава, превращается в тонкие шлаковые волокна. Далее волокна формируются в теплоизоляционную вату. По своим характеристикам минераловатные материалы превосходят любые другие строительные теплоизоляционные материалы.

Сырьем для производства минеральной ваты являются горные породы базальтовой группы, осадочные породы типа доломитов и техногенные отходы, например, металлургические шлаки. Примерный состав шихты: шлак доменного производства – 600 кг, базальт – 150 кг и 125 кг кокса. Негативным фактором является наличие в составе практически всех горных пород оксидов железа. Шлак содержит до 2 % Fe в составе минералов, а также включения-корольки сплавов железа 1–3 %.

Оксиды железа при плавке восстанавливаются. Количество металла, образующегося в смену, зависит от качества сырья (в основном – шлака) и может составить 600–1800 кг. Металл, образующийся в вагранке, имеет состав близкий к низкоуглеродистому чугуна. По результатам анализов на спектрографе и аналитической лаборатории образцы имели соответственно: С – 2,4–3,2 %, Si – 0,4–1,3 %, Mn – 0,5–1,25 %, S – 0,4–0,9 %, а также примеси Mo 1,4–2,1 %, Ni – до 0,5 %, Cr – до 0,3 % и др.

Капли металла (чугуна) при сливе попадают в минеральный расплав. Наличие капель чугуна приводит к быстрому безвозвратному выходу из строя технологической оснастки, снижает технико-экономические показатели работы всей линии производства минераловатных изделий и самое главное – снижает качество самих изделий. В связи с этим периодически из вагранки производится сброс накопленного металла вместе с минеральным расплавом. Разделить эти материалы после затвердевания очень сложно, поэтому они вывозятся в отвал. Потери очевидны.

Единственным способом ликвидировать потери металла и минерального продукта является периодический слив металла из вагранки по мере накопления и, главное, отдельно с минеральным расплавом. Этот металл может накапливаться и отделяться от шлакового расплава в горне вагранки при соответствующем профилировании этой части вагранки.

Для вагранок, расположенных на нулевой отметке, наиболее удачным техническим решением является слив «через третью летку». При увеличенной глубине горна ниже основной летки на 200–250 мм выполняется летка, развернутая в сторону приемного ковша для металла. Футерованное днище вагранки профилируется со скатом в сторону металлической летки. Для того чтобы эта зона горна не остывала в период накопления металла над леткой подается дутьевой воздух из коллектора. Контроль режима осуществляется по температуре в этой зоне горна. В процессе опытных плавов был отработан технологический режим отдельного слива и доказана практическая возможность и полезность такого технического решения.

На новых вагранках слив металла через третью летку оказался невозможен. Единственным решением был выпуск через днище вагранки, для чего проектировщиками было предусмотрено подвальное помещение. Однако для отдельного и безопасного слива металла и минерального расплава в этом случае необходима специальная установка. После ряда натурных и компьютерных исследований и конструкторских проработок задача была успешно решена (рис. 1).

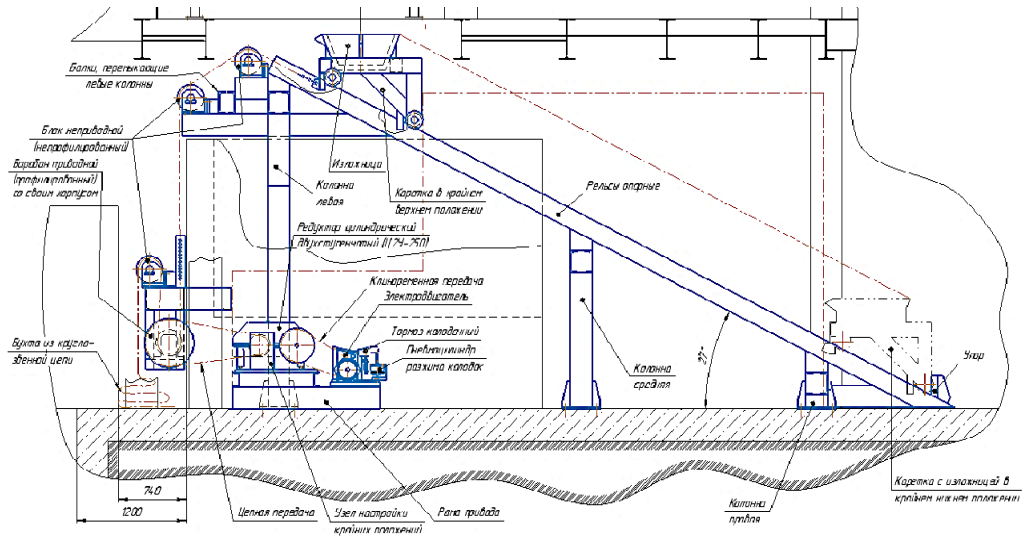


Рис. 1. Схема установки слива металла из минераловатных вагранок

Были исследованы вопросы получения слитков оптимальной геометрии и распределение температурных полей в изложницах (рис. 2) различной конструкции.

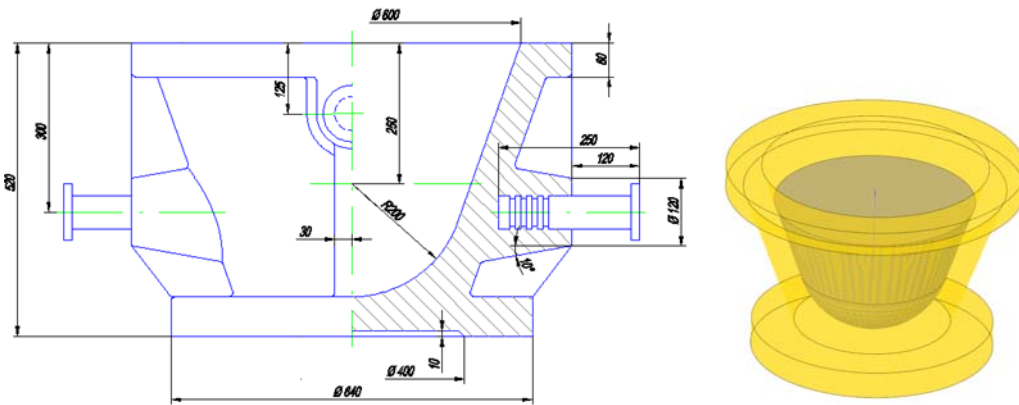


Рис. 2. Эскизная схема и 3D модель изложницы

Формы слитков, которые были рассмотрены для процесса слива расплава, представлены на рис. 3.

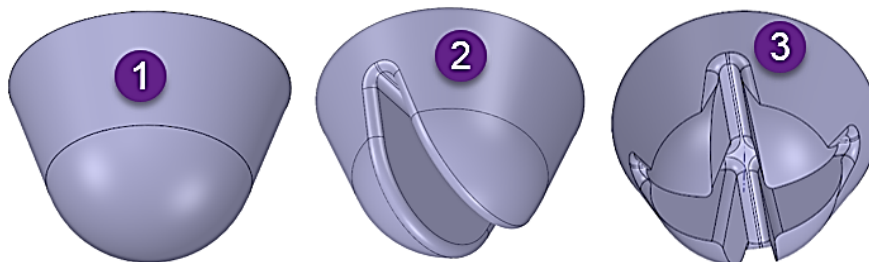


Рис. 3. Формы слитков, масса каждого примерно 400 кг

Геометрия слитков 2 и 3 обусловлена необходимостью упрощения задачи разделки металла перед завалкой в печь при последующей переплавке слитков при производстве литья на предприятиях-потребителях. Кроме того, слитки металла с лучшей удельной поверхностью лучше поглощают тепло на этапе расплавления.

Были промоделированы тепловые процессы при кристаллизации слитков в изложницах различной конструкции с изменяемой толщиной защитного покрытия (рис. 4).

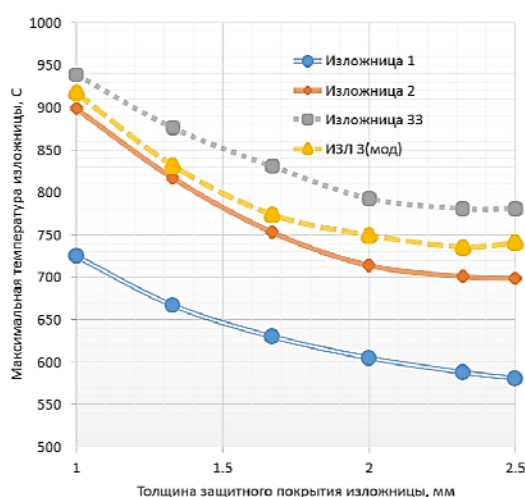


Рис. 4. Изменение максимальной температуры стенки изложницы в зависимости от толщины защитного покрытия и типа слитка

Анализ результатов выявил потенциал неудовлетворительной стойкости изложниц 2 и 3 форм слитков вследствие максимального перегрева (на 150 °C и более) поверхности выше 600 °C. Очевидно, что большее относительно максимального (2,5 мм) значение толщины покрытия на практике использовать нерационально, поскольку сложно обеспечить равномерность его формирования.

Внедренные технология и оборудование показали свою эффективность, безопасность и надежность в эксплуатации.

Результатом внедрения технологии слива является получение 1800–2000 т/год качественного шихтового материала, пригодного для применения в литейном и металлургическом производстве.

УДК 666.187.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В. А. Жаранов, Ю. Д. Черняков

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

В мировом производстве постоянно возрастает доля стали массового потребления, выплавляемая в дуговых сталеплавильных печах. Одним из основных факторов, связанных с динамичным ростом производства электростали, являются возрастающие запасы железосодержащего лома. Скрап от автомобилей, бытовых отходов,

строительных предприятий, сельскохозяйственного и промышленного оборудования перерабатывался в мартеновских печах, в настоящее время выведенных из эксплуатации. Основная нагрузка в переработке таких шихтовых материалов в перспективе будет осуществляться в дуговых печах большой емкости – от 80 т и более [1]–[3]. В дальнейшем доля электростали будет постоянно возрастать за счет модернизации устаревших печей и переработки металлолома на современных ДСП.

Наибольшее распространение ДСП получили на мини-заводах как основной сталеплавильный агрегат для переработки железосодержащей шихты с концентрацией углерода около 0,3 %, недостаточной для завершения плавки, поэтому в исходную шихту добавляют углеродсодержащие материалы (УСМ). Способ загрузки шихты (в две бадьи на болото) и постоянно изменяющаяся плотность шихты (от 0,2 до 0,9 т/м<sup>3</sup>) накладывают дополнительные трудности в организацию теплового, аэродинамического и температурного режимов. Постоянное увеличение численности автомобильного парка и сокращение срока эксплуатации автомобилей обеспечит железосодержащей шихтой электросталеплавильное производство [3].

Технология процесса в современных ДСП предполагает на первой стадии интенсивное расплавление шихты с последующей переработкой в сталь заданного химического состава и температуры в агрегатах внепечной обработки. Можно выделить основные мероприятия, способствующие повышению производительности печи:

- сортировка и подготовка шихтовых материалов;
- предварительный подогрев шихты за счет утилизации физической теплоты дымовых газов;
- использование в металлической шихте жидкого чугуна;
- работа печи на «болоте», т. е. использование остатка предыдущей плавки;
- применение топливно-кислородных горелок, кислородных фурм, инжекторов углерода, фурм для окисления оксида углерода в газовой среде рабочего пространства.

Следует отметить, что с учетом условий работы электропечи нередко вносят изменения в геометрические параметры ее рабочего пространства. При использовании легковесного лома или шихты в виде окатышей и брикетов увеличивают объем рабочего пространства за счет высоты стены печи, преследуя тем самым возможность завалки одной бадьей шихты.

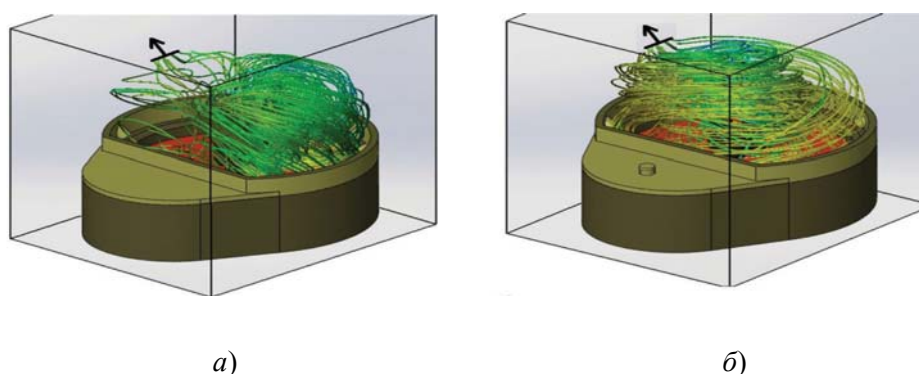
Экспериментальные исследования тепло- и массообменных процессов в рабочем пространстве ДСП имеют свою специфику и весьма затруднительны. Прямые измерения аэродинамических потоков и температурных полей на действующей печи всегда ограничены и затруднены, поэтому для изучения применяют методы математического моделирования. На данный момент существует большое количество прикладных программных пакетов для моделирования химико-технологических систем. Эти пакеты используют различные подходы к моделированию и обладают различным инструментарием удобным или неудобным при решении той или иной прикладной задачи.

Для расчета газодинамики и температурного состояния рабочего пространства использовали 3D модель печи, которая была предварительно получена в чертежно-графическом редакторе системы КОМПАС-3D, а затем импортирована в приложение SolidWorks FlowSimulation.

Flow simulation моделирует движение потока, на основе решения уравнения Навье–Стокса, которое является интерпретацией законов сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости. Под жидкостью здесь понимается и газ, и жидкость ввиду отсутствия в русском языке аналога слову fluid. Уравнения дополнены выражениями состояния жидкости, которые определяют природу жидкости

и эмпирическими зависимостями плотности, вязкости и теплопроводности жидкости от температуры. Несжимаемые неньютоновские жидкости рассматриваются по зависимости их динамической вязкости от скорости деформации сдвига и температуры, а сжимаемые жидкости рассматриваются по зависимости их плотности от давления. Еще одна часть уравнений отвечает за геометрию потока, граничные и начальные условия.

К рассмотрению предложены две модели, отличающиеся размещением комбинированных устройств для подачи в печь энергоносителей (ТСУ). В первой модели ТСУ расположены радиально в соответствии с проектными рекомендациями фирмы «Danieli» (рис. 1, *а*), во второй – размещены тангенциально (рис. 1, *б*).



*Рис. 1.* Траектории движения газовых потоков в объеме рабочего пространства ДСП:  
*а* – по проекту «Danieli»; *б* – при тангенциальном расположении газокислородных горелок

Размещение горелок с тангенциальным направлением факела вызывает горизонтальную циркуляцию продуктов горения у поверхности шихты. В данном варианте обеспечивается круговое движение газов в периферийной зоне рабочего пространства и исключается направленное воздействие потока продуктов горения на поверхность электродов. К моменту попадания в подсводовое пространство и канал дымоудаления газы совершают до четырех циркуляционных оборотов, имея лучшие условия для передачи тепла шихте. Интенсивное движение газов сосредоточено в нижней части объема печи у поверхности холодной шихты. В сравнении с вариантом «Danieli» предложенное расположение горелочных устройств выглядит более предпочтительным.

В 2–3 раза увеличена кратность циркуляции газов в горизонтальной плоскости. За счет изменений в расположении горелочных устройств зона активного теплообмена расширяется более чем на 24 %.

Существующая установка горелок обеспечивает высокотемпературное поле только в незначительном объеме шихты, расположенном против горелок. Равномерного распределения температуры по всему объему шихты, расположенной между электродами и поверхностью стены печи, не наблюдается. Высокие температуры отмечаются под сводом, около и выше водоохлаждаемой стеновой панели горелочного устройства. Для рассматриваемого варианта в эркерной зоне и на участках между горелками обнаружены плохо прогреваемые поверхности, тогда как в месте установки каждой горелки наблюдается перегрев шихты. Тангенциальное расположение горелок изменило траекторию движения продуктов горения и вместе с этим, подобно скоро-

сти, изменилось и распределение температурных полей. К моменту попадания в под-сводное пространство и канал дымоудаления газы с большей эффективностью передают тепло шихте. Циркуляция газов способствует рассредоточенному распределению температур в зоне расположения основной массы шихты по горизонтальным сечениям и высоте рабочего пространства.

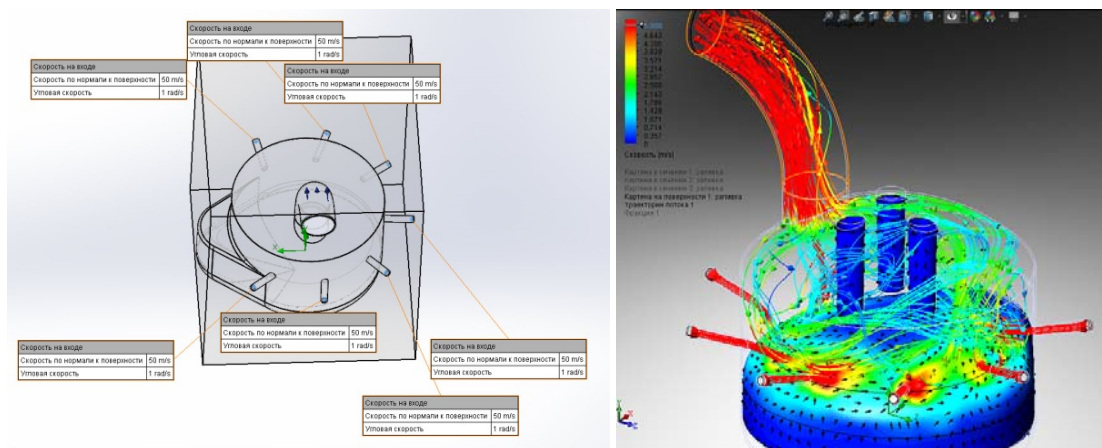


Рис. 2. Усовершенствованная параметрическая модель для газодинамического анализа и результаты моделирования в виде траекторий движения частиц газового потока

В заключение можно отметить, что предложенный способ интенсивного нагрева (рис. 2) и плавления холодной шихты позволяет за счет организации движения продуктов горения газокислородной смеси, частичного окисления углеродсодержащих материалов, без изменения номинальной электрической мощности и при незначительных конструктивных изменениях обеспечить высокую производительность ДСП по выходу полупродукта стали, снизить удельный расход электродов и осуществить долговременную эксплуатацию стеновых панелей и свода.

#### Литература

1. Worldsteel Association Steel Statistical Yearbook 2011. – Brussels : Worldsteel Committee on Economic Studies, 2011. – 120 p.
2. Белковский, А. Г. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкции / А. Г. Белковский, Я. Л. Кац, М. В. Краснянский // Бюл. «Черная металлургия». – 2013. – № 3. – С. 72–78.
3. Чижиков, А. Г. Автомобильный лом в структуре металлофонда России и технические решения по его утилизации / А. Г. Чижиков, А. Е. Семин, И. И. Чижикова // Электросталь. – 2010. – № 4. – С. 31–36.

## СЕКЦИЯ 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 664.653.122:664.653.124

### ПРОБЛЕМЫ ТЕСТОПРИГОТОВЛЕНИЯ И ИХ РЕШЕНИЯ (АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ)

**В. П. Янаков**

*Мелитопольский институт государственного и муниципального  
управления «Классического частного университета», Украина*

**O. Lange**

*Leidos Corporation, г. Вашингтон D.C., Соединенные Штаты Америки*

**Гипотеза исследований.** Создание широкого ассортимента хлебопекарной, макаронной и кондитерской ведет к полному удовлетворению пищевых запросов населения; основывается на технических возможностях тестомесильных машин и агрегатов, специфике используемых технологий замеса, потенциале качествообразующих и структурообразующих процессов применяемого рецептурного сырья [1], [2].

**Цель исследований.** Установление условий совершенствования инноваций определяет необходимый уровень выпускаемой продукции, достаточный для максимального охвата сегментов производства. Перспективой реализации технологий замеса, тестоприготовления, работы тестомесильных машин и агрегатов является решение задачи «min/max» – снижение энергозатрат технологий замеса возможно при повышении качества и структуры теста.

**Основные результаты исследований.** Планирование, прогнозирование и организация предлагаемой теории тестоприготовления устанавливают параметры энергозатрат, характера, режима и метода воздействия тестомесильных машин и агрегатов в рабочей емкости на перемешиваемое рецептурное сырье. Дальнейшая организация специализированных производств определяет наиболее эффективное сочетание факторов технологий замеса.

Установление роли использования технологий замеса обуславливает взаимосвязь количественных и качественных показателей гидромеханических, массообменных, теплообменных и механических процессов теста. В целом проблему качествообразующих и структурообразующих процессов рецептурного сырья и энергетического воздействия на тесто тестомесильных машин и агрегатов возможно решить, сведя ее к задаче min/max:

$$\chi(d) = \max_{\xi \in \Xi} \cdot \min_{z \in Z} \cdot \max_{j \in J} \cdot J_j(d, z, \xi) \leq 0,$$

где  $\chi(d)$  – функция гибкости, энергетического воздействия тестомесильных машин и агрегатов в рабочей емкости;  $J_j = \{l, \dots, m\}$  – множество для функции ограничений, качественных преобразований технологий замеса теста;  $d$  – вектор направленности воздействия месильного органа и других энергопередающих органов тестомесильных машин и агрегатов;  $z$  – возможности анализа, корректировки, уточнения и моделирования технологий выпускаемой продукции;  $\xi$  – значение ассортимента хлебопе-



карной, макаронной и кондитерской продукции, определяющее удовлетворение пищевых запросов населения;  $\Xi$  – область неопределенности поставленных задач технических возможностей оборудования, специфики используемых технологий замеса;  $j$  – потенциал качествообразующих и структурообразующих процессов применяемого рецептурного сырья.

Последующая оценка работы специализированного оборудования складывается на основе анализа увеличения результативности используемых технологий замеса. Решение предоставленного научного подхода опирается на передачу тестомесильными машинами и агрегатами энергии через месильный орган и дополнительные энергопередающие устройства перемешиваемому рецептурному сырью и тесту.

Анализ исследований предлагаемой теории тестоприготовления показал, что они внедрялись и разрабатывались с учетом комплекса показателей (рис. 1).



Рис. 1. Взаимосвязь комплекса показателей технологий замеса

Конкурентоспособность предлагаемой теории тестоприготовления характеризуют основные факторы: себестоимость, качество и структура выпускаемой продукции, широта ассортимента и полное удовлетворение пищевых запросов населения. Основным направлением совершенствования технологий замеса является поиск новых технических решений, позволяющих улучшить работу специализированного оборудования.

Предлагаемый комплексный подход, основанный на аспектах экспериментальных исследований, представлен в таблице.

#### Показатели предлагаемой теории тестоприготовления (аспекты экспериментальных исследований)

Наименование показателя	Характеристика показателя
1. Теоретический	Определение распределения величин энергозатрат тестомесильных машин и агрегатов. Анализ стоимости материальных затрат технологий замеса при разнообразии рецептурного сырья и теста
2. Подтверждение исследований автора в экспериментах других ученых	Устанавливается уровень реализации и варьирования процессов. Контролируется возможность их дальнейшего совершенствования и повышения эффективности
3. Эксперимент на имитационных моделях	Осуществляется оценка достигаемого уровня однородности теста и связанных с ней направлений протекания качествообразующих процессов

Наименование показателя	Характеристика показателя
4. Лабораторные исследования	Реализовывается оценка эффективности структуры работы тестомесильных машин и агрегатов. Анализируется их развитие как объекта развития данного вида пищевой техники
5. Экспериментальные исследования на специализированных предприятиях	Вырабатывается комплексная оценка качествообразующих процессов теста. Производится прогнозирование их взаимосвязи с технологическими операциями
6. Анализ, корректировка, уточнение и моделирование технологий замеса	Анализируется возможность внедрения в практику пищевых технологий. Совокупность этих подходов обуславливает развитие эволюции данного вида пищевой техники

Ключевым направлением совершенствования предлагаемой теории тестоприготовления становится поиск новых технологических решений. При этом величина стоимости энергозатрат при реализации технологий замеса должна соответствовать получаемому уровню однородности теста. С другой стороны, сочетание всех вышеперечисленных факторов формирует стоимость конечного продукта – выпускаемых изделий.

Результатом экспериментальных исследований является эффективное сочетание следующих составляющих:

- *Решение задачи min/max.* Системный подход методологии приготовления теста основан на применении: логистического анализа, комплексного подхода в организации технологий замеса и их стандартизации в производстве. Особенности проблем качествообразующих и структурообразующих процессов рецептурного сырья определяют структуру энергетического воздействия тестомесильных машин и агрегатов.

- *Взаимосвязь комплекса технологий замеса.* Использование методологии сравнительного анализа, моделирования систем, фундаментальных дисциплин способствует созданию специализированных и высокоэффективных производств. Предлагаемая теория тестоприготовления применяет этот научный подход для полного удовлетворения пищевых запросов населения.

- *Работа тестомесильных машин и агрегатов.* Технические возможности, специфика используемых технологий замеса специализированного оборудования опираются на потенциал научных исследований. Реализуемая взаимосвязь качествообразующих и структурообразующих процессов употребляемого рецептурного сырья определяет возможность изготовления ассортимента продукции.

Дальнейшая экспериментальная апробация предлагаемой теории тестоприготовления дает возможность повысить эффективность применяемых технологий замеса при изготовлении выпускаемой хлебопекарной, макаронной и кондитерской продукции. В конечном итоге это приводит к определению экономической эффективности специализированных предприятий и доминированию в сегменте пищевого рынка.

Впоследствии возникает проблема обеспечения достаточных параметров при реализации тестоприготовления, которые дают возможность улучшить качественные показатели теста, повысить энергетическую эффективность тестоприготовления и технологическую надежность специализированного оборудования, сохранить вероятность прогнозирования свойств выпускаемой продукции.

**Выводы и предложения.** Контроль энергозатрат в период реализации технологий замеса, управление качеством и структурой теста и организация процессов перемешивания и сопутствующих процессов перемешиваемого рецептурного сырья приводят к созданию нового ассортимента хлебопекарной, макаронной и кондитерской продукции. В дальнейшем эта методология способствует расширению технических возможностей тестомесильных машин и агрегатов.

**Перспективы исследований.** Конкурентоспособность любой теории приготовления теста характеризуют следующие основные факторы: себестоимость, качество и энергозатраты. В связи с этим возникает проблема определения эффективной методологии по характеру, методу, анализу, корректировке, уточнению и моделированию технологий замеса и нахождении достаточных качественных и структурных показателей теста.

#### Литература

1. Янаков, В. П. Процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств : автор. тез. / В. П. Янаков. – Обоснование параметров и режимов работы тестомесильной машины периодического действия : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. – Донецк, 2011. – 20 с.
2. Янаков, В. П. Оборудование и технологии пищевых производств. Совершенствование теории приготовления теста при изложении специализированных дисциплин / В. П. Янаков, А. В. Возняк, О. Ланже. – 2019. – № 2 (39). – С. 85–94.

УДК 621.3

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАБОТЫ С СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ**

**А. С. Третьяков, О. А. Капитонов**

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

Очень часто при решении практических задач по созданию цифровых систем управления приходится разрабатывать математический аппарат, решающий поставленные перед ним задачи. В общем виде эта задача сводится к разработке систем дифференциальных уравнений, решение которых в реальном времени приводит к получению необходимых управляющих воздействий, формированию необходимых сигналов для цифровой системы управления и т. д. В качестве примера можно привести:

1. Наблюдатель состояния координаты электропривода.
2. Наблюдатель состояний активных сопротивлений статора и ротора асинхронного электродвигателя.
3. Идентификатор параметров Т- или Г-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя для реализации законов частотного управления и т. д.

В качестве математического аппарата здесь выступают системы дифференциальных уравнений, которые вместе с их решателем закладываются в виде прошивки в микроконтроллеры. Однако проблема в том, что часто из-за ограниченности ресурсов таких аппаратов нельзя полностью реализовать все необходимые функции, поскольку большую часть ресурсов может занимать решение самих дифференциальных уравнений.

В настоящее время в западной научной литературе получила распространение теория разностных уравнений, дающая выигрыш в использовании ресурсов микроконтроллеров и сокращении времени расчетов и обработки данных.

Суть данной теории состоит в том, что, заменяя систему дифференциальных уравнений на разностные уравнения, получаем систему линейных уравнений, которые решаются на каждом шаге расчета.

Методика получения разностных уравнений состоит в следующем:

1. Составляется система дифференциальных уравнений, описывающая решаемую задачу.

2. Формируется и отлаживается математическая модель, которая достаточно точно отображает искомые результаты.

3. Полученная (или скорректированная) система дифференциальных уравнений из пространства Лапласа переводится в пространство  $z$ -состояний;

4. Проверяется работоспособность цифровой модели на достоверность полученных данных.

5. Все уравнения даны в стандартной форме: раскрываются скобки и приводятся подобные члены.

6. Проводим деление обеих частей всех полученных уравнений на величину  $z$ . После проверяем и корректируем: те переменные, которые ее не имеют, являются переменными на текущем шаге расчета (например,  $y[i]$ ), те переменными, которые содержат  $z^{-1}$ , – переменные на предыдущем шаге расчета (например,  $y[i - 1]$ ).

7. Поскольку имеем по сути систему линейных уравнений, то последним шагом становится ее решение методом Гаусса (или любым другим) для получения развязанных от остальных переменных решений для каждой переменной. Для этого очень удобно использовать программы символьных вычислений (Maple, Maxima и т. д.).

Рассмотрим пример идентификации параметров схемы замещения Т-образной схемы замещения на основе методики, предложенной украинским ученым Д. Л. Приступой. Система дифференциальных уравнений, а также условия, описывающие процесс идентификации, приведены в [1]. На рис. 1 представлена имитационная модель идентификации параметров, созданная в математическом пакете MATLAB.

В качестве входных воздействий здесь используются:

1. Специально сформированные массивы токов и напряжений (полученные расчетным или экспериментальным путем и преобразованные по уравнениям Кларка–Парка «из 3 в 2», учитывая, что в основе всей методики лежит двухфазная математическая модель асинхронного электродвигателя).

2. Паспортные данные двигателя.

3. Поправочные коэффициенты (коэффициенты, определяющие динамику переходных процессов идентификации параметров и зависящие от условий эксперимента и параметров испытуемого асинхронного электродвигателя).

Выходными данными являются:

- 1) активное сопротивление фазы статора;
- 2) активное сопротивление фазы ротора;
- 3) индуктивность фазы статора;
- 4) индуктивность фазы ротора;
- 5) индуктивность взаимной индукции.

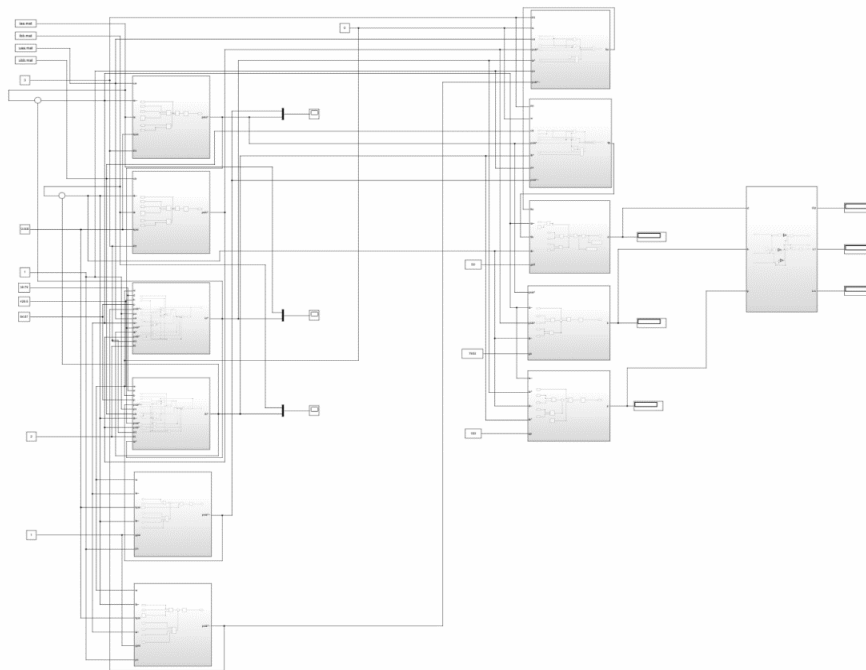


Рис. 1. Имитационная модель идентификации параметров Т-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя

При переходе из пространства Лапласа в пространство  $z$ -состояний особое внимание необходимо уделить интегратору. В зависимости от типа решаемой задачи необходимо выбирать тот или иной вариант. Самый точный – цифровой интегратор на основе трапецеидального метода расчета. Он был использован при решении данной задачи.

Дальше убедившись, что математическая модель работает корректно, проводим раскрытие скобок и приведение подобных членов. После делим обе части полученных уравнений на величину  $z$ . Те переменные, которые ее не имеют, являются переменными на текущем шаге расчета (например,  $y[i]$ ). Те переменные, которые содержат  $z^{-1}$ , – это переменные на предыдущем шаге расчета (например,  $y[i-1]$ ).

После всех преобразований получаем систему линейных уравнений первого порядка. Последним этапом является ее решение для получения развязанных от остальных переменных решений для каждой переменной. Самый простой и действенный метод для решения данной задачи – метод Гаусса.

В итоге получаем систему линейных функций, описывающих процесс идентификации параметров Т-образной схемы замещения. Для начала расчета остается только проинициализировать начальные значения всех основных переменных, входящих в состав разностных уравнений, и определить закон изменения переменной, отвечающей за сам процесс расчета (на основе примеров выше – переменная  $i$ ). Величина этой переменной определяется типом решаемой задачи.

На рис. 2 представлен скриншот программного обеспечения, написанного на кроссплатформенном фреймворке QT5, в котором реализована идентификация параметров Т-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя на основе полученных разностных уравнений.

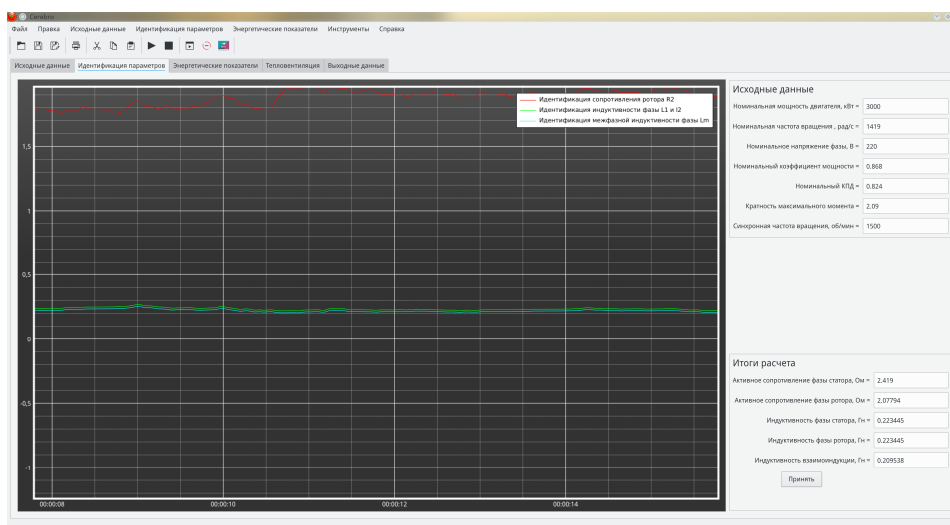


Рис. 2. Скриншот программного обеспечения для расчета параметров Т-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя

Все расчеты проводились для двигателя АИР100S4У3. При моделировании в программе Matlab, Maxima и программном обеспечении (рис. 2) были получены следующие результаты:

1. Активное сопротивление фазы статора – 2,419 Ом.
2. Активное сопротивление фазы ротора – 2,078 Ом.
3. Индуктивность фазы статора – 0,223 Гн.
4. Индуктивность фазы ротора – 0,223 Гн.
5. Индуктивность взаимной индукции – 0,209 Гн.

Полученные результаты говорят о правильности самой методики. Более того, эффективность данной методики состоит в том, что, используя такую систему, можно значительно сократить время расчетов, что и было продемонстрировано.

#### Литература

- 1 Пересада, С. М. Алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка: синтез и экспериментальное тестирование / С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, Д. Л. Приступа // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2013. – № 34. – С. 27–34.

УДК 004.89

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ И ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН

Н. С. Богданова, Я. М. Олизарович

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

Актуальность темы заключается в практической необходимости интеллектуального программного обеспечения, способного на локализацию полимерных волокон на изображении, полученном с помощью электронного микроскопа, в ходе которого возникает необходимость вычисления геометрических параметров локализованного волокна.

Сложность оценки волокна с изображения состоит в огромных временных затратах на обнаружение и измерение характеристик волокна, так как волокон на одном изображении может быть больше нескольких сотен. Таким образом, целью данной работы было создание программного обеспечения, способного на локализацию полимерных волокон на изображении, созданном с помощью электронного микроскопа, с последующим вычислением геометрических параметров локализованного волокна. Эта задача локализации волокон в работе решается с помощью использования сверточной нейронной сети ResNet101, что позволяет системе определить объект, сегментировать его и на основе сегментации получить необходимые по задаче параметры. Пример изображения, полученного с микроскопа, приведен на рис. 1.

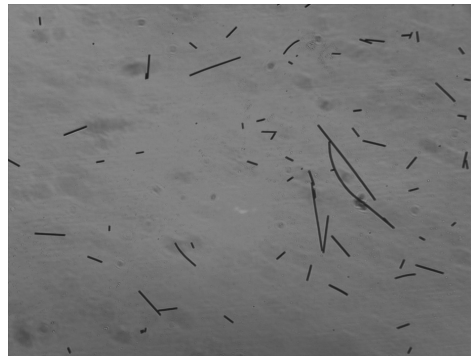


Рис. 1. Пример изображения, полученного с микроскопа

Проходя через слои ResNet101, изображение преобразуется из  $1024 \times 1024 \text{px} \times 3$  (RGB) в карту объектов формы  $32 \times 32 \times 2048$ . Эта карта характеристик становится входом для следующих этапов.

Якоря распределены по всей области изображения. На рис. 2 представлены якоря, сканирующие изображения.

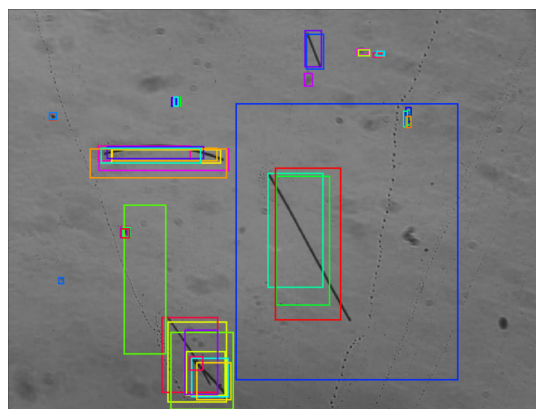


Рис. 2. Пример поиска волокон на изображении при помощи якорей

Генерация масок проводится сверточной сетью, которая берет положительные области, выбранные классификатором, и генерирует маски для них.

Далее для классификации изображений используется метод ROI (Region of Interest). Данный метод обрабатывает полученные секторы и позволяет классифици-

ровать изображения и выделить объект с изображения. Выделение происходит при помощи генерации битовой маски.

По окончании работы получаем набор данных, содержащий набор масок, количество которых равно количеству найденных волокон, и массивы, содержащие название классифицированного объекта и точность предсказания для каждой из масок.

Маски помогают выделить каждое волокно в отдельный объект, что позволяет анализировать их геометрические параметры.

В данном случае маски сохраняются в формате точек многоугольника.

Для аннотирования и создания масок используется VGG Image Annotator (VIA). Данный веб-сервис позволяет аннотировать изображения, создавая к ним маски. Рис. 3 содержит внешний вид сервиса.

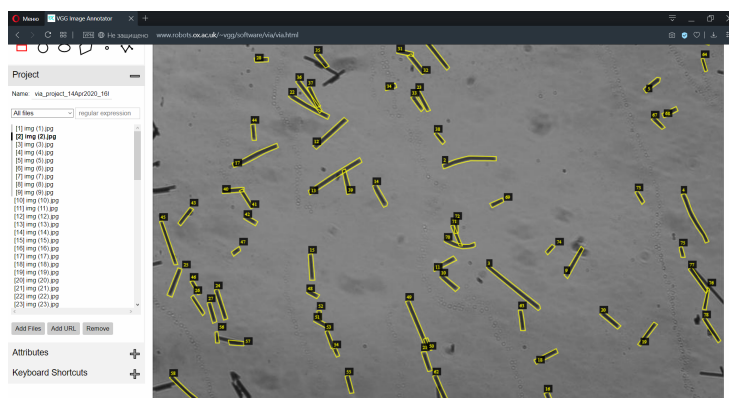


Рис. 3. Сервис VGG Image Annotator

Для реализации графического интерфейса была использована библиотека PyQt5.

Для вычисления длины волокна находим площадь маски и ширину волокна. Так как волокно имеет одинаковую длину на всем своем протяжении, то можно получить длину волокна путем деления площади на ширину.

Для определения ширины находим середину наиболее длинной стороны ограничивающей рамки. Из точки отсчета пускаем лучи до противоположной стенки. Кратчайший из лучей будет равен ширине луча. На рис. 4 представлены процесс процедуры определения длины и ширины, а также процесс ручного выделения и сохранения маски волокна.

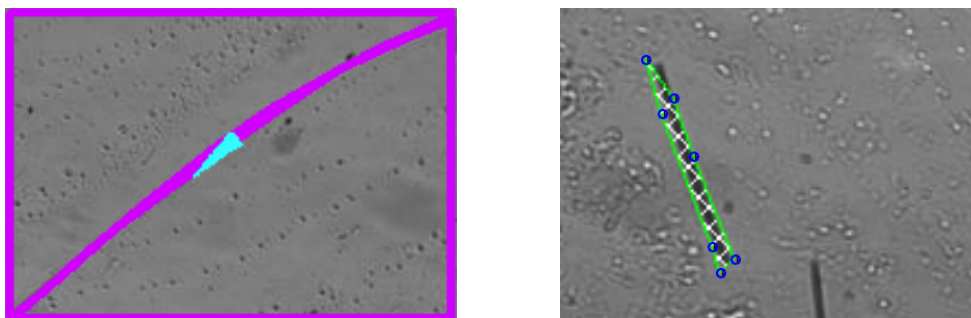


Рис. 4. Поиск ширины волокна, ручное выделение и сохранение волокна



Внешний вид приложения после обработки изображений с окном настроек приложения дан на рис. 5.

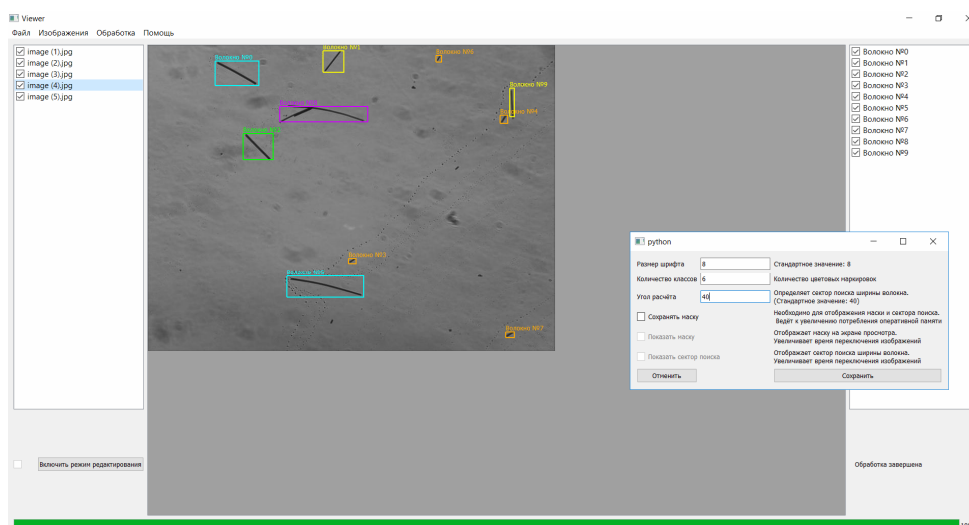


Рис. 5. Внешний вид приложения после обработки изображений

Окно статистики читает данные из указанных директорий и представляет данные в виде лепестковой диаграммы. Ограничения на максимальное количество лепестков нет. Данное окно показано на рис. 6.

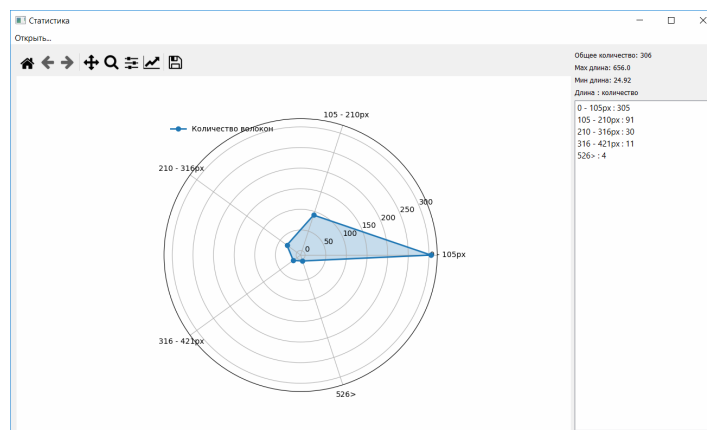


Рис. 6. Окно статистики

В результате выполнения работы был создан уникальный на данный момент программный комплекс на языке Python на основе нейросети, реализующий функционал обнаружения и выделения полимерных волокон с компьютерного изображения с последующим анализом геометрических параметров, имеющий графическое представление результатов и функционал по сохранению результатов исследования.

#### Литература

1. Шапошникова, С. В. Основы программирования на Python / С. В. Шапошникова. – М. : ДМК Пресс, 2011.

2. Олизарович Я. М. Использование компьютерного зрения на основе региональной сверточной нейронной сети для исследования полимерных волокон / Я. М. Олизарович, Н. С. Богданова // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XXIII Республ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 23–25 марта 2020 г. / Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: С. П. Жогаль (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2020. – С. 289–291.

УДК 519.876.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЧЕТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Г. П. Косинов, Н. В. Самовендюк

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

Вопрос цифровизации лесной отрасли стал особенно актуальным в последние годы. Автоматизация планирования, учета, контроля и анализа всех процессов может значительно облегчить работу лесоводов и сделать ее более эффективной. Одним из таких процессов является оформление заказов на вырубку и посадку новых деревьев. Их автоматизация позволит снизить трудоемкость работ, повысить производительность труда, эффективность принятия управленческих решений и точность учета, обеспечить конкурентоспособность, сократить количество правонарушений в лесном фонде.

Для создания программного комплекса были разработаны модели взаимодействия объектов системы. Они представлены в виде диаграммы вариантов использования, диаграммы последовательности и диаграммы деятельности.

Диаграмма вариантов использования служит для спуска от наиболее общей и абстрактной концептуальной модели исходной системы к логической, а затем и к физической модели соответствующей программной системы. Она является исходным концептуальным представлением или концептуальной моделью системы в процессе ее проектирования и разработки. Диаграмма представлена на рис. 1.

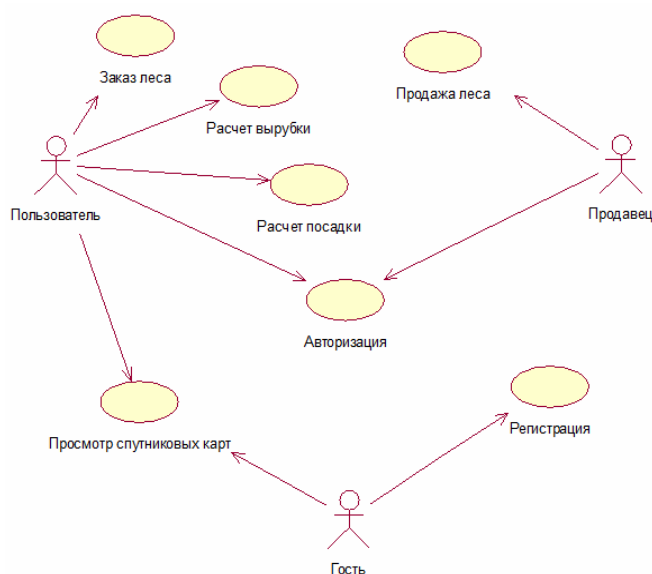


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования

Диаграмма последовательности отображает некоторый набор объектов на единой временной оси. Здесь показан жизненный цикл какого-либо определенного объекта и взаимодействия актеров ИС в рамках какого-либо определенного прецедента. На рис. 2 представлена диаграмма последовательности для заказа древесины пользователем.

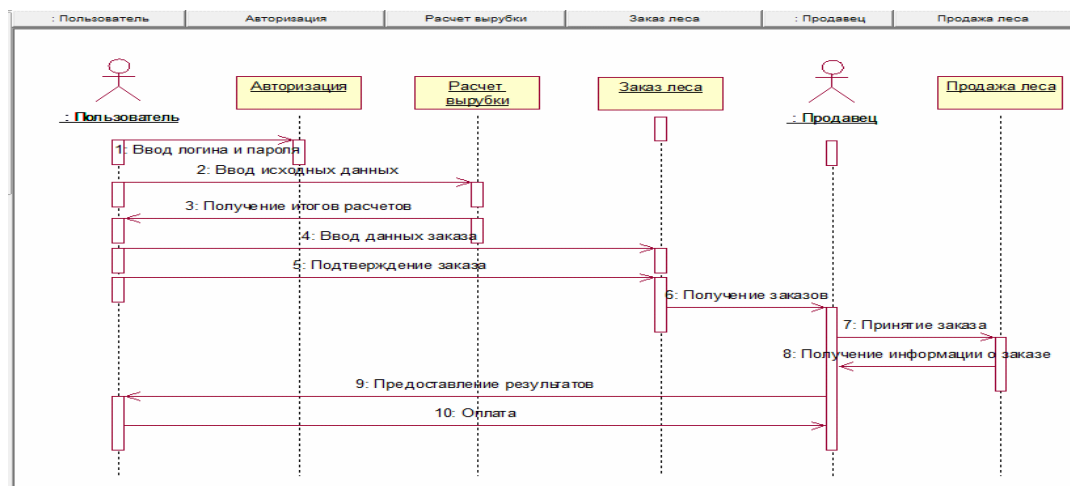


Рис. 2. Диаграмма последовательности

Диаграмма деятельности служит отображению действий. Под деятельностью понимается спецификация исполняемого поведения в виде координированного последовательного и параллельного выполнения подчиненных элементов. На рис. 3 приведена диаграмма деятельности для заказа древесины пользователем.

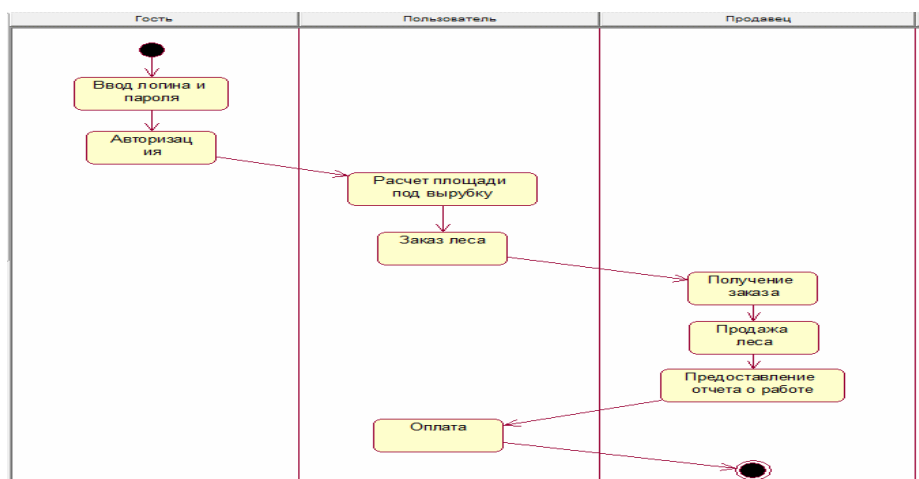


Рис. 3. Диаграмма деятельности

Выделены основные задачи проектирования приложения:

- обеспечение надежного хранения в базе всей необходимой информации;
- обеспечение возможности получения данных по всем необходимым запросам;
- исключение избыточности и дублирования данных;
- обеспечение целостности базы данных.

Автоматизация процесса учета лесного хозяйства позволит эффективнее управлять ресурсами предприятия, увеличить прибыль, а также более точно рассчитывать замещающие посадки деревьев.

УДК 621.17

### **ПРОЕКТ АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ**

**А. Агаев, Р. Агаев, Дж. Абдыев**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Как отмечается в концепции развития системы цифрового образования, разработка и внедрение информационно-аналитических систем и интегрированных систем электронного документооборота в стране являются одним из приоритетных направлений автоматизации системы управления. В каждом высшем учебном заведении, а также во всех образовательных учреждениях есть центральные библиотеки, в которых хранятся десятки тысяч учебников, учебных пособий, художественная литература и огромные коллекции журналов и газет. Изучение повседневных рабочих процессов этой библиотечной системы показывает, что применение достижений современных цифровых технологий дает возможность еще больше повысить качество управления бизнесом, объем услуг и трудозатрат. Внедрение современных цифровых технологий поощряет создание нового типа системы электронной библиотеки наряду с бумажными копиями существующих библиотечных ресурсов и распространение их электронных версий для читателей (например, публикация и доступность электронных версий самых популярных газет и журналов нашего государства сегодня).

Наряду с реализацией национальных программ и концепций в Государственном энергетическом институте Туркменистана успешно внедряется в жизнь «Концепция развития системы цифрового образования в Туркменистане». В целях дальнейшего совершенствования работы существующей «Библиотечной системы» в институте внедряется программа «Библиотечная система» – один из первых программных продуктов, написанных на туркменском языке. Эта программа «Библиотечная система» предназначена для автоматизации управления библиотекой. Важной особенностью этой программы является возможность мониторинга количества книг, хранящихся как в библиотеке, так и на руках абонентов (читателей) библиотеки.

Данная программа обслуживает своих пользователей в общедоступной веб-сетевой системе. Библиотечная система состоит из главной страницы и двух разделов – административного и пользовательского. Для доступа к программе «Библиотечная система» каждый зарегистрированный администратором пользователь может войти в библиотеку, введя свое имя пользователя и пароль.

Рассмотрим страницу администратора и ее возможности. Окно входа в систему представлено на рис. 1.

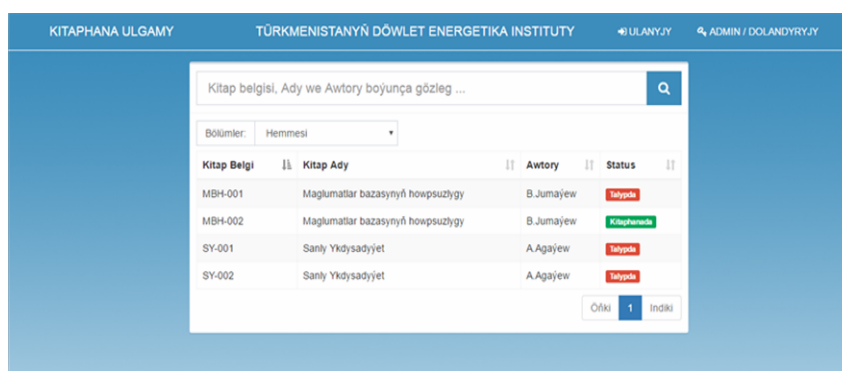


Рис. 1. Окно входа в программу

Администратор входит в свою страницу, введя свой личный логин и пароль. Будучи главной страницей этого администратора, она обслуживает три раздела: *Отчетность*, *Книги* и *Студенты*.

*Главная страница* – ежедневный отчет о деятельности библиотеки, т. е. общее количество перечисленных книг и учащихся, включая книги, полученные и отправленные для чтения, можно просматривать автоматически.

*Отчетность* – этот раздел получает отчет между библиотекой и пользователями (студентами), т. е. отслеживает список книг, которые студент получил из библиотеки для чтения и вернул ее назад на регулярной основе (дата, номер студента, имя и фамилия, регистрационный номер книги, наименование книги и данные об издательстве).

*Книги* – в этом разделе дается полный отчет о книгах, доступных в фонде библиотеки. Сначала книги подразделяются на разделы в соответствии с их содержанием (языки программирования, математика, языки, художественная литература и т. д.), а затем книги регистрируются в соответствии с порядком, в котором они распределяются. Программа дает отчет о каждой книге индивидуально, т. е. указанная книга находится в библиотеке или на руках у студента.

*Студенты* – в этом разделе каждая специальность института сначала регистрируется условными отметками. Затем создается реестр студентов согласно их специальностям (специальность, фотография, студенческий билет, имя и фамилия).

**Страница пользователя и ее возможности.** Пользователи могут войти в программу библиотечной системы после регистрации у администратора, введя свое личное имя пользователя (логин) и пароль. В первом открывшемся окне появится список всех книг в базе данных библиотеки, зарегистрированных этой программой.

Главное окно программы приведено на рис. 2.

Если нужная книга находится в библиотеке, появляется надпись «В библиотеке», а если в данное время книга находится у студента, возникает надпись «У студента». Несмотря на большое количество зарегистрированных книг, есть возможность легкого поиска книг по категории, номеру, названию и автору.



Рис. 2. Главное окно программы

Студенты также могут использовать программу «Библиотечная система» как на своих персональных компьютерах через локальную систему института, так и через мобильные телефоны с помощью беспроводного сервиса WiFi (Wireless Fidelity).

Главное окно администратора (библиотекаря) дано на рис. 3.

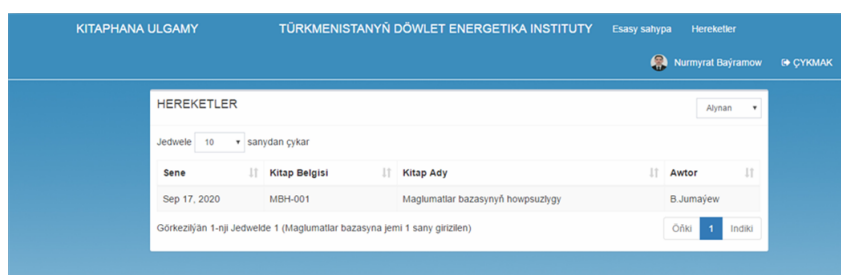


Рис. 3. Главное окно администратора (библиотекаря)

Этот программный комплекс, обладающий широким набором функций, отличается следующими особенностями:

- использование в веб-браузере при подключении к локальной сети;
- групповая регистрация пользователей;
- отдельная регистрация каждой выделенной книги;
- размещение зарегистрированных книг по разделам;
- поиск книг по авторам, разделам, порядкам записи;
- доступ к системе «Библиотека» с помощью персональных компьютеров, планшетов и мобильных телефонов;
- возможность видеть соответствующие отчеты по общим учебникам, используемым каждым студентом.

На переднем плане основных видов цифровых технологий, применяемых в мировой практике, находятся веб-технологии, способные работать на основе интернета и локальных сетевых систем. Созданный нами программный пакет «Библиотечная система» также может работать на веб-сайте с использованием его технических возможностей. Разработанный специалистами Государственного энергетического института Туркменистана данный программный комплекс является одним из первых образцов национального продукта в этой сфере.

Пакет программного обеспечения библиотечной системы будет использоваться для улучшения базовой структуры системы путем внесения необходимых дополнений в зависимости от спецификаций используемой библиотеки, технических и функциональных характеристик, а также механизмов безопасности ее внутренних программных кодов, которые необходимо регулярно поддерживать. Разработка, совершенствование и внедрение этого типа программного обеспечения веб-технологий на национальной основе внесет значительный вклад в укрепление научной и образовательной системы нашей страны.

#### Литература

1. Дэвис Мишель Е. Изучаем PHP и MySQL / Дэвис Мишель Е., Джон А. Филлипс. – СПб. – М., 2008.
2. Назаров, С. Г. Kitaphana – ylmy hazyna. Türkmenistanyň Döwlet energetika institutynyň ylmy, ylmy – usuly işleriniň ýygyndysy / С. Г. Назаров, М. Рахымов, М. А. Гелдиев. – Аşgabat – Mary : Ýlym. 2020.

УДК 631.35:004.94

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ OpenSCAD

Т. А. Трохова

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

Очередной импульс разработок в области автоматизации проектирования дали достижения в создании систем, позволяющих получать 3D модели технических объектов. Объясняется это тем обстоятельством, что 3D модели дают возможность получить достаточно полную информацию об объекте моделирования, провести исследование поведения объекта при изменении его параметров. Основной инструментарий математического моделирования (системы компьютерной математики) предоставляет инженеру достаточно возможностей для реализации моделей, но в то же время не всегда удовлетворяет интерес исследователя в получении данных моделирования в реальном времени с использованием трехмерной визуальной динамической компоненты модели. Данная работа посвящена решению этой актуальной задачи.

Целями работы является следующее:

- показать возможность разработки визуальных имитационных моделей технических объектов с использованием систем компьютерной графики и анимации;
- разработать и апробировать подход к преподаванию дисциплин компьютерного моделирования для студентов IT-специальностей, позволяющий активизировать практико-ориентированную составляющую дисциплины.

**Постановка задачи.** При моделировании динамических технических объектов необходимо решить следующие задачи:

- получение адекватной математической модели;
- создание компьютерной модели на основе математической модели;
- визуализация результатов моделирования в графическом виде;
- 3D моделирование динамической системы в реальном времени.

Динамическая компьютерная модель, которая позволит решить все изложенные выше задачи, должна обладать следующими основными возможностями:

- получение функции перемещения динамического объекта после решения ОДУ в численном и графическом видах;
- визуальное отображение движения динамического объекта;
- исследование влияния внутренних параметров динамического объекта на экстремальные значения выходных параметров в динамическом режиме;
- изучение влияния входных воздействий на экстремальные значения выходных параметров в динамическом режиме.

Инструментарием для решения поставленных задач являются следующие средства разработки: Python и OpenSCAD.

Система автоматизированного проектирования OpenSCAD – это бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом для создания 3D моделей. OpenSCAD еще называют 3D компилятором на основе языка текстового описания. Документ OpenSCAD определяет геометрические примитивы и программирует изменения и управление в 3D модели. OpenSCAD доступен для Windows, Linux и OS X. Он использует конструктивную сплошную геометрию (CSG). В системе есть все необходимое для программиста, включая разделение программы на модули, возможность написания библиотек, циклы, условия и функции (например, математические). При помощи функций системы возможно создавать довольно сложные геометрические фигуры, а потом соединять их друг с другом, получая в результате еще более сложные модели. При необходимости можно перенести свои проекты на другие CAD-системы, так как код, написанный в OpenSCAD, будет легко распознаваться большинством из них. Для системы написаны библиотеки для разных языков программирования высокого уровня, например, Python или C#, позволяющие генерировать SCAD-скрипт прямо из этих языков. OpenJSCAD – это веб-версия OpenSCAD, при работе в OpenJSCAD программирование модели технического объекта происходит в браузере, что исключает необходимость в установке дополнительного программного обеспечения. Несомненным достоинством OpenSCAD является возможность создания анимационных трехмерных моделей, что очень важно при разработке моделей динамических технических объектов.

Апробация применения OpenSCAD при разработке динамических 3D моделей выполнена на примерах моделирования движения руки робота-манипулятора и движения подвески транспортного средства. Модель простейшего робота-манипулятора содержит взаимосвязанные элементы манипулятора, такие, как шарниры, звенья, ползун и захват. Модель позволяет задать разные законы движения захвата манипулятора и ползуна, провести эксперимент, в котором будет выполнена анимация движения, что даст возможность в наглядном виде проконтролировать положение узлов манипулятора в экстремальных положениях. Расчетная часть модели может быть построена таким образом, чтобы позволить пользователю решить прямую и обратную задачи динамики при исследовании работы механизма. Графическая часть модели призвана дать наглядную иллюстрацию поведения данного технического объекта. При разработке динамической модели подвески транспортного средства расчетная часть модели выполнена с использованием системы программирования Python, данные переданы в OpenSCAD, где производится отладка графической части модели. На рис. 1 показана учебная модель манипулятора в режиме анимации.



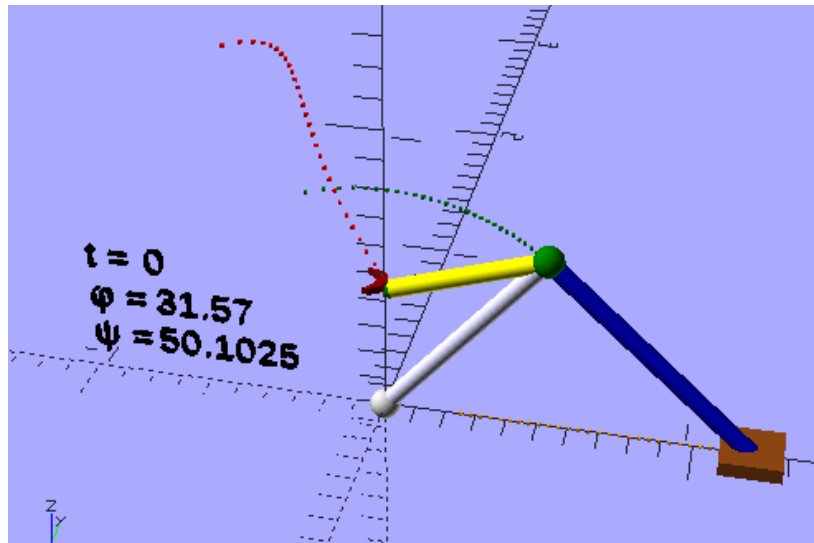


Рис. 1. Модель манипулятора, созданная средствами OpenSCAD

Исследования показали, что существует возможность разработки трехмерной модели динамического технического объекта в системах скриптового CAD-моделирования. Предложенный подход может быть применен к преподаванию дисциплин, связанных с моделированием динамических объектов, он позволит активизировать творческую и практико-ориентированную составляющую этих дисциплин и может быть использован в курсовом и дипломном проектировании студентами технических специальностей вузов.

УДК 62-83-52+62.001.57

### **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПО МЕТОДУ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИИ**

**В. А. Савельев**

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

Имитационная модель (рис. 1) содержит следующие блоки:

- источник переменного тока «Three-Phase Source», представляющий собой питающую трехфазную электрическую сеть;
- преобразователь матричного типа Matrix Converter IGBTs, состоящий из девяти двунаправленных ключей, выполненных по схеме с общим эмиттером;
- нагрузка в виде трехфазного асинхронного двигателя «Asynchronous Machine SI Units» на 4 кВт, 400 В и 1430 об/мин;
- блоки пространственно-векторной модуляции (ПВМ) матричного преобразователя частоты (МПЧ) «SVM Rectification Symmetric Sequence» и «SVM Inversion Symmetric Sequence»;
- блоки измерения электрических величин.

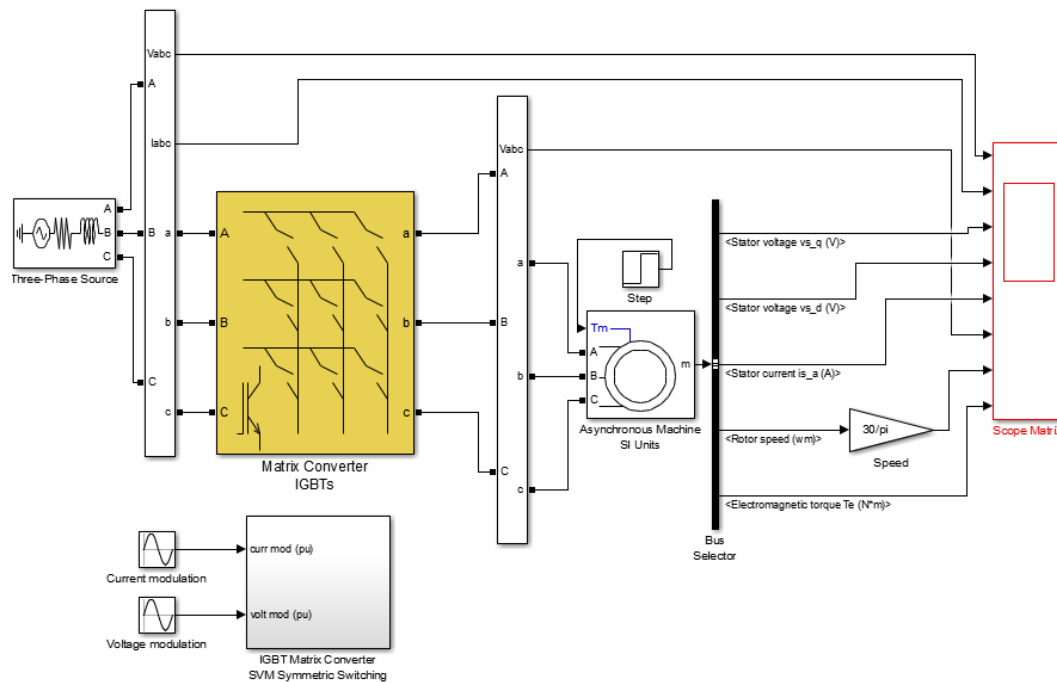


Рис. 1. Модель МПЧ по методу пространственно-векторной модуляции в MATLAB SimuLink

Системой управления ключами МПЧ являются блоки пространственно-векторной модуляции «SVM Rectification Symmetric Sequence» и «SVM Inversion Symmetric Sequence». На вход этих блоков поступают синусоидальные модулирующие сигналы, формирующие входной ток и выходное напряжение МПЧ. На выходе блоков «SVM Rectification Symmetric Sequence» и «SVM Inversion Symmetric Sequence» формируется шина управляющих сигналов «G» для девяти ключей  $S1-S9$  МПЧ. Эти сигналы через блок «Matrix Converter Switching» непосредственно поступают в МПЧ.

Имитационные модели блоков пространственно-векторной модуляции «SVM Rectification Symmetric Sequence» и «SVM Inversion Symmetric Sequence» представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Частота модуляции ключей МПЧ задается элементом «-C-». Блоки «Sector» вычисляют текущие номера секторов тока  $K_i$  и напряжения  $K_u$ .

Длительности циклов модуляции рассчитываются блоком «Calculate Duty-Cycles», исходя из значений входных параметров, а именно – углов  $\alpha_0$  и  $\beta_i$  пространственных векторов выходного напряжения и входного тока и их модулей  $U_0$  и  $I_i$  соответственно.

Так как для полного завершения модуляционного периода необходимо, чтобы сумма коэффициентов модуляции была равна единице, то существующие длительности циклов модуляции следует дополнить нулевым циклом модуляции.

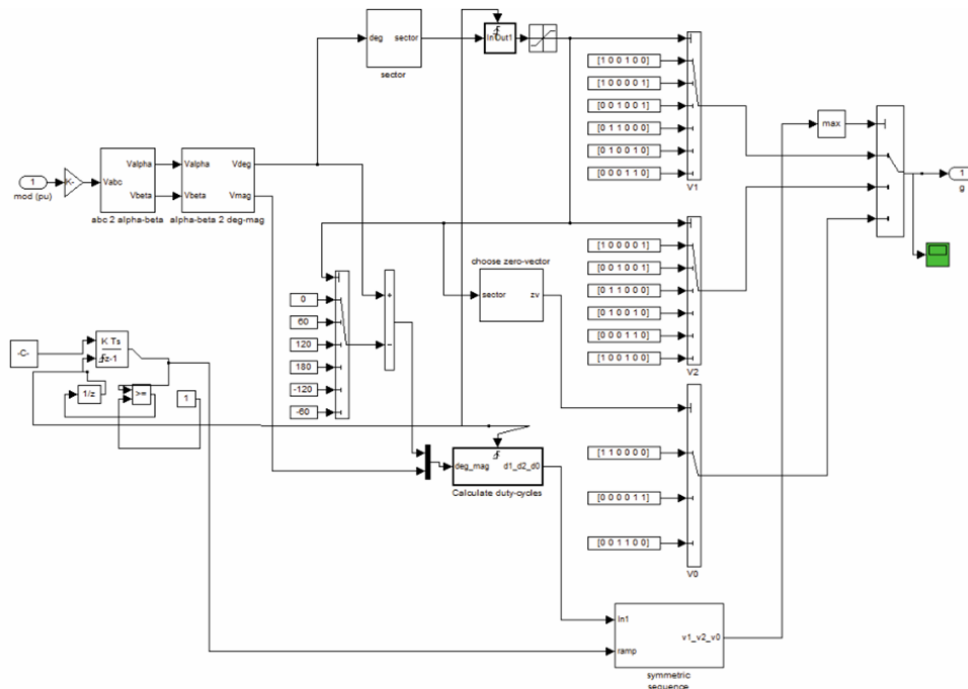


Рис. 2. Блок ПВМ МПЧ «SVM Rectification Symmetric Sequence»

Требуемые векторы для каждой комбинации сектора выходного напряжения  $K_u$  и сектора входного тока  $K_i$  МПЧ приведены в таблице.

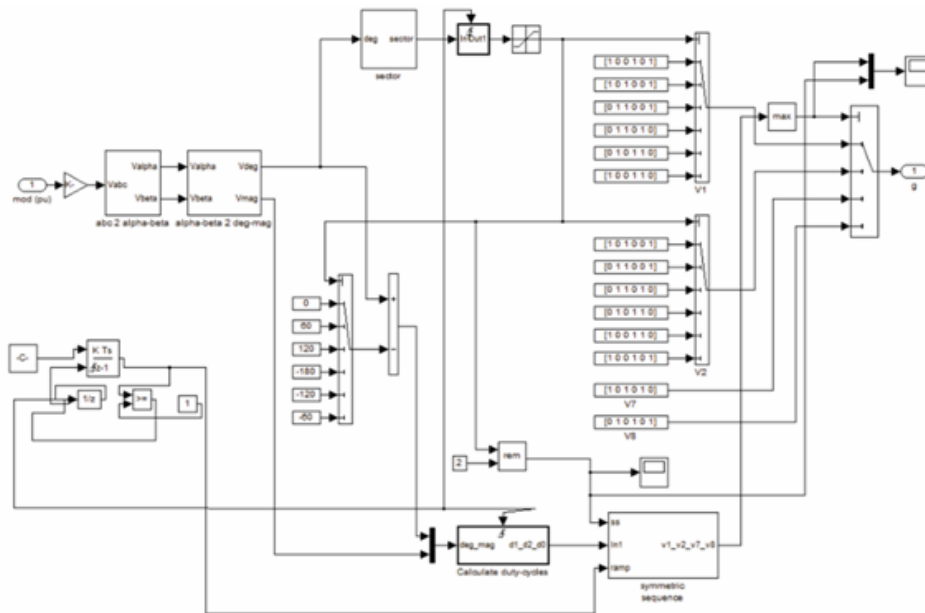


Рис. 3. Блок пространственно-векторной модуляции МПЧ «SVM Inversion Symmetric Sequence»

**Требуемые векторы для каждой комбинации выходного напряжения  $K_u$  и сектора входного тока  $K_i$  МП**

Сектор	$K_u$																								
	1				2				3				4				5				6				
$K_i$	1	+9	-7	-3	+1	-6	+4	+9	-7	+3	-1	-6	+4	-9	+7	+3	-1	+6	-4	-9	+7	-3	+1	+6	-4
	2	-8	+9	+2	-3	+5	-6	-8	+9	-2	+3	+5	-6	+8	-9	-2	+3	-5	+6	+8	-9	+2	-3	-5	+6
	3	+7	-8	-1	+2	-4	+5	+7	-8	+1	-2	-4	+5	-7	+8	+1	-2	+4	-5	-7	+8	-1	+2	+4	-5
	4	-9	+7	+3	-1	+6	-4	-9	+7	-3	+1	+6	-4	+9	-7	-3	+1	-6	+4	+9	-7	+3	-1	-6	+4
	5	+8	-9	-2	+3	-5	+6	+8	-9	+2	-3	-5	+6	-8	+9	+2	-3	+5	-6	-8	+9	-2	+3	+5	-6
	6	-7	+8	+1	-2	+4	-5	-7	+8	-1	+2	+4	-5	+7	-8	-1	+2	-4	+5	+7	-8	+1	-2	-4	+5
	I	II	II	IV	I	II	II	IV	I	II	II	IV	I	II	II	IV	I	II	II	IV	I	II	II	IV	

Далее в блоках пространственно-векторной модуляции происходит выборка пространственных векторов выходного напряжения согласно таблице по значениям входных параметров – текущего сектора тока  $K_i$  и сектора напряжения  $K_u$ .

Затем имя вектора преобразуется в его порядковый номер для переключателей « $V_0, V_1, V_2, V_7, V_8$ ». Рассчитанные блоком «Calculate Duty-Cycles» значения длительностей циклов модуляции симметрично распределяются по периоду модуляции  $T_s$  блоками «Symmetric Sequence».

Далее номера выбранных пространственных векторов перемножаются с логическими сигналами распределения  $v^I, v^{II}, v^{III}, v^{IV}, v^0$ , в любой момент времени только один из которых может быть равен «1», а все остальные – «0». Комбинация ключей МПЧ, соответствующая номеру вектора, является выходным сигналом « $G$ » и поступает в МПЧ.

УДК 004.021

### ТЕЛЕГРАМ-БОТ ДЛЯ ПОИСКА МАРШРУТА ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

**О. А. Кравченко, А. В. Котова**

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

Создание приложений для мобильных устройств – одно из активно развивающихся направлений программирования в современных условиях. Рассматривается решение весьма актуальной для широких слоев населения задачи о создании телеграм-бота для поиска маршрута общественного транспорта в пределах г. Гомеля.

Суть задачи заключается в следующем. Пользователь мобильного приложения, находясь на некоторой остановке общественного транспорта (точка  $A$ ), хочет добраться до другой остановки (точка  $B$ ). С помощью разработанного приложения можно найти ближайший транспорт, выбрав вид транспорта, и построить маршрут от точки  $A$  до точки  $B$  с учетом пересадок, либо увидеть все расписание интересующего транспорта.

Telegram-бот разработан в жанре «аркада» и его главной характеристикой является автоматический ответ после введенного пользователем запроса. Ввод запросов осуществляется посредством нажатия соответствующих кнопок, которые располагаются в интерфейсе программы.

Общая схема работы телеграм-бота изображена на рис. 1.



Рис. 1. Общая схема работы телеграм-бота

Работа функций телеграм-бота, таких, как функция построения оптимального маршрута, функция поиска ближайшего транспорта и функция вывода всего расписания по названию остановки и номеру маршрута выполняется параллельно, поскольку цель данного приложения-бота – одновременная работа с большим количеством пользователей. Реализована выгрузка информации об общественном транспорте г. Гомеля и расписания его движения из сети «Интернет» в заготовленную базу данных.

Телеграм-бот разделен на два фундаментальных модуля:

- модуль для парсинга веб-сайта;
- модуль для работы с Telegram API.

Общая схема работы парсинга веб-сайта дана на рис. 2.

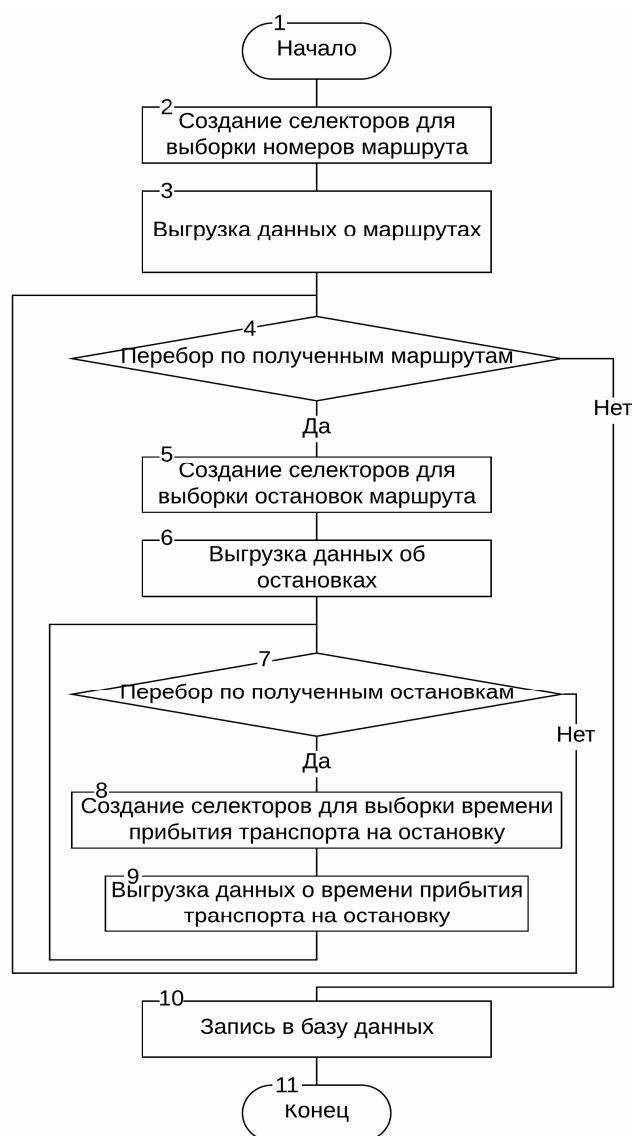


Рис. 2. Общая схема работы парсинга веб-сайта

Работа парсинга выполняется циклично по запрограммированному расписанию каждую неделю в ночное время. Это необходимо для постоянного обновления следующих данных:

- остановок троллейбусов;
- остановок автобусов;
- времени прибытия транспортов на каждую остановку.

В клиентской части телеграм-бота в качестве элементов внешнего оформления выступают:

- описание, демонстрируемое пользователю при первом знакомстве с телеграм-ботом;
- первое сообщение, которое пользователь получает автоматически в начале работы с телеграм-ботом;
- изображение, используемое для упрощения поиска бота среди переписок;
- имя телеграм-бота;
- встроенная клавиатура.

Серверная часть чат-бота на платформе Telegram решает следующие задачи:

- получает и распознает сообщения, отправленные пользователем;
- извлекает и сравнивает полученную информацию для составления корректного ответа;
- извлекает информацию из базы данных путем выполнения запросов с полученными параметрами;
- составляет и отправляет ответ пользователю в виде текста, сформированного на основе запроса пользователя.

Таким образом, основным результатом является разработанное приложение-бот, реализованное на платформе Telegram и отвечающее необходимым базовым функциям: вывод актуального расписания, помощь в подборе лучшего маршрута и поиск ближайшего транспорта для пассажира, пользующегося общественным транспортом города г. Гомеля.

УДК 658.512.011.56

## **О ПОДХОДЕ К АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ДЕТАЛИ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

**П. С. Лебедев, В. С. Мурашко**

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

Целью работы является разработка методики автоматизации конструкторской документации на детали станочных приспособлений на базе их параметрических моделей.

В современных САПР среднего и тяжелого классов наличие параметрической модели заложено в идеологию самих САПР. Существование параметрического описания объекта – это база для всего процесса проектирования.

В работе используется табличная параметризация, которая заключается в создании таблицы параметров типовых деталей. Создание нового экземпляра детали производится путем выбора из таблицы типоразмеров. Табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.

Общая методика автоматизированного формирования документации на детали станочных приспособлений состоит из следующих этапов.

Первым этапом является проектирование и создание базы данных на основе ГОСТа на деталь станочного приспособления, используя СУБД MS ACCESS.

Следующий этап заключается в разработке параметрического блока (или блоков) на деталь в среде AutoCAD, используя геометрические и размерные зависимости. В диспетчере параметров необходимо указать параметры размерных зависимостей и пользовательские параметры, а в таблице свойств блоков – числовые значения для параметризации на группу деталей одного типа.

Третьим этапом является разработка windows-приложения на языке C#.

Для вызова AutoCAD из приложения необходимо скачать ObjectARX и подключить файлы *Autodesk.AutoCAD.Interop.dll* и *Autodesk.AutoCAD.Interop.Common.dll*.

Для получения доступа к базе данных из приложения к ней следует подключиться. Файл базы данных должен быть в формате .mdb.

Отобразить на форме ГОСТа детали при помощи запроса, созданного в MS ACCESS.

Выбрать нужное исполнение для построения чертежа детали. Сохранить данные в текстовом файле.

В AutoCADe написать лисп-программу, которая заменяет значения из таблицы свойств блока на значения, выбранные и сохраненные в C#-приложении.

Описать обработчик события на нажатие кнопки, который будет осуществлять запуск AutoCAD и построения чертежа детали для станочного приспособления по выбранным данным. Предварительно следует определить ревизию AutoCAD, установленную на компьютере, для этого нужно открыть свойства файла "C:\Program Files\Autodesk\AutoCAD 2019\acad.exe".

Предложенная методика была опробована при выполнении курсового проекта по дисциплине «Информационные системы в САПР». C#-приложение также будет полезно конструкторам для автоматизированного формирования документации на детали станочных приспособлений.

УДК 004.42

### **СЕРВИС ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ БЕСПЛАТНОГО ДОСТУПА К РАЗЛИЧНЫМ REST API**

**Косинов Г. П., Самовендюк Н. В.**

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

Всемирная паутина или WWW (world wide web) разрабатывалась как всемирное общедоступное информационное пространство. В 2016 г. количество сайтов, предоставляющих информацию, превысило 1 млрд. Для поиска информации во Всемирной паутине используются поисковые машины, предоставляющие пользователю возможность формирования запроса на основе ключевых слов. Поисковая система генерирует страницу результатов поиска. Результатом поиска является список ссылок на ресурсы в сети интернет, предоставляющих информацию, релевантную ключевым словам запроса.

Для получения информации в распределенных приложениях используются REST API сервисы, которые предоставляют в ответ на запрос пользователя набор данных, необходимых для работы программы. Однако в отличие от веб-сайтов для получения данных можно столкнуться с определенными проблемами.

REST API сервисы – это довольно сложные системы, которые разрабатываются целыми командами. Для того чтобы успешно начать использовать их, нужно зарегистрироваться, получить API-ключ, досконально изучить документацию по этому сервису, а также не забывать следить за сроком жизни полученного API-ключа. Кроме этого часть таких сервисов предоставляет только платный доступ.

Для повышения эффективности использования API сервисов было разработано веб-приложение, предоставляющее пользователю площадку для получения данных в одном месте. Пользователю достаточно зарегистрироваться и получить бесплатно свой API-ключ, а само приложение уже позволит получать данные из различных REST API сервисов, включая платные. Отличительной особенностью разработанного приложения является возможность добавления нового сервиса по результатам анализа обратной связи от пользователей, если такой сервис пользуется повышенной популярностью.



Для использования веб-приложения предусмотрены две роли: администратора и обычного пользователя. Любой пользователь может быть зарегистрирован в системе либо самостоятельно, либо через администратора. У каждой роли есть соответствующий функционал, который приведен на рис. 1 в виде диаграммы прецедентов (вариантов использования), отражающей отношения между действующими лицами (актерами) и прецедентами, помогающей четко определить действующих лиц, их взаимодействие с системой и ожидаемую функциональность системы. Поэтому в приложении реализованы функции регистрации и авторизации пользователей. Все функции сервиса доступны только зарегистрированным пользователям.

После регистрации в системе пользователь получает возможность выбора категории, сервиса и метода доступа к данным, которые ему необходимы для дальнейшего анализа или обработки (рис. 2). После выбора метода в верхней части приложения приводится описание метода выбранного сервиса, а также всех параметров для обращения к этому методу. Пример запроса на языке javascript показан в верхней серой области. Пользователь может проверить результаты работы запроса данных для выбранного сервиса, нажав кнопку «проверить». Для использования функций сервиса пользователю необходим API-ключ, который генерируется автоматически и доступен в профиле пользователя. После проверки работоспособности запроса на получение данных пользователь может скопировать программный код в свое решение и непосредственно получать данные в своем приложении через предоставляемый сервис.

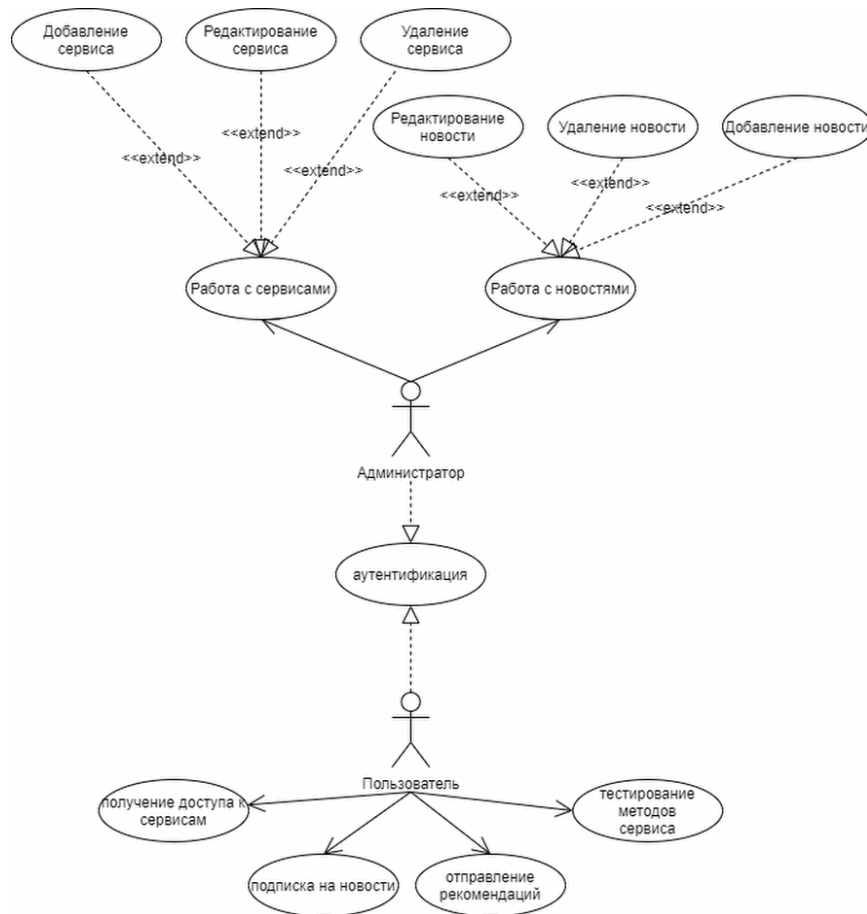


Рис. 1. Диаграмма прецедентов

Для добавления, удаления или редактирования поддерживаемых сервисов предусмотрена отдельная страница, которая доступна только администратору и отображается только при авторизации пользователя как администратора (рис. 3). При нажатии на категорию открывается список API сервисов, которые принадлежат к этой категории, а также список методов и параметров выбранного сервиса.

Еще одна функция, доступная администратору, – работа с лентой новостей. Администратор может создавать, редактировать и удалять новости. В новостях отображается непосредственная информация, связанная с работой сервиса. Эта информация также поступает по электронной почте пользователям, которые при регистрации согласились с условиями рассылки.

Также помимо основного функционала получения данных реализована статистика использования методов, просмотр оставшегося времени жизни API-ключей и форма для предложений пользователей. Отслеживание времени жизни API-ключей позволяет поддерживать сервис в актуальном состоянии. Анализ предложений пользователей дает возможность принять решение по добавлению в список востребованных REST API сервисов.

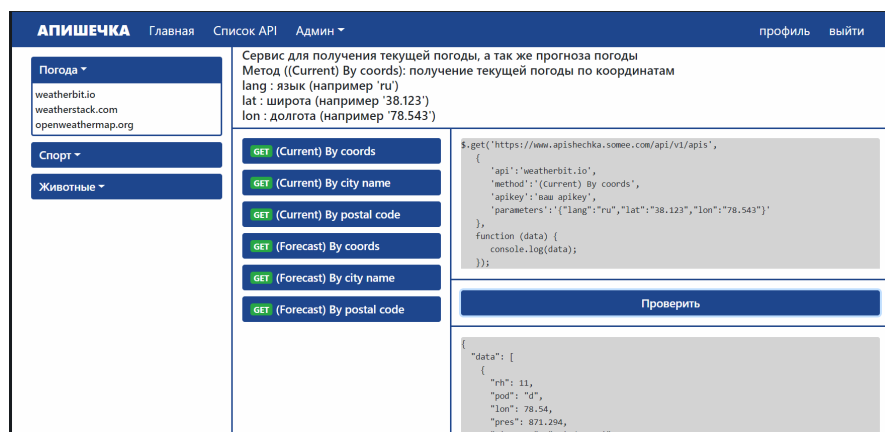


Рис. 2. Результаты выполнения пользовательского запроса

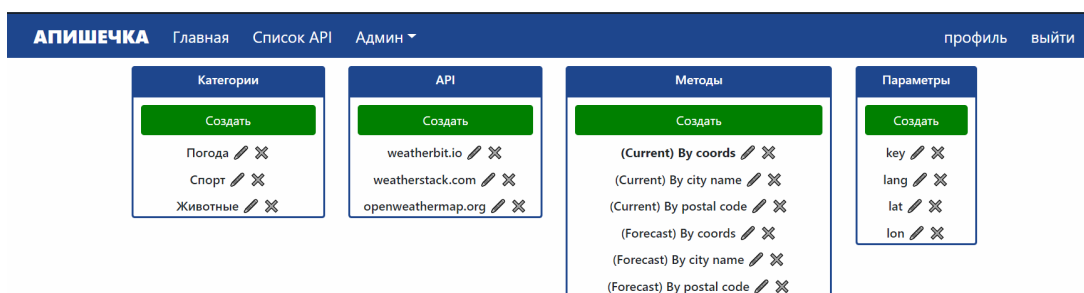


Рис. 3. Страница редактирования сервисов с выбранным методом

При разработке веб-приложения использовались следующие технологии: *ASP.NET Core MVC*, *.NET Core*, *Microsoft SQL Server 2019*, *Entity Framework Core*, *HTML*, *CSS*, *Bootstrap 4*, *JavaScript*, *jQuery*.

## СЕКЦИЯ 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ. МЕХАТРОНИКА

УДК 62-83-52

### СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ РЕМОНТА

И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев

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

Обеспечить длительную и безаварийную работу технологического оборудования промышленных предприятий можно при условии своевременного и качественного ремонта наиболее ответственных ее агрегатов – электродвигателей. Испытательные стенды позволяют производить контроль качества ремонта электродвигателей после ремонта.

Испытательный стенд представляет собой сложное электротехническое устройство, состоящее из электромеханического преобразователя энергии, силового преобразователя и системы управления. Современный испытательный стенд должен обеспечивать установленные регламентом испытаний режимы работы испытуемого объекта, при этом соблюдать требования эффективности и энергосберегающих технологий, которые в значительной мере определяются эффективностью электропривода, входящего в состав стенда [1], [2].

Разработанный испытательный стенд предназначен для контрольных испытаний асинхронных двигателей (АД) напряжением свыше 1000 В и мощностью до 1000 кВт и асинхронных двигателей до 1000 В мощностью 200 кВт (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид стенда для испытания асинхронных двигателей

Испытательный стенд расположен в отдельном помещении корпуса энергетического производства. В состав данного стенда входят: распределительное устройство 6 кВ; индукционный регулятор 6 кВ; колонка № 1 подключения силового кабеля 6 кВ с трансформаторами тока; шкаф 0,4 кВ ШС-1 (выбор коммутационного аппарата в зависимости от мощности испытываемого электродвигателя 0,4 кВ); колонка № 2 подключения силового кабеля 0,4 кВ с трансформаторами тока; стойка № 2 0,4 кВ прямого пуска; пульт управления.

Целью испытаний является проверка соответствия параметров узлов АД требованиям технической документации. Стенд позволяет производить такие испытания, как обкатка на холостом ходу, определение тока холостого хода и величины вибрации на холостом ходу, замер температуры нагрева подшипников. При испытаниях устанавливаются значения отклонений параметров от номинальных значений и степень электрической и механической симметрии ЭМ (различие этих параметров по фазам), что совместно с результатами испытаний под нагрузкой дает необходимые сведения для оценки качества ремонта АД и выбора мероприятий по ее усовершенствованию.

Для высоковольтных АД причиной пробоя изоляции могут быть ионизационные и тепловые процессы, для АД с напряжением менее 1 кВ пробой обычно возникает от теплового фактора. Чтобы установить факт старения изоляции, необходимо подвергнуть изоляцию или ее часть испытанию на пробивание, т. е. разрушению. Такие испытания иногда проводят для АД, поставленных на ремонт, выборочно – для нескольких стержней обмотки с целью определения состояния ее изоляции и объема требуемого ремонта [3], [4].

Проверка состояния подшипников до пуска АД сводится к контролю наличия достаточного количества смазки нужной марки, проверке системы маслоподачи и охлаждения, аппаратуры теплового и вибрационного контроля. После кратковременного включения АД на пониженное напряжение (толчка) и разгона ротора до небольшой частоты вращения следует на выбеге проверить с помощью стетоскопа отсутствие ненормальных шумов, вызванных ударами, цеплянием, сухим трением в деталях опоры и т. п. В процессе последующего выхода на номинальную скорость нужно непрерывно контролировать нагрев вкладышей или наружных обойм подшипников качения, крышек-фланцев уплотнений, смазки, а также уровень вибрации [4].

Время испытаний АД на холостом ходу регламентируется в соответствии с мощностью (см. таблицу).

#### **Время испытаний асинхронных двигателей в соответствии с мощностью**

<b>Мощность АД</b>	<b>Время испытаний (на холостом ходу)</b>
До 1,1 кВт	5 мин
От 1,1 кВт до 11 кВт	15 мин
От 11 кВт до 110 кВт	30 мин
От 110 кВт до 1000 кВт	60 мин

При проведении испытаний АД на разработанном испытательном стенде изменяются физические параметры работы асинхронных электродвигателей, при этом значение тока холостого хода замеряется на последней минуте испытания. Дополнительно осуществляется определение величины вибрации на холостом ходу виброметром; производится замер температуры нагрева подшипников дистанционным лазерным измерителем температуры поверхности.

## Литература

1. Энергоэффективные испытательные стенды / И. В. Дорощенко [и др.] // Энергоэффективность. – 2018. – № 9. – С. 26–30.
2. Захаренко, В. С. Современное состояние и перспективы развития инвариантных электромеханических стендов с рекуперацией энергии / В. С. Захаренко, И. В. Дорощенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2007. – № 4. – С. 80–84.
3. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – 4-е изд., сокр. и перераб. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 407 с.
4. Коваварский, Е. М. Испытание электрических машин / Е. М. Коваварский, Ю. И. Янко. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 319 с.

УДК 621.314

### ОСНОВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ УСТРОЙСТВА НАГРУЖЕНИЯ РЕЗЕРВНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

М. Н. Погуляев, И. В. Дорощенко

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

Для нагружения резервных электрогенераторов при проведении испытаний наиболее перспективным является использование энергосберегающих устройств нагружения (УН), выполненных на базе статических полупроводниковых преобразователей [1]. Такие УН позволяют плавно регулировать величину нагрузки и коэффициента мощности, а также рекуперировать вырабатываемую испытуемым генератором электроэнергию с переменным напряжением и частотой в промышленную сеть. Цель данных исследований – определение основных энергетических показателей, характеризующих энергоэффективность устройства нагружения резервных электрогенераторов.

Энергосберегающее устройство нагружения электрогенераторов выполнено на основе статических полупроводниковых преобразователей и может быть представлено в виде электрической схемы замещения (рис. 1).

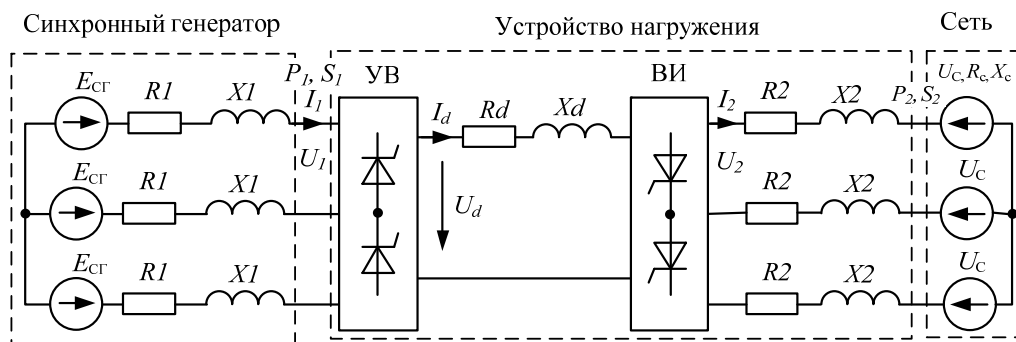


Рис. 1. Электрическая схема замещения энергосберегающего устройства нагружения:

УВ – управляемый выпрямитель; ВИ – ведомый инвертор

Испытуемый синхронный генератор подключается на вход устройства нагружения и является источником, а питающая сеть – это нагрузка, которая подключается к его выходу. Электрические параметры переменных (напряжений, токов, мощностей, сопротивлений), действующих на входе нагрузителя, обозначены индексом  $I$ , на вы-

ходе – индексом 2. Синхронный генератор в схеме замещения представлен параметрами – источниками ЭДС  $E_{сг}$ , активными  $R_1$  и индуктивными  $X_1$  сопротивлениями, сглаживающий дроссель – активным  $R_d$  и индуктивным  $X_d$  сопротивлениями, питающая сеть в схеме замещения – источниками напряжения  $U_c$  с сопротивлениями  $R_c$  и  $X_c$ . Сопротивлениями  $R_2$  и  $X_2$  учитывают параметры коммутационного реактора или согласующего трансформатора.

Основными энергетическими показателями, характеризующими энергоэффективность устройства нагружения, являются коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$  и коэффициент мощности  $K_M$ :

– коэффициент полезного действия  $\eta$  определяется отношением активной мощности на выходе преобразователя  $P_2$  к активной мощности на входе  $P_1$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1},$$

где  $\Delta P = P_1 - P_2$  – потери в элементах нагружателя;

– коэффициент мощности в цепи переменного тока (на входе управляемого выпрямителя  $K_{M1}$  и на выходе инвертора  $K_{M2}$ ) характеризуется отношением активной мощности к полной:

$$K_{M1} = \frac{P_1}{S_1}, \quad K_{M2} = \frac{P_2}{S_2},$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – полная мощность на входе и выходе нагружателя соответственно.

Полные мощности на входе  $S_1$  и выходе  $S_2$  нагружателя представлены выражениями:

$$S_1 = \sqrt{3} U_1 I_1; \quad S_2 = \sqrt{3} U_2 I_2.$$

Для определения энергетических показателей нагружателя был произведен расчет значений напряжений, токов, мощностей на его входе и выходе. Решить данную задачу можно, используя интегральные и спектральные методы расчета. Однако их применение требует сложных математических вычислений во временной и частотной областях. Для снижения трудоемкости расчетов показателей энергоэффективности использовалась имитационная модель устройства нагружения, разработанная в программной среде MATLAB при помощи пакетов расширения SimPowerSystems и Simulink [2], [3]. Применение данной модели позволяет решать не только задачи моделирования и получения численных значений необходимых параметров, но и производить комплексные исследования и визуализацию процессов в различных узлах и блоках устройства нагружения.

В качестве исследуемой машины был взят синхронный генератор с номинальной мощностью  $S_{ном} = 8,1$  кВА и номинальным напряжением  $U_{ном} = 400$  В, током  $I_{ном} = 11,7$  А и коэффициентом мощности  $K_{M1ном} = 0,8$ . С помощью представленной модели произведен расчет необходимых энергетических показателей устройства нагружения при номинальном значении коэффициента мощности синхронного генератора и нагрузках, равных 10, 100 и 110 % от номинальной. Данные значения нагрузки устанавливаются требованиями нормативно-технической документацией

при проведении регламентных испытаниях резервных генераторов. В табл. 1 даны энергетические показатели нагрузителя, полученные в результате имитационного моделирования, при номинальном значении коэффициента мощности генератора  $K_{M1ном} = 0,8$ .

Таблица 1

**Энергетические показатели устройства нагружения  
при номинальном значении  $K_{M1ном} = 0,8$**

Параметры на входе устройства нагружения				Параметры на выходе устройства нагружения				Потери мощности, Вт	КПД нагрузителя
$I_1, А$	$P_1, Вт$	$S_1, ВА$	$K_{M1}$	$I_2, А$	$P_2, Вт$	$S_2, ВА$	$K_{M2}$	$\Delta P, Вт$	$\eta, \%$
1,17	616	768	0,8	0,9	-446,5	592	0,75	169,5	72,5
11,7	6096	7596	0,8	11,21	-5825	7347	0,79	271	95,5
12,8	6679	8292	0,8	12,3	-6395	8061	0,79	284	95,7

Токи нагрузки устанавливались, согласно условиям нагружения испытуемого генератора, равным  $0,1 \cdot I_{ном}$ ,  $I_{ном}$ ,  $1,1 \cdot I_{ном}$  (1,17, 11,7 и 12,8 А соответственно). Отрицательное значение выходной активной мощности  $P_2$  указывает на рекуперацию энергии испытуемого генератора в сеть.

Дополнительно исследовано влияние коэффициента мощности, задаваемого на входе нагрузителя на его энергетические показатели. В табл. 2 приведены энергетические показатели нагрузителя, полученные при различных значениях коэффициента мощности  $K_{M1}$  и номинальном значении тока нагрузки  $I_{ном} = 11,7 А$ .

Таблица 2

**Энергетические показатели устройства нагружения при номинальном  
значении тока нагрузки 11,7 А и различных значениях  
коэффициента мощности генератора**

Параметры на входе устройства нагружения			Параметры на выходе устройства нагружения			Потери мощности, Вт	КПД нагрузителя
$K_{M1}$	$P_1, Вт$	$S_1, ВА$	$K_{M2}$	$P_2, Вт$	$S_2, ВА$	$\Delta P, Вт$	$\eta, \%$
0,88	6740	7630	0,87	-6460	7368	280	95,8
0,8	6096	7596	0,79	-5825	7347	271	95,5
0,7	5308	7602	0,69	-5047	7335	255	95,0
0,6	4571	7620	0,59	-4316	7336	255	94,4
0,49	3750	7649	0,47	-3499	7356	251	93,3
0,4	3097	7700	0,39	-2851	7363	246	92,0

Анализ полученных результатов показывает следующее:

– в режимах работы, близких номинальному, нагрузитель обладает высоким коэффициентом полезного действия (до 95,5 %). При нагрузке  $0,1 \cdot I_{ном}$  коэффициент полезного действия снижается до 72 %;

– в номинальном режиме при изменении коэффициента мощности в диапазоне от 0,4 до 0,88 коэффициент полезного действия устройства нагружения меняется незначительно (92,0–95,8 %).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что энергосберегающее устройство нагружения, построенное на статических преобразователях, имеет достаточно высокие энергетические показатели. Это позволяет считать, что данное устройство может успешно применяться для проведения регламентных испытаний резервных генераторов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Погуляев, М. Н. Энергосберегающее устройство нагружения резервных электрогенераторов / М. Н. Погуляев, А. А. Смахтин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 2017 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2017. – С. 399–401.
2. Погуляев, М. Н. Имитационная модель энергосберегающего устройства нагружения резервных электрогенераторов / М. Н. Погуляев // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель 22–23 ноябр. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» : под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 163–164.
3. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

УДК 620.1.08

### **ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

**Л. В. Веппер, В. В. Логвин**

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

Внедрение средств технической диагностики позволяет отказаться от обслуживания и ремонта по регламенту и перейти к прогрессивному принципу обслуживания и ремонта по фактическому состоянию, что дает значительный экономический эффект [1].

Спектр и форма сигнала вибрации содержат информацию о характерных дефектах подшипников качения. В этой информации содержатся специфические особенности в зависимости от вида дефекта. Одна из таких характерных особенностей – наличие несинхронных пиков, т. е. пиков, не являющихся кратными гармониками частоты вращения вала электрической машины. Спектр вибрации может содержать как дискретные пики, так и широкополосные частотные области высокого уровня. Во временном сигнале вибрации могут наблюдаться ударные импульсы, обусловленные перекачиванием элементов качения через дефекты дорожек или контактом дорожек с дефектными участками элементов качения.

Важным моментом является то, что колебания, связанные с дефектом подшипника качения, имеют меньшую амплитуду, чем колебания, связанные со многими другими повреждениями, такими, как дисбаланс, несоосность или дефекты зубчатой передачи.

Во временном сигнале вибрации и его спектре присутствуют характерные признаки дефектов подшипников качения, которые сильно зависят от вида дефекта.



Один из таких признаков – присутствие в спектре несинхронных пиков, т. е. пиков, которые не являются целочисленными гармониками частоты вращения. Более того, при развитых дефектах можно наблюдать гармоники этих несинхронных пиков. Спектр может содержать как узкополосные пики, так и размытые «в виде холмов», в которых сосредоточена вибрационная энергия (рис. 1).

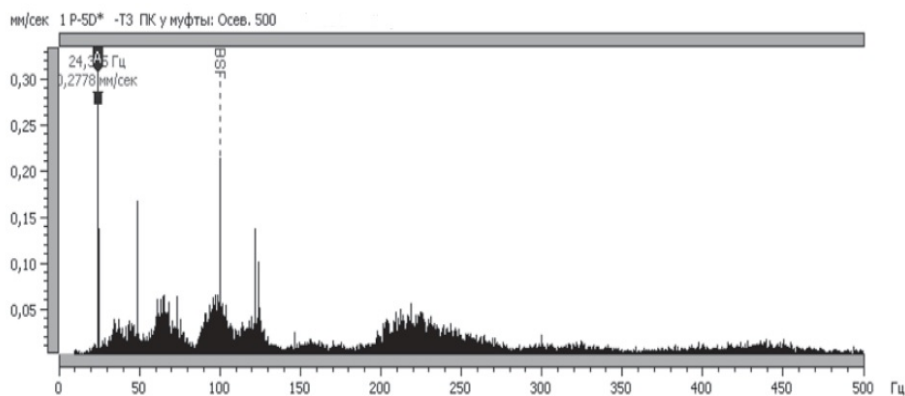


Рис. 1. Выкрашивание тел качения в подшипнике электрического двигателя

Из колебательных сил электромагнитного происхождения в электрических машинах следует выделить:

- магнитные силы, возникающие в результате изменений магнитной энергии в определенном ограниченном пространстве, как правило, в ограниченном по протяженности участке воздушного зазора;

- электродинамические силы, определяемые взаимодействием магнитного поля с электрическим током;

- магнитострикционные силы, вызываемое эффектом магнитострикции, т. е. изменением линейных размеров магнитного материала под действием магнитного поля.

В электрических машинах переменного тока возможно возникновение специфических вибраций двух типов.

Во-первых, это электромагнитные вибрации ферромагнитных сердечников и стальных конструктивных элементов электротехнического оборудования, по которым во время работы оборудования протекает переменный магнитный поток.

Эти вибрации возникают за счет специфического процесса, который в литературе называется магнитострикцией. Этот эффект обусловлен тем, что при перемагничивании ферромагнитных материалов сердечника изменяется внутренняя ориентация элементарных намагниченных частиц, доменов. При каждом перемагничивании сердечника происходит поворот доменов на  $180^\circ$ , что в итоге и приводит к небольшому «линейному расширению» ферромагнитного материала. Поскольку перемагничивание сердечника магнитным потоком осуществляется дважды за один период питающей сети, то и частота вибрации, обусловленная эффектом магнитострикции, равняется удвоенной частоте питающей сети, т. е. 100 Гц. Вне зависимости от оборотной частоты вращения ротора электрической машины частота вибрации сердечника (пакета стали статора) всегда равна 100 Гц.

Во-вторых, вибрации в электрической машине вызываются специфическими электродинамическими силами, которые в литературе принято называть «амперовы-

ми силами», так как их величина определяется по закону Ампера. Самое важное для нас в этом законе заключается в том, что в числителе стоит произведение токов в проводниках, т. е. квадрат тока промышленной частоты. Из тригонометрии следует, что квадрат синусоидального сигнала есть другой гармонический сигнал, но имеющий удвоенную частоту. Таким образом, получаем, что сила электродинамического воздействия между двумя проводниками с синусоидальными токами промышленной частоты имеет удвоенную частоту относительно частоты питающей сети.

Таким образом, вибрации электрической машины, не вызванные механическими проблемами, имеют удвоенную частоту относительно частоты питающей сети, т. е. равную 100 Гц. Это определение относится как к электромагнитным причинам повышенной вибрации, появляющейся в сердечниках электрических машин за счет сил магнитострикции, так и к электродинамическим силам взаимодействия проводников друг с другом, возникающим при протекании токов по обмоткам электрической машины.

#### Литература

1. Баркова, Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования / Н. А. Баркова. – СПб. : Изд. центр СПбМТУ, 2006. – 160 с.

УДК 621.38

### МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ С USB-ИНТЕРФЕЙСОМ

Э. М. Виноградов

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

Интерфейс USB (универсальная последовательная шина) предназначен для подключения различных периферийных устройств к персональному компьютеру. Шина позволяет обеспечить такие основные требования, как высокая скорость передачи, одновременное подключение большого количества устройств, надежная связь, возможность горячего подключения устройств, низкая цена. Шина USB имеет топологию многоярусной звезды, где в центре находится главный компьютер (хост), в средних узлах – хабы, а в конечных точках – индивидуальные устройства. Хост всегда является ведущим на шине и обмен данными осуществляется под его непосредственным управлением.

Передачи по шине (в версии USB 2.0) могут осуществляться в одном из трех режимов: низкая скорость – до 1,5 Мбит/с; полная скорость – до 12 Мбит/с; высокая скорость – до 480 Мбит/с. Для подключения устройств в USB используется 4-жильный кабель: питание  $V_{BUS} = +5$  В; общий GND; сигнальные провода D+ и D-. Устройство, подключенное к USB, может получать от шины ток до 500 мА.

USB поддерживает подключение и отключение устройств в процессе своей работы. Обнаружив вновь подключенное устройство, хост выполняет процесс конфигурирования устройства, чтобы оно стало готовым для работы на шине. При этом устройство передает хосту свои параметры, позволяющие идентифицировать устройство, определить его функции, требования к электропитанию и т. д.

В связи с тем, что в интерфейсе USB реализован сложный протокол обмена информацией, в устройстве сопряжения с интерфейсом необходим микропроцес-

сорный блок, обеспечивающий поддержку протокола. Поэтому основным вариантом при разработке устройства сопряжения является применение микроконтроллера, который будет обеспечивать поддержку протоколов обмена. В настоящее время все основные производители микроконтроллеров выпускают продукцию, имеющую в своем составе блок USB.

Некоторые из микроконтроллеров компании Microchip семейства PIC18 непосредственно поддерживают интерфейс USB. Например, микроконтроллер PIC18F4550 имеет встроенный интерфейс USB с возможностью работы на низкой и на полной скоростях, что позволяет выполнить соединение между главным компьютером и микроконтроллером [1].

Важнейшая задача при проектировании микроконтроллерной системы – выбор средства разработки. В настоящее время самым мощным средством разработки программного обеспечения для микроконтроллеров являются интегрированные среды разработки IDE (Integrated Development Environment), имеющие в своем составе текстовый редактор, компилятор языков высокого уровня, отладчик-симулятор, а также библиотеки готовых функций. Один из таких программных инструментов – среда разработки mikroC компании «MikroElektronika». Данная среда разработки позволяет быстро создавать эффективные программы на распространенном языке высокого уровня Си. Среда имеет удобный интерфейс пользователя со встроенным редактором текста и мощным отладчиком программ. Встроенный мастер проектов позволяет в считанные минуты создать заготовку рабочей программы для любого микроконтроллера из целого семейства. Библиотека готовых функций обеспечивает пользователя поддержкой для быстрого и безошибочного создания программы. Компания MikroElektronika создала среду разработки mikroC PRO for PIC для PIC-микроконтроллеров компании Microchip [2].

В среде mikroC PRO for PIC имеются функции для работы с HID-устройствами. Каждый проект на базе библиотеки USB HID должен включать в себя исходный файл дескриптора, содержащий идентификатор и название производителя, идентификатор и название продукта, размер посылки и другую важную информацию. Для создания файла дескриптора следует использовать USB HID-терминал, интегрированный в среду разработки mikroC и вызываемый командой Tools→HID Terminal. Название файла дескриптора по умолчанию USBdsc.c. Файл USBdsc.c может быть включен в проект программы для микроконтроллера с помощью директивы #include.

Среда разработки mikroC поддерживает следующие библиотечные функции, когда используется PIC-микроконтроллер со встроенным USB-интерфейсом (например, PIC18F4550):

- *HID\_Enable*. Разрешает обмен по USB и требует два аргумента: адрес буфера для чтения и адрес буфера для записи. Она должна быть вызвана первой перед другими функциями библиотеки USB, и эта функция не возвращает никаких данных.

- *HID\_Read*. Получает данные с шины USB и сохраняет их в приемном буфере. Она не имеет аргументов, но возвращает количество принятых символов.

- *HID\_Write*. Посылает данные из буфера записи на шину USB. Имя буфера (такое же, как при инициализации) и количество данных для передачи должно быть определено в качестве аргументов функции. Функция не возвращает никаких данных.

- *HID\_Disable*. Дезактивирует трансивер данных USB. Она не имеет аргументов и не возвращает никаких данных.

В докладе рассматривается микроконтроллерный измеритель атмосферного давления с USB-интерфейсом. Он выполнен всего на двух микросхемах: микроконтроллере

PIC18F4550 и интегральном датчике давления MPX4115A. Питание прибора осуществляется от разъема шины USB. Измеренное давление каждую секунду посылается через интерфейс USB и отображается на дисплее персонального компьютера. Датчик генерирует аналоговое напряжение, пропорциональное атмосферному давлению. Выходное напряжение датчика определяется:

$$U = 5,0(0,009P - 0,095), \quad (1)$$

где  $U$  – выходное напряжение, В;  $P$  – атмосферное давление, кПа.

Атмосферное давление обычно показывается в минибарах (мбар). Поэтому формулу (1) удобно преобразовать к виду

$$P(mb) = (2,0U + 0,95)/0,009. \quad (2)$$

В программе для микроконтроллера используется прерывание от таймера TMR0 для генерирования прерывания через каждые 3,3 мс, что необходимо для сообщения хосту об активности присоединенного к шине устройства. В бесконечном цикле напряжение от датчика давления преобразуется с помощью встроенного АЦП в цифровой код, а затем вычисляется действительное напряжение от датчика. Атмосферное давление рассчитывается по формуле (2) и сохраняется в массиве. После этого вызывается функция HID\_Write для пересылки данных о давлении на шину USB. Программа затем ждет 1 с и описанный процесс повторяется вновь.

#### Литература

1. Брей, Б. Применение микроконтроллеров PIC18. Архитектура, программирование и построение интерфейсов с применением С и ассемблера : пер. с англ. / Б. Брей. – К. : МК-Пресс ; СПб. : КОРОНА-ВЕК, 2008. – 576 с.
2. Шпак, Ю. А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров / Ю. А. Шпак. – К. : МК-Пресс ; СПб. : КОРОНА-ВЕК, 2011. – 546 с.

УДК 621.3.07

### СТРУКТУРА І ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРАЇТВАРАЛЬНИКА АДНАФАЗНОЙ СЕТКИ Ў ТРОХФАЗНУЮ ДЛЯ АСИНХРОННЫХ РУХАВІКОЎ

Ю. В. Крышнёў, А. Я. Запольскі

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт  
імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

Неад'емнай часткай любога электрычнага прывада з'яўляецца пераўтваральнік частаты, які выкарыстоўваецца для змены частаты электрычнага току, што дазваляе ажыццяўляць плыўнае рэгуляванне хуткасці асінхронных і сінхронных электрычных рухавікоў.

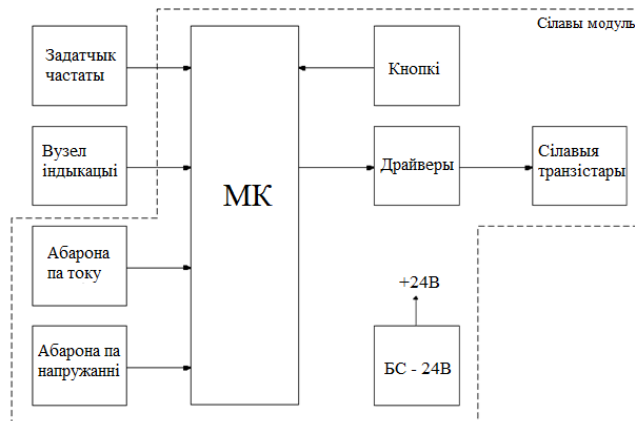
Частотны пераўтваральнік электроннага тыпу ўключае ў сябе 2 асноўныя элементы: выпрамнік і інвертар.

Частотны асінхронны пераўтваральнік дазваляе пераўтварыць частату напружання пераменнага току 50 або 60 Гц у частату ад 1 да 800 Гц, тым самым дазваляючы ажыццяўляць плыўны пуск асінхроннага рухавіка з магчымасцю рэгулявання частаты і напрамку кручэння вала рухавіка [1].

Пераўтваральнік адпавядае наступным характарыстыкам: уваходнае напружанне – аднафазнае, 220 В, 50 Гц; выходнае напружанне – трохфазнае, 220 В, 75 Гц;

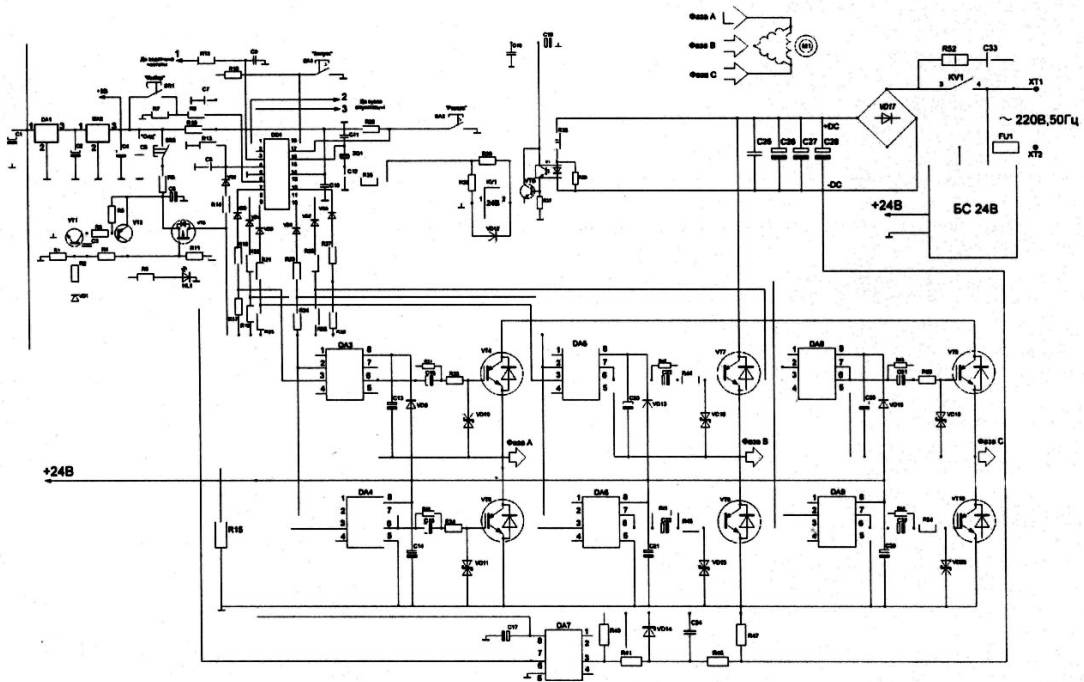
мінімальна частата выхаднога напружання – 1 Гц; максімальная частата выхаднога напружання – 75 Гц; крок рэгулявання частаты выхаднога напружання – 0,5 Гц; скалярны спосаб кіравання рухавіком; лінейная залежнасць  $U/f$  з узвышэннем напружання на нізкай частаце; поўнае выкарыстанне сілкавальнага напружання пры намінальнай частаце; устаноўка частаты выхаднога напружання з захаваннем, а таксама хуткі разгон на яе пры наступных уключэннях пераўтваральніка; магчымасць работы з асінхроннымі рухавікамі магутнасцю да 4 кВт; наяўнасць: рэверсу, які дазваляе змяняць кірунак кручэння вала рухавіка; абарон па напружанні і току; індывідуальнасць; энерганезалежнай памяці для захоўвання параметраў запуску рухавіка; сістэмы кіравання, якая складаецца з клавіятуры і пераменнага рэзістара задання частаты.

Структурна схему пераўтваральніка можна падзяліць на 3 элементы: сілавы модуль з блокам сілкавання, задатчык частаты і вузел індывідуальнасць. Сілавы модуль уключае абароны па току і напружанні. Структурная схема пераўтваральніка паказана на мал. 1.



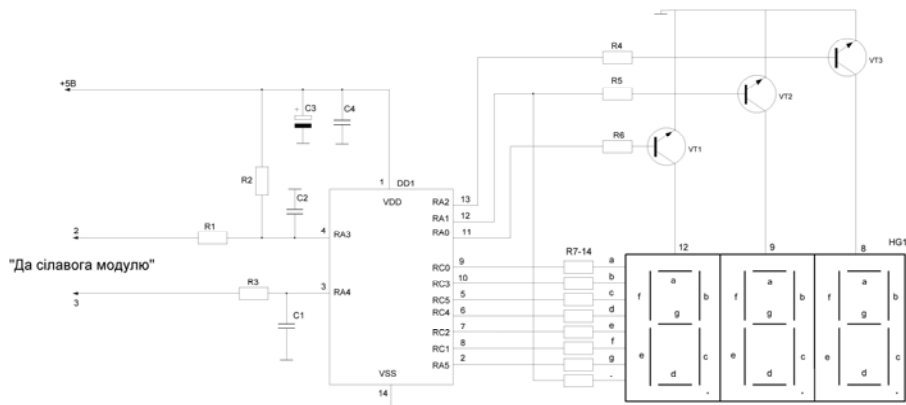
Мал. 1. Структурная схема пераўтваральніка аднафазнай сеткі ў трохфазную для маламагутных асінхронных рухавікоў

У якасці асноўнага вузла кіравання выкарыстаны 16-разрадны мікракантролер PIC16F648A [2], які падае сігнал на інвертар, ўключаючы ў сябе аптадрайверы HCPL3120 і кіраваныя імі сілавыя ключы са зваротнымі дыёдамі. На ўваходзе пераўтваральніка знаходзіцца выпрамнік са згладжваючым фільтрам. Хуткадзейная абарона па току рэалізавана таксама на аптадрайверы HCPL3120 і звязцы біпалярных транзістараў з палярным ключом. Яе спрацоўванне адбываецца пры перавышэнні току на драйверах на працягу 10 мкс. Абарона па напружанні спрацоўвае пры перанапружанні на DC-звяне сілавога модуля. Яна пабудавана на звязцы аптрона з транзістарам, якая кіруе ланцугом шунтавання. Сілкаванне сілавога модуля адбываецца ад 24 В. Напружанне сілкавання кіравальнага мікракантролера фарміруецца праз каскад паніжальных стабілізатараў LM7812, LM7805. Сілавы модуль мае лагічныя сувязі з вузлом індывідуальнасць і задатчыкам частаты. Прынцыповая схема сілавога модуля дадзена на мал. 2.



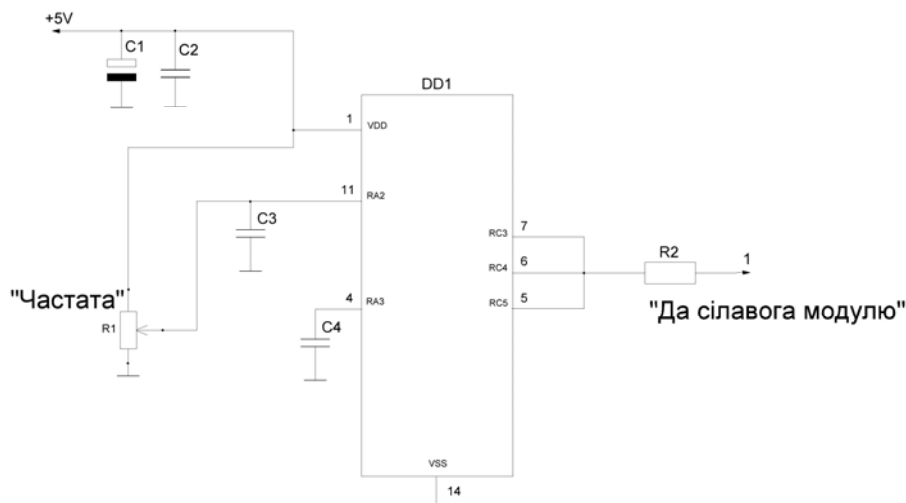
Мал. 2. Схема электрическая принципиальная силового модуля

Вузел индикации построен на 12-разрядном микроконтроллере PIC16F676 и 3-разрядном сегментном индикаторе Kingbright BC56-11, на які выводяться інформація аб рэжымах пераўтваральніка [3], [4]. Схема электрическая принципиальная узла индикации показана на мал. 3.



Мал. 3. Схема электрическая принципиальная узла индикации

Асноўным вузлом датчыка частаты з'яўляецца 12-разрядны мікракантролер PIC16F676, да якога падлучаны пераменны рэзістар, пры змененні супраціву якога адбываецца змена частаты выхаднога напружання на рухавік. Сілкаванне мікракантролераў вузла індывіцыі і датчыка частаты адбываецца ад сілавонага модуля, з якім таксама ёсць лагічныя сувязі. Схема электрическая принципиальная датчыка частаты прыведзена на мал. 4.



Мал. 4. Схема электрычная прынцыповая задатчыка частаты

Для фарміравання выхаднога сігналу пераўтваральніка выкарыстоўваецца мікракантролер PIC16F648A, асноўная функцыя якога – генератар скалярнай трохфазнай прасторава-вектарнай ШІМ. Кірунак задаецца пераключэннем у пэўнай паслядоўнасці фаз па адліковых інтэрвалах са зрухам у  $120^\circ$ . На выхадзе пераўтваральніка атрымліваюцца сінусоідныя лінейныя вектары напружанняў.

Пры выкарыстанні пераўтваральніка вырашаюцца наступныя праблемы: павялічаны пусковы момант, плыўны старт без вялікіх значэнняў пускавога току, адсутнасць празмернага нагрэву рухавіка.

#### Литература

1. Частотный преобразователь (электропривод). – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Частотный\\_преобразователь\\_\(электропривод\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Частотный_преобразователь_(электропривод)). – Дата доступа: 01.03.2020.
2. Техническая документация на дисплей Kingbright BA/BC56-11. – Режим доступа: <https://doc.platan.ru/pdf/ec189-190.pdf>. – Дата доступа: 01.03.2020.
3. Техническая документация на микроконтроллер PIC16F648A. – Режим доступа: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F648A>. – Дата доступа: 01.03.2020.
4. Техническая документация на микроконтроллер PIC16F676. – Режим доступа: <http://www.microchip.ru/d-sheets/40039.htm:PIC16F676:1x1>. – Дата доступа: 01.03.2020.

УДК 528.9:004.02

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ КАРТОГРАФИИ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ НА ОСНОВЕ КРОССПЛАТФОРМЕННОГО ФРЕЙМВОРКА Qt

А. В. Сахарук, С. А. Иванов

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

Qt – это кроссплатформенная среда разработки приложений для настольных, встроенных и мобильных устройств. Поддерживаемые платформы включают Linux, OS X, Windows, VxWorks, QNX, Android, iOS, BlackBerry, Sailfish OS и др.

Qt сам по себе не является языком программирования. Это фреймворк, написанный на C++. Препроцессор, МОК (компилятор метаобъектов) используются

для расширения языка C++ посредством таких функций, как сигналы и слоты. Перед этапом компиляции МОК анализирует исходные файлы, написанные на Qt-расширенном C++, и генерирует из них исходные коды C++, соответствующие стандарту. Таким образом, сам фреймворк и приложения (библиотеки), использующие его, могут быть скомпилированы любым стандартным компилятором C++, например, Clang, GCC, ICC, MinGW и MSVC [1], [2].

Первоначально необходимость разработки собственного модуля картографии появилась во время создания приложения для поисково-спасательного отряда «Симуран» в связи с тем, что уже существующие модули работают, как правило, при интернет-соединении и это, исходя из специфики работы поисково-спасательных отрядов, невозможно. Также существуют модули картографии для офлайн-отрисовки карт, но они являются коммерческими проектами, что приводит к трудности разработки конечного приложения, так как нет возможности более гибкой настройки и доработки модулей картографии под свои нужды.

Перед разработкой модуля были выделены следующие эксплуатационные требования:

1. Максимальная экономия заряда батареи (минимальное использование вычислений).
2. Работа модуля не должна зависеть от наличия и качества интернет-соединения.

Исходя из вышеописанных условий, был выбран плиточный (мозаичный) метод отрисовки (далее – рендеринг) карт. При использовании плиточного метода рендеринга карт, достаточно один раз отрисовать карту, а затем распространить ее на другие устройства [3], [4].

К преимуществам плиточного метода рендеринга можно отнести:

- 1) простота в реализации метода;
- 2) меньшее суммарное количество операции для рендеринга карт по сравнению с методом непрерывного рендеринга.

Самым значимым недостатком данного метода является необходимость в большом объеме памяти для хранения отрисованной карты.

Разрабатываемое приложение, которое использует модуль картографии, будет загружать из памяти фрагменты карты в виде изображений (далее – тайлы).

Для реализации данной системы необходимо наличие двух модулей: модуль рендеринга карт и их актуализации и непосредственно модуль картографии, использующий заранее отрисованные карты. Пример такой системы приведен на рис. 1.

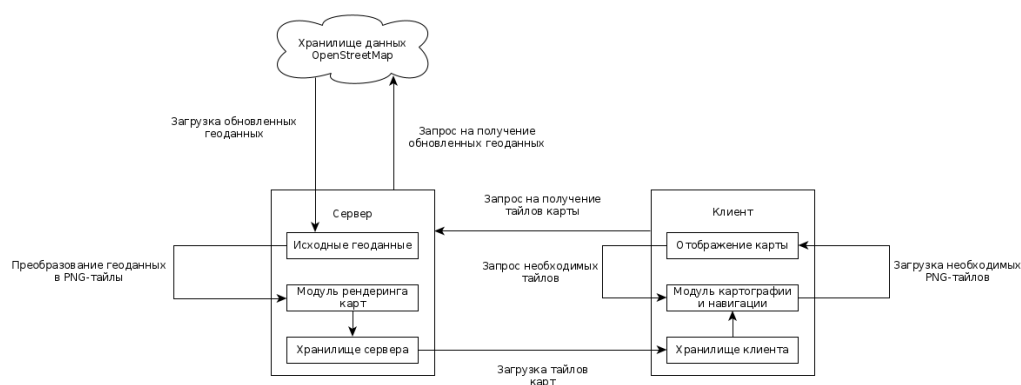


Рис. 1. Структурная схема системы, использующей модуль картографии



Модуль рендеринга карт вынесен на сторону сервера. Его задача – это рендеринг карт на основе геоданных, полученных с сайта OpenStreetMap или других официальных сайтов проекта OpenStreetMap. Рендеринг карт занимает довольно продолжительное время (зависит от качества детализации, требуемых уровней приближения и размера необходимой области). Результатом работы модуля рендеринга карт является множество изображений заданного размера с именем, содержащим полную информацию об изображенной области, с помощью которой клиентский модуль картографии сможет однозначно определить, какие тайлы необходимы для отображения на карте в данный момент. Сервер выдает заранее подготовленные тайлы по запросу клиента.

На стороне клиента находятся два взаимосвязанных компонента: компонент отображения карты и модуль картографии. Компонент отображения карты кроме непосредственно отображения реагирует на действия (ввод данных) пользователя. На основе действий пользователя компонент отображения принимает решение, что нужно отобразить и какие для этого необходимы данные. Данные он запрашивает у модуля картографии.

Модуль картографии решает, какие данные нужны для компонента отображения, в зависимости от запроса. Он определяет, где хранятся те или иные данные и как управлять данными на устройстве (использование данных в оффлайн-хранилище, использование кэша, отправка запросов на сайт OpenStreetMap).

Данный модуль был реализован в виде плагина (совместно с используемой библиотекой с расширением .so в \*nix системах и динамической библиотекой .dll в Windows). Плагин применяет общий интерфейс QGeoServiceProviderFactory для взаимодействия с другими элементами фреймворка Qt (рис. 2). Данный интерфейс позволяет реализовать четыре метода:

- 1) createMappingManagerEngine – интерфейс для картографирования;
- 2) createGeocodingManagerEngine – интерфейс для геокодирования;
- 3) createRoutingManagerEngine – интерфейс для маршрутизации;
- 4) createPlaceManagerEngine – интерфейс для работы с точками интереса (Points-of-interest, POI).

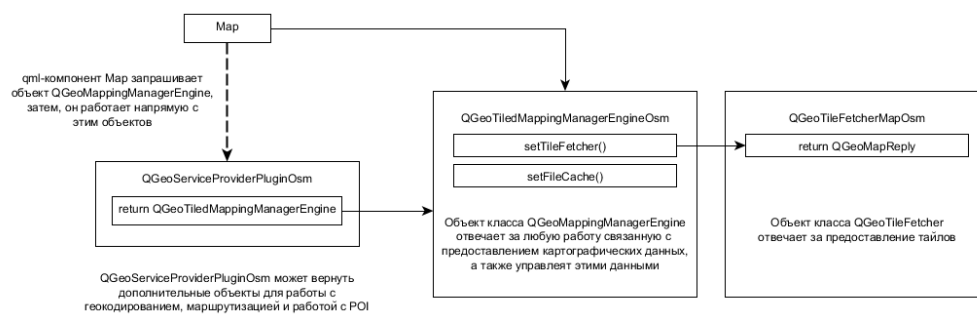


Рис. 2. Структурная схема модуля картографии

Разработанный модуль картографии, а также вспомогательный модуль рендеринга карт позволили создать приложение для поисково-спасательного отряда «Симуран», удовлетворяющее требованиям максимальной экономии батареи мобильных устройств и обладающее независимостью от сети «Интернет». Также модуль картографии может быть доработан для более специфичной работы поисково-спасательного отряда. В исходном виде данный модуль возможно использовать в других проектах, а также расширить его под их нужды.

## Литература

1. Шлее, М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++ / М. Шлее. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 1072 с. : ил.
2. About Qt / Qt Wiki. — Режим доступа: [https://wiki.qt.io/index.php?title=About\\_Qt&oldid=35446](https://wiki.qt.io/index.php?title=About_Qt&oldid=35446).
3. Рендеринг / Материал из Википедии – свободной энциклопедии : версия 107082569, сохраненная в 02:13 UTC 17 мая 2020 г. – Сан-Франциско : Фонд Викимедиа, 2020. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=107082569>.
4. Tiled rendering / Материал из Википедии. – Сан-Франциско : Фонд Викимедиа, 2020. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=107082569>.

УДК 551.508:556.51:504.75:621.317.39.084.2

**РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ ВЕРСИИ ПРИЛОЖЕНИЯ  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ  
ПРОЕКТА «THEOREMS-Dnipro»**

**А. В. Сахарук, Н. Г. Демиденко**

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

Проект «THEOREMS-Dnipro» (Трансграничная система гидрометеорологического и экологического мониторинга реки Днепр) выполняется в рамках программы территориального сотрудничества стран Восточного партнерства «Беларусь – Украина», которая финансируется Европейским союзом. Проект направлен на повышение эффективности управления трансграничными водными ресурсами реки Днепр.

Цели проекта включают:

1. Повышение эффективности системы мониторинга гидрометеорологических и экологических параметров трансграничных водных ресурсов бассейна реки Днепр.
2. Расширение сотрудничества между организациями Украины и Республики Беларусь, которые контролируют и делятся гидрометеорологической и экологической информацией о состоянии трансграничных водных ресурсов.
3. Повышение осведомленности общественности и понимания проблем международных водных ресурсов в трансграничных районах бассейна Днепра.

Данный проект предусматривает разработку и внедрение двух унифицированных автоматизированных станций гидрометеорологического / экологического мониторинга (AHMES – Automated HydroMeteorological / Ecological Station). Уникальность проекта заключается в том, что две новые станции комплексного мониторинга на территории Беларуси (г. Лоев) и Украины (г. Любеч) будут автоматизированными и энергетически автономными, а также получат возможность удаленного управления при помощи мобильного диспетчерского пульта, представляющего собой мобильное приложение на базе операционной системы Android.

Приложение имеет следующий функционал:

- 1) управление режимами работы всех станций проекта;
- 2) получение и отображение результатов измерений за заданный временной интервал;
- 3) построение графиков статистики по заданным параметрам;
- 4) мониторинг состояния питания;
- 5) отображение текущего местоположения каждой станции на карте;

- 6) получение данных из архива измерений;
- 7) управление режимами питания.

Взаимодействие с измерительными станциями проекта «THEOREMS-Dnipro» осуществляется при помощи клиент-серверной архитектуры. Клиент-серверное взаимодействие обеспечивает доступ к данным, хранящимся на измерительных станциях. В следующей схеме (рис. 1) приведена структура одной из измерительных станций.

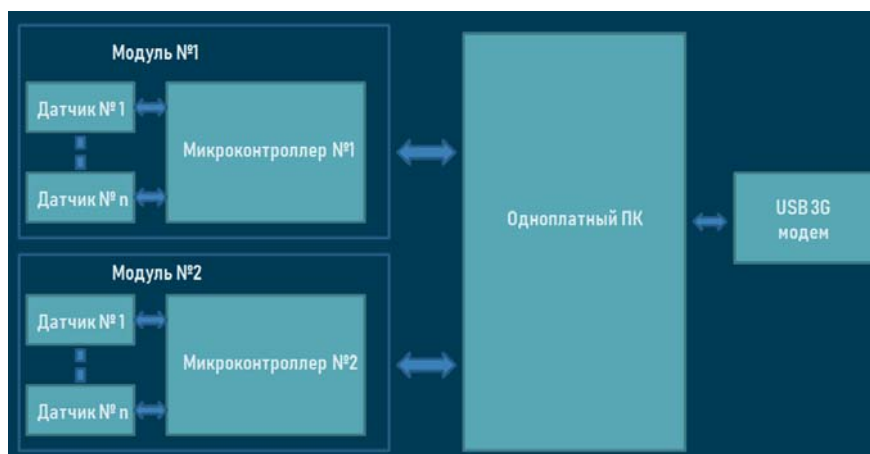


Рис. 1. Структурная схема измерительной станции AHMES

Источником связи измерительных станций является USB 3G модем, который позволяет принимать команды, поступающие с сервера, отправлять на сервер гидрометеорологические данные и диагностическую информацию. Сервер берет на себя всю нагрузку в обработке гидрометеорологических данных, уменьшая таким образом сетевой трафик. В противном случае затраты на использование памяти на устройствах пользователя вырастают и нуждаются в обработке при каждом обращении, сервер же обладает большей вычислительной мощностью, способен обрабатывать данные быстрее и отправляет пользователю готовые результаты запросов.

Связь с сервером осуществляется при помощи протокола TCP/IP. При подключении пользователю необходимо пройти авторизацию и, убедившись, что данные логина и пароля совпадают с таковыми на сервере, мобильное приложение создает внутреннюю базу данных в оперативной памяти устройства и выполняет синхронизацию с данными на сервере, по завершении которой пользователь может начать работу со станциями. Схема взаимодействия мобильного приложения может быть представлена в виде схемы (рис. 2).

Архитектура мобильного приложения построена на основе архитектурного шаблона MVC, предусматривающего разделение приложения на логически изолированные блоки. В качестве графического интерфейса выступает технология Qt Quick, элементы которой описываются на языке QML. Для хранения и работы больших массивов данных в проекте «THEOREMS-Dnipro» используется реляционная база данных MySQL. Мобильное приложение в качестве базы данных использует встроенную базу данных SQLite, которая находится в оперативной памяти приложения. После завершения процесса авторизации встроенная база данных синхронизируется с последними данными сервера. Преимуществом встроенной базы данных является готовый программный интерфейс работы с большим массивом гидрометеорологиче-

ских данных. Работа с базой данных и командами измерительных станций написана на C++. Взаимодействие между слоем графического интерфейса и слоем логики осуществляется благодаря мета-объектной системе фреймворка Qt [1]. Путем взаимодействия с элементами графического интерфейса логика интерфейса посылает сигналы, обработка которых происходит в части C++ кода и, наоборот, все изменения базы данных передаются в часть графического интерфейса. Мобильное приложение позволяет получать гидрометеорологическую и экологическую информацию, предоставляемую диспетчеру, в виде графиков. Имеется возможность отслеживания положения станций на карте.



Рис. 2. Структурная схема взаимодействия мобильного приложения со станциями AHMES

Разработка мобильной версии приложения проекта «THEOREMS-Dnipro» необходима для расширения вариативности устройств, с помощью которых возможно получение доступа к управлению гидрометеорологическими станциями. Имея в наличии мобильное устройство на базе ОС Android и интернет-соединение, можно оперативно получать различную информацию о состоянии реки Днепр. Особенно важно создание мобильного приложения для разработчиков – в случае возникновения внештатной ситуации приложение позволяет быстро получить отладочную информацию, местоположение станций на карте.



The project is co-funded  
by the European Union

#### Литература

1. Шлее, М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++ / М. Шлее. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 1072 с. : ил.

УДК 621.38

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗА СТИЛЕМ ВОЖДЕНИЯ  
И УСТАЛОСТЬЮ ВОДИТЕЛЯ****Д. А. Литвинов, А. В. Ковалев, В. А. Хананов, Е. И. Владимиров***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Современные автотранспортные средства, выпускаемые с завода, штатно комплектуются различными средствами безопасности, которые можно разделить на пассивные и активные. Пассивные средства смягчают урон, причиняемый водителю в случае аварии, и срабатывают после наступления дорожно-транспортного происшествия. Активные средства, напротив, вступают в действие заранее и пытаются предотвратить или избежать столкновения. Примером пассивных средств являются ремни безопасности, подушки, а активных – антиблокировочная система, система курсовой устойчивости, система контроля рядности движения и т. д. [2]–[4].

Безопасность дорожного движения определяется не только дорожными условиями, техническим состоянием транспортных средств и соблюдением правил дорожного движения, но также навыками, физическим состоянием, способностью концентрироваться и соблюдением мер безопасности водителями.

Согласно исследованию организации Foundation for Traffic Safety [1], посвященному анализу поведения водителя при вождении в полусонном состоянии, недлительный сон в два раза увеличивает риск аварии по сравнению с теми, кто спал рекомендуемые семь и больше часов. Вероятность попадания в ДТП водителей, у которых сон длится менее четырех часов, увеличивается в 11,5 раза; от четырех до пяти часов – в 4,3 раза; от пяти до шести часов – в 1,9 раза; от шести до семи часов – в 1,3 раза. Исследование показало, что недостаток сна приводит к замедлению скорости реакции, а состояние сонливости может быть настолько же опасно, как и состояние алкогольного опьянения – замедленная реакция и снижение концентрации внимания.

В качестве решения данной проблемы предлагается использовать активные системы безопасности, направленные на предотвращение аварийных ситуаций на основе мониторинга состояния и (или) поведения водителя и своевременного оповещения о текущей ситуации контекстно-ориентированными рекомендациями и сигналами. Целью работы является разработка электронной системы слежения за стилем вождения и состоянием водителя, а также алгоритмов предупреждения аварийных ситуаций.

Для слежения за стилем вождения необходимо контролировать следующие параметры: скорость автомобиля, обороты двигателя, резкие торможения (ускорения). Контроль за усталостью предлагается осуществлять по видеокамере, ориентированной на лицо водителя. Структурная схема электронной системы слежения за водителем представлена на рис. 1.

Электронный модуль выполнен на основе современного микроконтроллера 32-разрядного MIMXRT1052. Это новое семейство процессоров, в котором реализована усовершенствованная реализация NXP ядра ARM Cortex-M7, hf.jnf.otuj на частотах до 528 МГц, обеспечивая высокую производительность процессора и лучшую реакцию в реальном времени.

Текущая скорость и обороты двигателя снимаются с бортовой CAN-сети транспортного средства. Контроль за резкими изменениями скорости осуществляется с помощью двухосевого MEMS-акселерометра. Перегрузки, вызываемые резким ускорением (торможением), обычно находятся в диапазоне:  $\pm 1,5$ –3 g. Собранные данные

анализируются микроконтроллером, на основе чего водителю формируются предупреждающие звуковые сообщения. Также данные записываются на SD/MMC карту памяти для последующего дополнительного анализа с целью выявления поведенческих шаблонов водителей и контроля за эксплуатацией транспортного средства.



Рис. 1. Структурная схема электронной системы слежения за водителем:  
МК – микроконтроллер

Для слежения за усталостью водителя в устройстве используется цветная цифровая камера OV2710 с CSI-интерфейсом. Выбранная камера является FullHD CMOS-сенсором, который разрабатывался для получения видео высокой четкости с видеорегистраторов, веб-камер и других компактных видеозаписывающих устройств в разрешении  $1920 \times 1080$  при 30 fps. Камера обладает высокой чувствительностью в темное время суток и обеспечивает минимальное количество шумов.

Для оценивания текущего состояния водителя система распознает лицо человека и отслеживает частоту и продолжительность закрытия глаз. Алгоритм работы программы основан на слежении за ключевыми лицевыми ориентирами. Для его реализации были использованы библиотеки алгоритмов обработки изображений и компьютерного зрения – OpenCV и Dlib. Система на кадрах изображений, поступающих от видеокamеры, распознает глаза человека и отслеживает частоту и продолжительность их закрытия, для того чтобы понять, глаза человека закрываются от усталости или же человек просто моргает. Для решения данной задачи используется метод создания лицевых ориентиров, называемых landmarks, с их последующим анализом. Алгоритм фиксирует ключевые точки лица и их координаты (рис. 2).

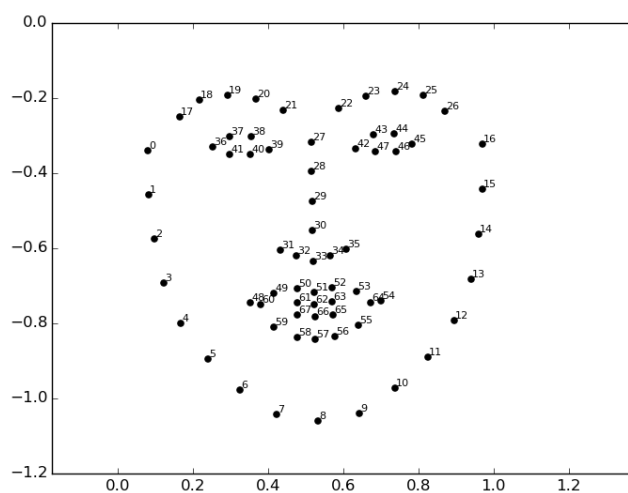


Рис. 2. Пример отображения лицевых ориентиров

Так как система контроля за состоянием водителя основана на идентификации глаз, то нас интересуют лицевые ориентиры под номерами 36–41 и 42–47. Закрыт глаз или открыт, определяется с помощью расстояния между точками 37 : 41, 38 : 40 и 43 : 47, 44 : 46. На рис. 3 представлен результат работы алгоритма.

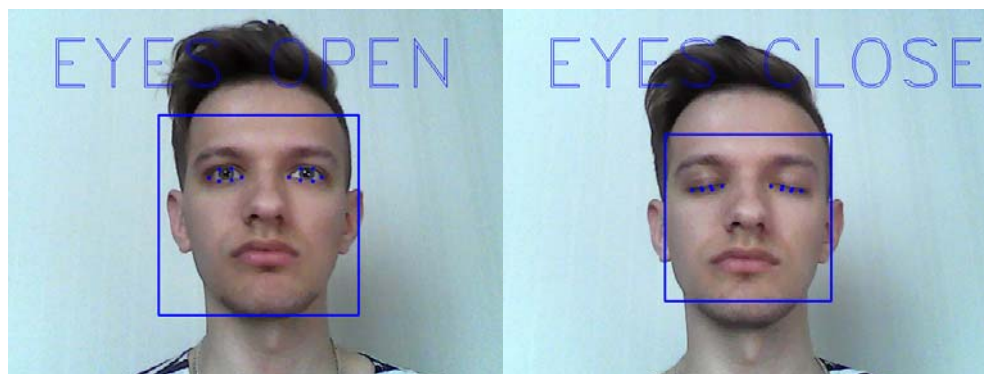


Рис. 3. Пример работы разработанного алгоритма слежения за глазами

Если глаза закрыты более 1 с (настраиваемое значение), водителю формируются предупреждающие звуковые сообщения.

Разработанная электронная система ориентирована на использование в различных транспортных средствах с целью контроля в реальном времени за стилем вождения и генерации контекстно-ориентированных рекомендаций. Устройство может быть полезным для компаний, сдающих транспортные средства внаем, с целью выявления агрессивных или неприемлемых условий эксплуатации. Дополнительная система слежения за усталостью водителя позволит повысить безопасность эксплуатации транспортных средств.

#### Литература

1. Brian, C. Teff, Acute Sleep Deprivation and Risk of Motor Vehicle Crash Involvement / C. Brian // Report, Washington, DC 20005, AAAFoundation.org. – 2016. – December. – 21 p.
2. Безопасность автотранспортных средств : учеб. для вузов / под общ. ред. В. В. Ломакина. – М. : МГТУ «МАМИ», 2011. – 299 с.
3. Влияние элементов системы «водитель – автомобиль – дорога – среда» на безопасность дорожного движения : учеб. пособие / И. С. Степанов [и др.]. – М. : МГТУ «МАМИ», 2011. – 171 с.
4. Кисуленко, Б. В. Интеллектуальные системы безопасности автомобилей / Б. В. Кисуленко, А. В. Бочаров // Автомобил. пром-ть. – 2008. – № 3. – С. 16–18.

УДК 621.38

### СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Ю. А. Козусев, Ю. Е. Котова, О. М. Ростокина

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

При измерении  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -параметров и различных физических величин емкостными или индуктивными датчиками используют метод их определения с помощью постоянной времени экспоненциального переходного процесса.

Для повышения точности измерения постоянной времени переходного процесса применяется способ, основанный на подаче на исследуемый объект скачка постоянного напряжения и последующем интегрировании разности выходного напряжения исследуемого объекта и опорного напряжения. Выходной сигнал измерительного устройства пропорционален интервалу времени от начала переходного процесса до момента равенства нулю интеграла разности.

На рис. 1 представлены временные диаграммы сигналов, поясняющие способ измерения.

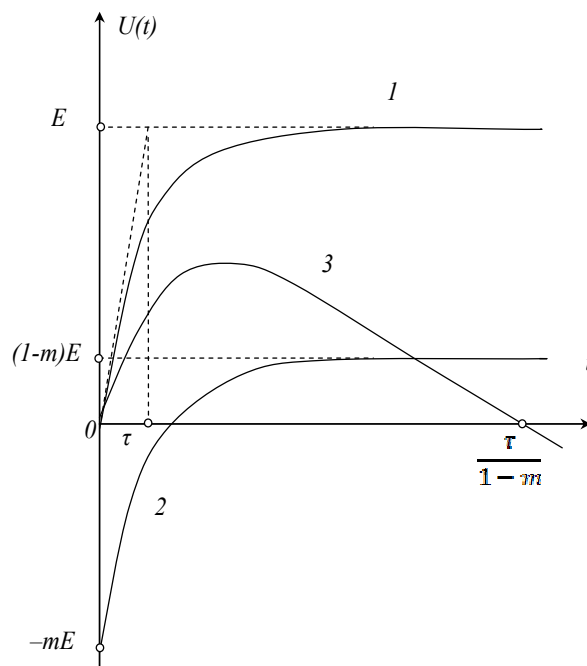


Рис. 1. Временные диаграммы сигналов, поясняющие способ измерения:  
1 – исследуемый переходный процесс; 2 – разность напряжения переходного процесса и опорного напряжения; 3 – результат интегрирования разности напряжения переходного процесса и опорного напряжения

После подачи на вход исследуемого объекта с выхода источника скачка постоянного напряжения  $E$  на выходе объекта формируется напряжение переходного процесса (график 1):

$$U(t) = E(1 - e^{-t/\tau}),$$

где  $\tau$  – измеряемый параметр, постоянная времени.

Одновременно на выходе масштабирующего устройства формируется постоянное опорное напряжение:

$$U_{\text{оп}} = mE,$$

где  $m$  – коэффициент масштабирования.

Интегрированию подлежит разность (график 2):

$$\Delta U(t) = E(1 - e^{-t/\tau}) - mE = E(1 - m - e^{-t/\tau}).$$



Результат интегрирования сигнала  $\Delta U(t)$  имеет вид

$$U_{\text{инт}}(t) = -\frac{E}{T} \int_0^t (1 - m - e^{-t/\tau}) dt = -\frac{E}{T} [t(1 - m) + \tau(e^{-t/\tau} - 1)].$$

Решение уравнения  $U_{\text{инт}}(T_0) = 0$  при условии  $t = T_0 \gg \tau$  имеет следующий вид:

$$T_0 = \frac{\tau}{1 - m}.$$

Момент  $T_0$  равенства нулю интеграла (4) показан на графике 3.

Разработанный метод измерения предполагает значения коэффициента  $m < 1$ . На рис. 1 приведены графики для значения  $m = 0,9$ . Для значений  $0,8 \leq m < 1$  методическая погрешность измерения не превышает значения

$$e^{-T_0/\tau} = e^{-5} < 0,01.$$

Результат измерения имеет размерность времени, пропорционален измеряемой величине  $\tau$  и не зависит от величины опорного напряжения  $E$  и постоянной интегрирования  $T$ .

Разработанный способ позволяет повысить помехозащищенность измерителя за счет операции интегрирования и исключить инструментальные погрешности основных функциональных блоков, реализующих требуемые математические операции.

Также не требуется операция выделения свободной составляющей переходного процесса.

Предлагаемый способ обладает повышенной точностью и помехозащищенностью по сравнению с известными способами и устройствами.

#### Литература

1. Способ определения параметров многоэлементных двухполюсных цепей : пат. 2210081 Рос. Федерация, МПК С 1 G 01 R 27/02 / Н. Н. Хрисанов, Д. Б. Фролагин ; заявитель Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования Самар. техн. ун-т. – № 2009117011/28 ; заяв. 12.07.01 ; опубл. 10.08.2003.
2. Способ определения параметров многоэлементных двухполюсных цепей : пат. 2310872 Рос. Федерация, МПК С 2 G 01 R 27/26 / Н. Н. Хрисанов ; заявитель Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования Самар. техн. ун-т. – № 2005128367/28 ; заяв. 09.12.05 ; опубл. 20.11.2007.

УДК 621.314

### ЭЛЕКТРОННАЯ БОРТОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ВИБРАЦИОННЫХ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ

А. В. Ковалев, Д. А. Литвинов, В. А. Хананов

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

Для создания качественного и ресурсного дорожного покрытия наряду с используемыми материалами и технологиями его создания большую роль играет основа, на которой создается участок дороги, и степень ее уплотнения.

Проведенные ведущими учеными-дорожниками исследования в этой области свидетельствуют о следующем:

– увеличение плотности в целом способствует повышению прочности и снижению степени деформации грунта до определенного предела, соответствующего данной влажности, однако при некоторых условиях попытки получить большую плотность могут привести к эффекту переуплотнения, связанному с изменением агрегатного состава грунта;

– асимптотический характер той или иной зависимости может отражать достаточно малый эффект от дополнительного уплотнения в зоне, где плотность грунта приближается к фактически предельно достижимой [1].

Отсюда следует однозначный вывод: существует диапазон степени уплотнения грунта, при достижении которого работу дорожных строителей можно считать эффективной. При коэффициенте уплотнения ниже требуемого необходимые механические и водно-физические характеристики не будут достигнуты, а чрезмерное уплотнение грунта ведет к финансовым потерям (рабочее время, топливо) и может привести к снижению прочности из-за эффекта переуплотнения.

При выполнении дорожных работ и строительстве дорог возможны два варианта контроля степени уплотнения грунта и покрытия: контроль инструментальный с приостановкой технологического процесса или контроль параметров средствами технологического оборудования, которое выполняет уплотнение или укладку покрытия.

К инструментальным средствам можно отнести оборудование, контролирующее прочность, плотность, влажность и толщину покрытия. Эти виды контроля осуществляются различными методами, такими, как механический, диэлектрический (электромагнитный) и радиоизотопный. В большинстве своем все отмеченные методы имеют свои недостатки, обусловленные длительным временем получения результата или необходимостью адаптации и тарировки к свойствам уплотняемого материала [2]–[4].

Современные производители технологического оборудования для создания дорог внедряют средства непрерывного контроля степени уплотнения основания или дорожного покрытия в составе своей техники, которые в процессе укладки или трамбовки дают их операторам информацию о проделанной работе. Это позволяет сократить количество проходов технологического оборудования по участку дорожного полотна, обеспечив при этом требуемые для него параметры. Одним из видов такого оборудования является дорожный вибрационный каток, который одновременно с планировкой поверхности осуществляет уплотнение покрытия и основы посредством вибрации.

В докладе предложен вариант электронной бортовой системы контроля уплотнения основы (ЭБСКУО) дорожного полотна для вибрационного дорожного катка.

Асфальтобетонное покрытие получают в результате укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси. Чаще всего это горячие асфальтобетонные смеси с температурой уплотнения 140–80 °С. Нарастание прочности происходит не только за счет повышения плотности, но и по мере остывания смеси. К концу процесса уплотнения (при температуре 80–70 °С) прочность слоя такова, что он трудно поддается уплотнению даже тяжелыми катками. С учетом того, что остывание смеси происходит со скоростью 1° в минуту, времени, отведенного на формирование необходимой плотности дорожного покрытия (в соответствии с требованиями СНиП), остается очень

мало. За это время необходимо осуществлять операционный контроль плотности покрытия и совершить катками требуемое количество проходов.

Очевидно, что для обеспечения требуемого коэффициента уплотнения следует динамически отслеживать плотность покрытия и в зависимости от полученного результата корректировать уплотняющее воздействие. В качестве метода определения плотности был выбран ударный метод. Тарирование выходного сигнала предполагается осуществлять с помощью бортовой системы контроля, в которой тип покрытия будет задаваться оператором. Поправочный коэффициент, соответствующий заданному типу покрытия, будет храниться в постоянной памяти бортовой системы.

Метод основывается на следующем принципе: сопротивление удару пропорционально степени уплотнения грунта. Для преобразования сигналов (датчика ускорений) в значение степени уплотнения необходим измерительный преобразователь, на выходе которого присутствует сигнал о степени уплотнения и частоте вибраций. Достоинством такого метода является низкая стоимость основанных на нем датчиков. Дополнительно в ЭБСКУО введен канал измерения температуры дорожного полотна, чтобы контролировать соблюдение технологической карты создания дорожного полотна.

Структурная схема ЭБСКУО приведена на рис. 1. Она функционально состоит из двух основных модулей: первичных преобразователей, которые преобразуют степень уплотнения грунта, частоту вибрации, скорость движения шасси и температуру дорожного покрытия в аналоговые выходные сигнал и модуля информирования для оператора катка, находящегося в кабине.

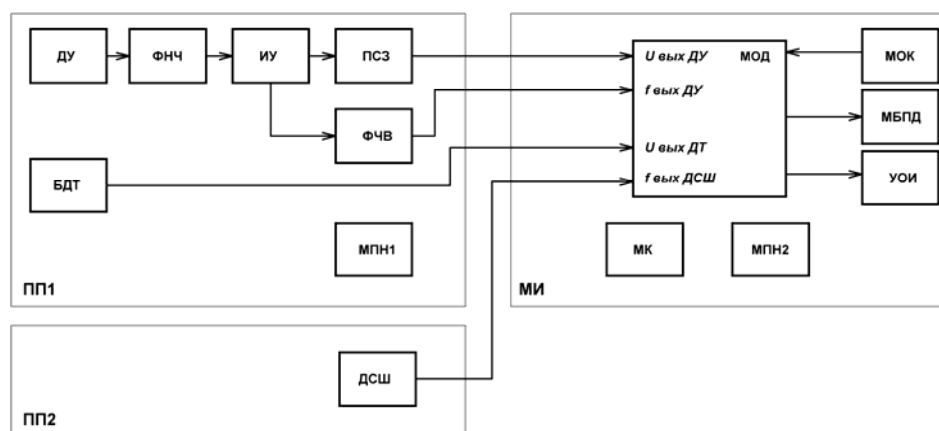


Рис. 1. Структурная схема ЭБСКУО

Первичный преобразователь ПП1 монтируется на основании вальца катка и состоит из следующих блоков:

- ДУ – датчик ускорения, предназначенный для преобразования ускорения виброперемещения в электрический сигнал;
- ФНЧ – фильтр нижних частот, необходимый для выделения полезной частоты вибраций;
- ИУ – избирательный усилитель переменного напряжения, предназначенный для усиления сигнала с датчика ускорения;

– ПСЗ – преобразователь среднего значения, предназначенный для преобразования амплитуды выходного напряжения усилителя переменного напряжения в постоянное напряжение;

– ФЧВ – формирователь частоты вибраций, формирующий прямоугольные импульсы, частота которых пропорциональна частоте вибрации катка;

– БДТ – бесконтактный датчик температуры дорожного полотна;

– МПН1 – формирователь питающих напряжений, необходимый для выработки напряжений, питающих микросхемы датчика.

Первичный преобразователь ПП2 (датчик скорости шасси (ДСШ)) монтируется на приводе вальца катка и преобразует частоту вращения в информацию о движении шасси.

Модуль информирования (МИ), расположенный в кабине, включает следующие блоки:

– МК – модуль клавиатуры, предназначенный для управления МИ и ввода поправочных коэффициентов в систему;

– МОК – модуль определения координат шасси;

– МОД – модуль обработки и вывода скорректированных данных с первичных преобразователей;

– МБПД – модуль беспроводной передачи данных, предназначенный для удаленного мониторинга режимов работы технологического оборудования катка;

– УОИ – устройство отображения информации, выполненное в виде дисплея, на котором в зависимости от выбранного режима работы отображается требуемая информация для оператора и сообщения;

– МПН2 – формирователь питающих напряжений, необходим для выработки напряжений, питающих модули МИ.

Применять ЭБСКУО возможно практически на всех видах дорожных вибрационных катков, однако производитель дорожной техники должен предоставить данные о частоте создаваемой вибрации вальцом (20–50 Гц) и согласовать конструкцию первичного преобразователя и способ его установки. Тарировка системы необходима для каждого вида дорожного полотна с использованием стандартных способов измерения плотности инструментальными методами.

При возвратно-поступательном движении катка по одному и тому же участку дорожного полотна по мере уплотнения основы увеличивается плотность, и система индицирует в относительных единицах величину уплотнения. Как только степень уплотнения перестанет существенно давать прирост при очередном проходе катка по участку, оператору дается сообщение о нецелесообразности дальнейшего уплотнения. Остановка уплотнения на данном этапе позволит избежать повреждений конструкций под землей и разрушения вновь созданного покрытия.

#### Литература

1. Казарновский, В. Д. Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог / В. Д. Казарновский. – М., 2002. – 53 с.
2. Инструкция по определению требуемой плотности и контролю за уплотнением земляного полотна автомобильных дорог. – М., 1969.
3. Шестопапов, А. А. Операционный экспресс-контроль качества дорожных покрытий / А. А. Шестопапов // Стройпрофиль. – 2007. – № 7.
4. Радовский, Б. С. Методы и приборы контроля качества строительства дорожных покрытий в США / Б. С. Радовский // Стройка. Дорожная техника. – 2006. – № 1.

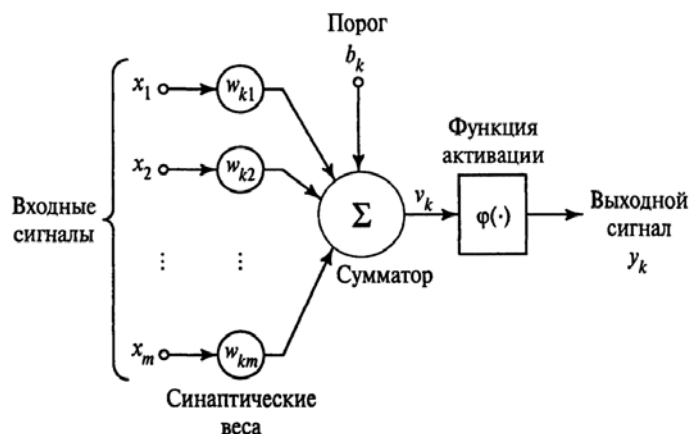
УДК 004.32.26

**АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИСКУССТВЕННОЙ  
НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА FPGA ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ  
НАПИСАННЫХ ОТ РУКИ ЦИФР****Ю. В. Крышнев, В. И. Соболев***Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

В настоящее время в различных областях науки и техники широко применяются методы интеллектуального анализа данных. Постоянно расширяется круг задач, требующих использования методов искусственного интеллекта в области обработки изображений: распознавание лиц, объектов различной физической природы; обработка информации с внешних датчиков в беспилотных транспортных средствах; анализ аэрокосмических снимков; медицинская диагностика и т. д. Перспективным инструментом для решения задачи распознавания образов является применение интеллектуальных методов на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). При создании мобильных систем компьютерного зрения (СКЗ) применяются аппаратно-реализованные нейронные сети.

Благодаря принципу своей организации, программируемые пользователем вентильные матрицы (FPGA) позволяют создавать различные простейшие логические аппаратные модули и связывать их в более сложные системы. Таким образом, FPGA дает возможность на своей основе разработать аппаратную реализацию нейронов и объединить их в сеть [1]. Структура в нужном количестве обеспечивает параллельные вычисления в ИНС, что не всегда возможно в программной реализации из-за псевдо-параллельных вычислений. Также отладочные платы с FPGA имеют хорошо развитую периферию, в том числе различные стандартные интерфейсы соединения с компьютером, чтобы провести отладку ИНС и при необходимости сделать подключаемый к компьютеру модуль. В этой связи для аппаратной реализации ИНС в составе СКЗ все чаще применяют современные FPGA [2].

На рис. 1 изображена структура нейрона. В общем виде нейрон представляет собой сумматоры, которые суммируют входные сигналы, умноженные на весовые коэффициенты. К сумме добавляется порог, а результат проходит через блок функции активации, после чего и формируется выходной сигнал нейрона.

*Рис. 1. Структура нейрона*

Синапсы, входящие в нейрон, имеют весовой коэффициент. Данный параметр показывает, насколько данная связь важна для нейрона, а изменения ее значения способствуют возможности обучения ИНС. Весовые коэффициенты нейронной сети формируют память нейронной сети и являются основным элементом, регулирующим работу сети [3].

Для извлечения ключевых признаков весовые коэффициенты настраиваются с использованием обучающей выборки. С учетом задачи распознавания рукописных цифр хорошо подходит база изображений рукописных цифр MNIST. Она содержит 60000 обучающих и 10000 тестовых пар (изображение – метка). Обучить нейросеть задаче распознавания цифр – значит найти корректные значения для всех этих чисел так, чтобы это решило поставленную задачу. Изображения нормализованы по размеру и отцентрированы. Размер каждой цифры –  $28 \times 28$  пикселей.

Что касается реализации структуры входных (выходных) портов на языке VHDL/Verilog, стоит отметить, что есть два возможных варианта: использовать дополнительные входы реализуемой схемы для весовых коэффициентов, либо применить для этой цели отдельную RAM. Выход схемы в обоих случаях – один.

Описанные 784 нейрона образуют первый слой ИНС. Нейросеть будет получать на вход двоичные регистры и выполнять их классификацию на 10 типов, каждый из которых соответствует одной из десяти цифр. В этих числах активация – это число от нуля до единицы, отражающее, насколько система уверена, что входное изображение содержит соответствующую цифру.

Соединение между другими слоями также содержит веса и сдвиги, связанные с ними. Таким образом, в качестве настраиваемых параметров выступают 13002 весов и сдвигов ( $784 \cdot 16 + 16 \cdot 16 + 16 \cdot 10$  и  $16 + 16 + 10$ ), определяющих поведение нейронной сети. В результате структура нейронной сети выглядит, как на рис. 2.

Нейроны объединяются в слои, которые, в свою очередь, – в сеть. Данная структура реализуема в FPGA, а тот факт, что параллельная организация нейронной сети изначально заложена в ее аппаратной реализации, позволяет существенно увеличить скорость ее работы по сравнению с программными аналогами, так как в зависимости от аппаратных возможностей FPGA возможно добиться полной или практически полной параллелизации работы нейронов [4]. Также к основным достоинствам аппаратной реализации ИНС можно отнести надежность, безопасность и дополнительные режимы эксплуатации.

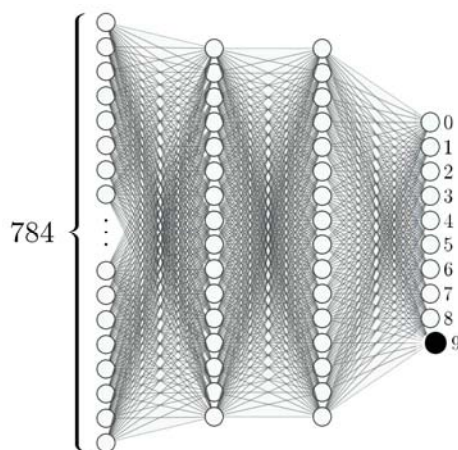


Рис. 2. Структура искусственной нейронной сети

Исходя из полученных результатов, можно считать, что предложенный метод организации вычислений в аппаратной ИНС позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы FPGA. Учитывая масштабируемость унифицированных вычислительных блоков, метод может быть перспективен при организации вычислений в аппаратно-реализованных ИНС более сложной архитектуры.

#### Литература

1. Optimizing fpga-based accelerator design for deep convolutional neural networks / C. Zhang [et al.] // Proceedings of the 2015 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. – ACM, 2015. – P. 161–170. – DOI: 10.1145/2684746.2689060.
2. Устройство на основе ПЛИС для распознавания рукописных цифр на изображениях / И. В. Зоев [и др.] // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 938–949. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-938-949.
3. Muthuramalingam, A. Neural Network Implementation Using FPGA: Issues and Application / A. Muthuramalingam, S. Himavathi, E. Srinivasan // International Journal of Information and Communication Engineering 4:6. – 2008.
4. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / под ред. В. П. Боровикова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 392 с. : ил.

УДК 621.38

### МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ДАТЧИК УРОВНЯ

Д. А. Литвинов, А. В. Ковалев, В. А. Хананов

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

Отличительной особенностью емкостных датчиков технологических величин являются простота и технологичность изготовления, из этого следует их низкая конечная стоимость и высокая надежность. На рис. 1, *a* схематически изображен многоэлектродный емкостной датчик уровня диэлектрической жидкости. Измерительный конденсатор  $C_{и}$  состоит из генераторного электрода 1 и измерительного электрода 3. Начальная емкость измерительного конденсатора зависит, в первую очередь, от конструкции электродов емкостного датчика, но еще на нее влияют внешние возмущающие факторы, такие, как температура и влажность. На точность измерения уровня также влияет неизвестное значение диэлектрической проницаемости измеряемой жидкости. Для учета влияния этих факторов в емкостном датчике установлены опорные электроды 2 и 4, которые совместно с генераторным электродом 1 образуют опорные конденсаторы  $C_{оп1}$  и  $C_{оп2}$  соответственно. Все электроды подключаются к измерительному преобразователю с помощью соединительных проводов (на рис. 1 не указаны).

Выразим емкость измерительного электрода, заполненного жидкостью, через емкость опорного конденсатора:

$$C_{и} = C_{оп2} m, \quad (1)$$

где  $m$  – безразмерная величина, учитывающая отношение длин измерительного и опорного электродов.

Тогда при равенстве геометрических размеров верхнего и нижнего опорных конденсаторов емкость измерительного электрода, частично заполненного жидкостью на величину  $h$ , составит:

$$C_{\text{И}} = C_{\text{ОП2}}h + C_{\text{ОП1}}(m - h). \quad (2)$$

Из выражения (2) можно выразить уровень жидкости:

$$h = \frac{C_{\text{И}} - C_{\text{ОП1}}m}{C_{\text{ОП2}} - C_{\text{ОП1}}}. \quad (3)$$

Измерительный преобразователь построен на схеме зарядового усилителя. Ее достоинствами являются отсутствие необходимости в источнике переменного напряжения, простота согласования с микроконтроллером, высокая точность.

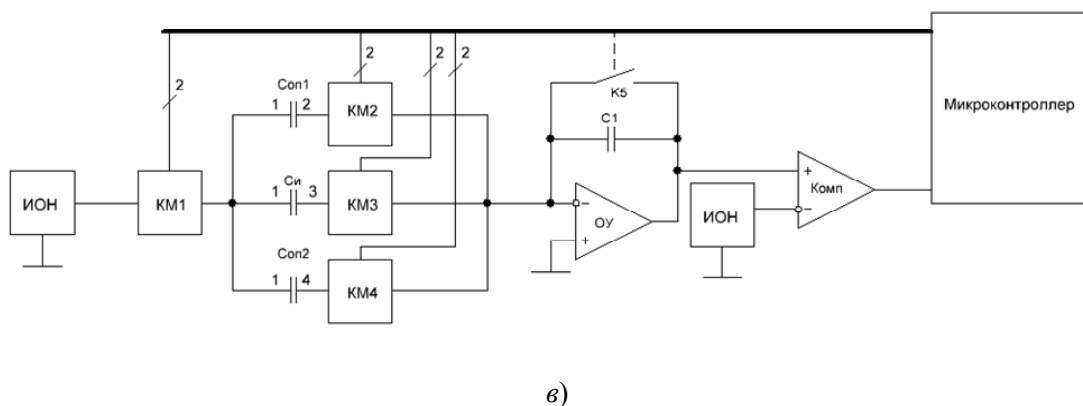
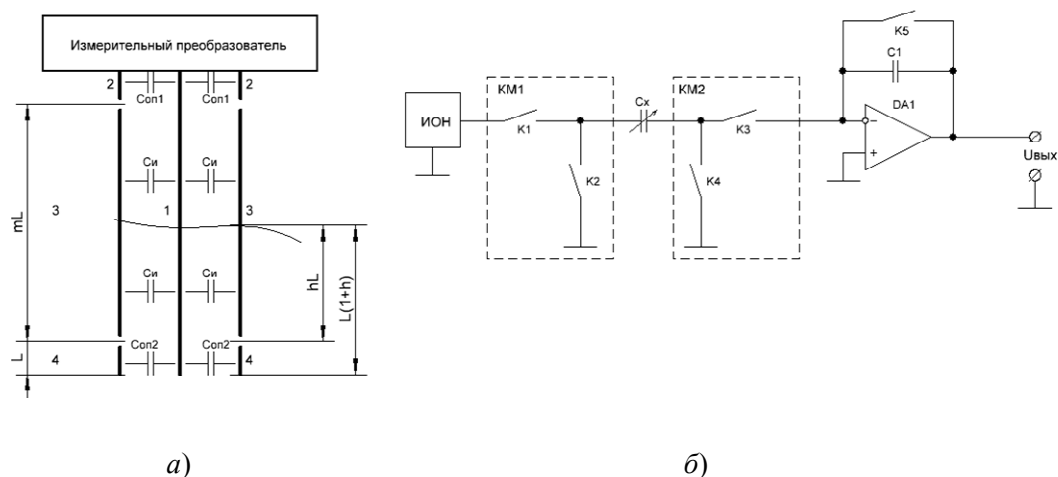


Рис. 1. Многоэлектродный емкостной датчик уровня:  
 а – схематическое изображение расположения электродов;  
 б – пояснение принципа действия измерительного преобразователя;  
 в – функциональная схема устройства

Сущность зарядного метода заключается в заряде чувствительного элемента до известного опорного напряжения (замыканием ключей  $K1$  и  $K3$ ) с последующим его разрядом через измерительную схему (замыканием ключей  $K2$  и  $K4$ ).



Структурная схема такого преобразователя представлена на рис. 1, б, где использованы следующие обозначения: ИОН – источник опорного напряжения;  $C_x$  – межэлектродная емкость;  $C_1$  – опорная емкость; К1–К5 – полупроводниковые ключи, которые соединяются в коммутационные модули КМ1 и КМ2.

Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  определяется по формуле [1]:

$$U_{\text{вых}} = N \frac{U_{\text{ИОН}} C_x}{C_1 (1 - e^{\frac{-t}{R_{\text{кл}} C_{\text{оп}}})}}, \quad (4)$$

где  $t$  – период переключений;  $R_{\text{кл}}$  – сопротивление открытого ключа;  $N$  – количество переключений ключей К1–К4 перед сбросом (замыканием ключа К5).

Преимуществом этой схемы является дифференциальное включение датчика, что приводит к нечувствительности преобразователя к паразитным емкостям ключей. Достигается это потому, что одна обкладка подключена к низкоомному входу источника постоянного напряжения, а вторая – к входу операционного усилителя (ОУ), который находится под напряжением, близким к нулю. Таким образом, все паразитные емкости, подключенные к обкладкам конденсаторного датчика, постоянно находятся под нулевым потенциалом и не оказывают влияния на выходное напряжение.

При частоте переключения ключей значительно ниже, чем постоянная времени  $R_{\text{кл}} C_1$ , экспоненциальным членом выражения (4) можно пренебречь [2]. Для ввода результата измерения в микроконтроллер можно применить АЦП.

На рис. 1, в представлена структурная схема емкостного датчика, для которого не требуется АЦП. Микроконтроллер будет подавать тактовые импульсы на каждую пару коммутационных модулей до тех пор, пока выходное напряжение преобразователя емкость напряжения не вызовет срабатывание компаратора, подключенного к МК. Количество тактовых импульсов зависит от неизвестной емкости следующим образом:

$$N = \frac{U_{\text{вых}} C_1}{U_{\text{ИОН}} C_x}. \quad (5)$$

Измерение емкости конденсаторов выполняется последовательно во времени – сначала к ОУ с помощью КМ2 коммутируется электрод 2 датчика – проводится измерение верхнего опорного конденсатора. В это время на незадействованные электроды 3 и 4 подается напряжения нуля, следовательно, эти емкости не влияют на результат измерения, также это снижает влияние внешних помех и краевых эффектов. Аналогично измеряются емкости оставшихся конденсаторов. После измерения значений емкостей всех конденсаторов датчика микроконтроллер вычисляет текущий уровень по формуле (3).

Следует обратить внимание, что нижний электрод должен быть заполнен жидкостью полностью. В случае, если опорный электрод заполнен частично (это в равной степени относится и к частичному заполнению верхнего электрода), предполагается, что микроконтроллер определит – измерительный электрод полностью сухой, и уровень жидкости (заполнение нижнего опорного конденсатора) будет рассчитываться относительно ожидаемого  $\varepsilon_{\text{оп2}}$ , установленного при настройке датчика во время его установки. Безусловно, на этом участке точность будет снижена.

Таким образом, сделаем вывод о том, что с помощью усложнения алгоритма проведения измерений удалось сконструировать универсальный датчик уровня жидкости с автоматической коррекцией внешних возмущающих факторов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Мулявка, Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами : пер. с пол. / Я. Мулявка. – М. : Мир, 1992. – 416 с.
2. Baxter, Larry K. Capacitive Sensors: Design and Applications / K. Larry Baxter. – IEEE Pres, 1997.

УДК 621.391

### ВЛИЯНИЕ РАЗРЯДНОСТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА УРОВЕНЬ ПОМЕХОПОДАВЛЕНИЯ В ПРИЕМНОМ ТРАКТЕ ПОИСКОВОГО УСТРОЙСТВА

В. В. Щуплов, С. Н. Кухаренко, Н. А. Красовская

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

При выполнении ремонтных работ на нефтепроводе запускается поисковое устройство, обнаружение и связь с которым осуществляется по низкочастотному радиоканалу.

При наличии сильного помехового мешающего сигнала, спектр которого перекрывается спектром полезного сигнала, уменьшить его влияние только простой фильтрацией не удастся. Для этого необходимо использовать компенсатор помех, который предполагает наличие второго приемного канала (приемной антенны).

Сигнал на выходе такого компенсатора описывается выражением [1]:

$$y_2 = u_2 \cos(\varphi_N) - u_1 \sin(\varphi_N), \quad (1)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – дискретные сигналы на входах компенсатора;  $\varphi_N$  – угол вращения координатной системы сигналов в пространстве сигналов.

Если  $\cos(\varphi_N)$  и  $\sin(\varphi_N)$  вычисляются с некоторыми ошибками  $\Delta_C$  и  $\Delta_S$ , вызванными квантованием, то выражение для  $y_2$  переписывается в виде

$$y_{2K} = u_2 \cos(\varphi_N) - u_1 \sin(\varphi_N) + (u_2 \Delta_C - u_1 \Delta_S). \quad (2)$$

Можно показать, что при помехе  $a_{\Pi} \geq 20$  дБ:

$$\sin(\varphi_N) \approx S_N^I = \frac{\sum_{i=1}^N k_i \sin(\beta_i)}{\sum_{i=1}^N k_i}; \quad \cos(\varphi_N) \approx C_N^I = \frac{\sum_{i=1}^N k_i \cos(\beta_i)}{\sum_{i=1}^N k_i}, \quad (3)$$

где  $k_i$  – амплитудный коэффициент;  $\beta_i$  – оценка угла в  $i$ -м отсчете; вычисляются через напряжения входных сигналов и разность фаз между ними.

Если принять, что шаг квантования угла  $\beta_i$  равен  $2\varepsilon$ , разлагая  $\sin(\beta_i + \varepsilon_i)$  и  $\cos(\beta_i + \varepsilon_i)$  в ряд и оставляя только два первых члена разложения, получим:

$$\sin(\beta_i + \varepsilon_i) = \sin(\beta_i) - \varepsilon_i \cos(\varepsilon_i); \quad \cos(\beta_i + \varepsilon_i) = \cos(\beta_i) - \varepsilon_i \sin(\varepsilon_i). \quad (4)$$

С учетом этого можно записать:

$$\Delta_S = -\frac{\sum_{i=1}^N k_i \varepsilon_i \cos(\beta_i)}{\sum_{i=1}^N k_i}; \quad \Delta_C = \frac{\sum_{i=1}^N k_i \varepsilon_i \sin(\beta_i)}{\sum_{i=1}^N k_i}. \quad (5)$$

Примем, что все  $\varepsilon_i$  равны между собой и равны среднеквадратической ошибке.

С учетом этого

$$\Delta_S = \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{3}} \cos(\varphi_N); \quad \Delta_C = \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{3}} \sin(\varphi_N). \quad (6)$$

И тогда для сигнала на выходе компенсатора можно записать:

$$y_{2K} = u_2 \cos(\varphi_N) - u_1 \sin(\varphi_N) + \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{3}} (u_2 \sin(\varphi_N) - u_1 \cos(\varphi_N)).$$

В случае одного источника помех мощность шума на выходе компенсатора равна:

$$\langle y_{2K}^2 \rangle = \sigma_{\text{ш}}^2 + \frac{\varepsilon^2}{3} (\sigma_{\text{п}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2). \quad (7)$$

Таким образом, квантование угла приводит к остаточной помеховой составляющей.

Рассмотрим влияние на коэффициент подавления помехи  $K_{\text{п}}$  шага квантования  $2\varepsilon$  угла. В этом случае

$$K_{\text{п}} = \frac{\frac{\sigma_{\text{п}}^2}{2} + \sigma_{\text{ш}}^2}{\langle y_{2K}^2 \rangle} = \frac{\frac{a_{\text{п}}^2}{2} + 1}{1 + \frac{\varepsilon^2}{3} (a_{\text{п}}^2 + 1)},$$

где  $a_{\text{п}}^2 = \frac{\sigma_{\text{п}}^2}{\sigma_{\text{ш}}^2}$ .

Тогда

$$K_{\text{п}} = \frac{K_{\text{пmax}}}{1 + \frac{\varepsilon^2}{3} (a_{\text{п}}^2 + 1)},$$

где  $K_{\text{пmax}} = \frac{a_{\text{п}}^2}{2} + 1$ .

Решая это уравнение относительно  $\varepsilon$ , получим:

$$2\varepsilon = 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{K_{\text{пmax}} - 1}{K_{\text{п}} (a_{\text{п}}^2 + 1)}}. \quad (8)$$

Угол  $\gamma_i$  может принимать по модулю значения от 0 до  $\frac{\pi}{2}$ .

Если шаг квантования равен  $2\epsilon$ , то разрядность преобразователя АЦП равна:

$$m_2 = \left\lceil \log_2 \left( \frac{\pi}{4\epsilon} + 1 \right) \right\rceil. \quad (9)$$

На рис. 1 показаны зависимости шага квантования  $2\epsilon$  от нормированного коэффициента подавления  $\frac{K_{\Pi\max}}{K_{\Pi}}$ , рассчитанные для двух уровней мощности помехи ( $a_{\Pi}^2 = 30$  дБ и  $a_{\Pi}^2 = 50$  дБ) по формуле (8). Числа, стоящие рядом с пунктирной линией, обозначают разрядность преобразования.

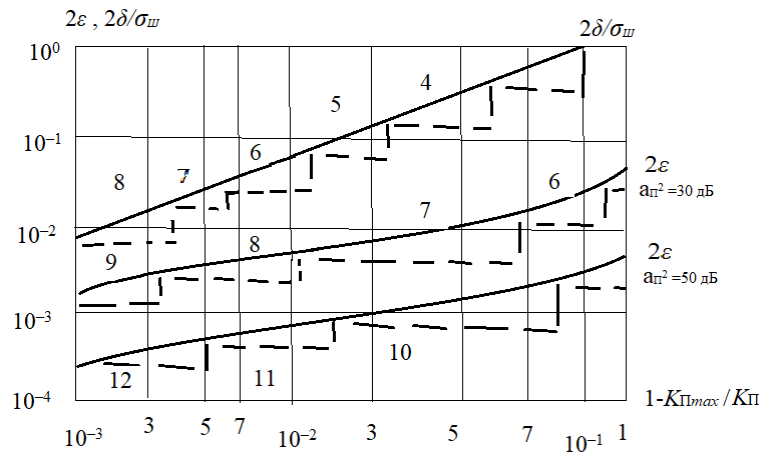


Рис. 1. Зависимость разрядности АЦП и шагов квантования от нормированного коэффициента подавления шума

Рассмотрим влияние квантования амплитудного коэффициента  $k_i$ .

Пусть шаг квантования равен  $2\delta$ . Тогда с учетом (3) можно получить:

$$\Delta_S = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i \sin(\beta_i)}{\sum_{i=1}^N (k_i + \delta_i)} - \sin(\varphi_N) \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i}{\sum_{i=1}^N (k_i + \delta_i)}. \quad (10)$$

Обычно ошибки квантования рассматривают как выборки из белого шума с нулевым средним и дисперсией  $\frac{4\delta^2}{12}$ . С учетом этого предположения:

$$\Delta_S = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i \sin(\beta_i)}{\sum_{i=1}^N (k_i)}. \quad (11)$$

Примем, что все  $\delta_i$  равны между собой и равны среднеквадратическому отклонению. Тогда при  $a_{\Pi}^2 > 15$  дБ можно считать, что

$$\sin(\varphi_N) \approx \frac{\sum_{i=1}^N \sin(\beta_i)}{N}; \quad \cos(\varphi_N) \approx \frac{\sum_{i=1}^N \cos(\beta_i)}{N}$$

и выражения для  $\Delta_S$  и  $\Delta_C$  принимают вид

$$\Delta_S = \frac{\delta N}{1673 \sum_{i=1}^N (k_i)} \sin(\varphi_N); \quad \Delta_C = \frac{\delta N}{1,73 \sum_{i=1}^N (k_i)} \cos(\varphi_N). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (2), получим сигнал на выходе компенсатора и мощность помехи:

$$y_{2K} = \left( 1 + \frac{\delta N}{\sqrt{3} \sum_{i=1}^N (k_i)} \right) y_2; \quad \langle y_{2K}^2 \rangle = \left( 1 + \frac{\delta \cdot N}{\sqrt{3} \sum_{i=1}^N (k_i)} \right)^2 \langle y_2^2 \rangle, \quad (14)$$

т. е. квантование коэффициента  $k_i$  приводит к увеличению шума.

Коэффициент подавления при условии деления мощности поровну между каналами:

$$K_{\Pi} = \frac{\frac{\sigma_{\Pi}^2}{2} + \sigma_{\text{ш}}^2}{\langle y_{2K}^2 \rangle}.$$

Решая это уравнение относительно  $\delta$ , получим:

$$2\delta = 2\sqrt{3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (k_i) \sqrt{\frac{K_{\Pi \max}}{K_{\Pi}} - 1}. \quad (15)$$

Для помехи мощностью более 15–20 дБ значение  $K = \langle k_i \rangle$  можно принять равным 15–20 дБ (5,66–10 раз по напряжению). Для  $K = 15$  дБ будем иметь:

$$2\delta = 19,7 \sigma_{\text{ш}} \sqrt{\frac{K_{\Pi \max}}{K_{\Pi}} - 1}, \quad (16)$$

а разрядность преобразователя в этом случае равна  $m_2 = \log_2 \left( \frac{4,66}{2\delta} + 1 \right)$ .

На рис. 1 показаны также зависимости шага квантования  $2\delta$  и разрядности АЦП (пунктирная линия) от нормированного коэффициента подавления помехи.

Из кривых видно, что для одинаковых значений нормированного коэффициента подавления помехи квантование амплитудного коэффициента является более грубым, чем квантование угла на выходе фазового детектора.

Литература

- 1 Крылов, В. И. Вычислительные методы / В. И. Крылов, В. В. Бобков, П. И. Монастырский. – Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», М., 1976. – Т. 1.

УДК 621.314.2

## СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТА THEOREMS-DNIPRO

С. Н. Кухаренко, Ю. Е. Котова, О. М. Ростокينا

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

Выбор места расположения контрольно-измерительных приборов для наблюдения за погодой обусловлен геологическими особенностями рельефа, наличием коммуникаций, требованием взаимного расположения с подобными измерительными пунктами [1].

Такие требования часто противоречат действующей системе электроснабжения, поскольку иногда метеостанция находится вне электрифицированных участков. По этой причине эффективным способом энергоснабжения метеорологического пункта является система автономного энергоснабжения.

Цель данной работы – разработка функционального решения, предназначенного для питания автономной станции от фотоэлектрического модуля и снабженной аккумулятором.

Задачей станции является сбор информации, поступающей с датчиков, подготовка формата данных и последующая передача данных по GSM-каналу.

Решались задачи технологии заряда аккумулятора, энергетически эффективно преобразования напряжения аккумулятора в напряжение, необходимое для работы узлов станции, а также управления работой датчиков метео данных и передачи данных.

Метеостанция состоит из метеорологической части, которая находится на площадке, и гидрологической части, находящейся на бугре в фарватере реки Днепр. Гидрологическая и метеорологическая части проекта состоят из датчиков мониторинга окружающей среды, системы сбора и передачи информации. Обе части станции снабжены фотоэлектрическим модулем и системой автономного электропитания.

Соединение информационных каналов с управляющим микроконтроллером и каналом передачи информации, а также управление системой электропитания осуществляется посредством функционального узла, именуемого кросс-платой (КП). Конструктивно КП выполнена универсальной платой с возможностью применения как в гидрологической, так и в метеорологической частях проекта.

Функциональная схема КП приведена на рис. 1. Кросс-плата содержит восемь разъемов для подключения устройств станции. Эти разъемы имеют следующие функциональные назначения:

- XS1 и XS5 – каналы передачи информации и управляющих сигналов по шине RS485, причем разъем XS5 имеет гальваническую развязку по цепи питания и информационному каналу. Электрическая прочность изоляции этого канала составляет 15 кВ. Данный канал предполагается использовать для подключения датчиков, подверженных воздействию атмосферных электрических разрядов (грозовых разрядов).

- XS2 – разъем для подключения GSM-модуля. Через этот разъем осуществляется питание модуля стабилизированным напряжением 5 В и включение (выключение) этого модуля по сигналу ON/OFF.

- XS3 и XS4 – разъемы для подключения цепей питания и информационных каналов к одноплатному компьютеру.

- XS6 – разъем подключения фото-электрического модуля (солнечной батареи), обеспечивающего автономную работу станции.
- XS7 – разъем для подключения цепей питания датчиков с номинальным рабочим напряжением 24 В. В гидрологическом узле это напряжение используется для питания специализированного контроллера Liquiline CM442, а метеорологический узел применяет это напряжение для подогрева датчика Lufft.
- XS8 – разъем для подключения аккумуляторной батареи с номинальным напряжением 12 В.

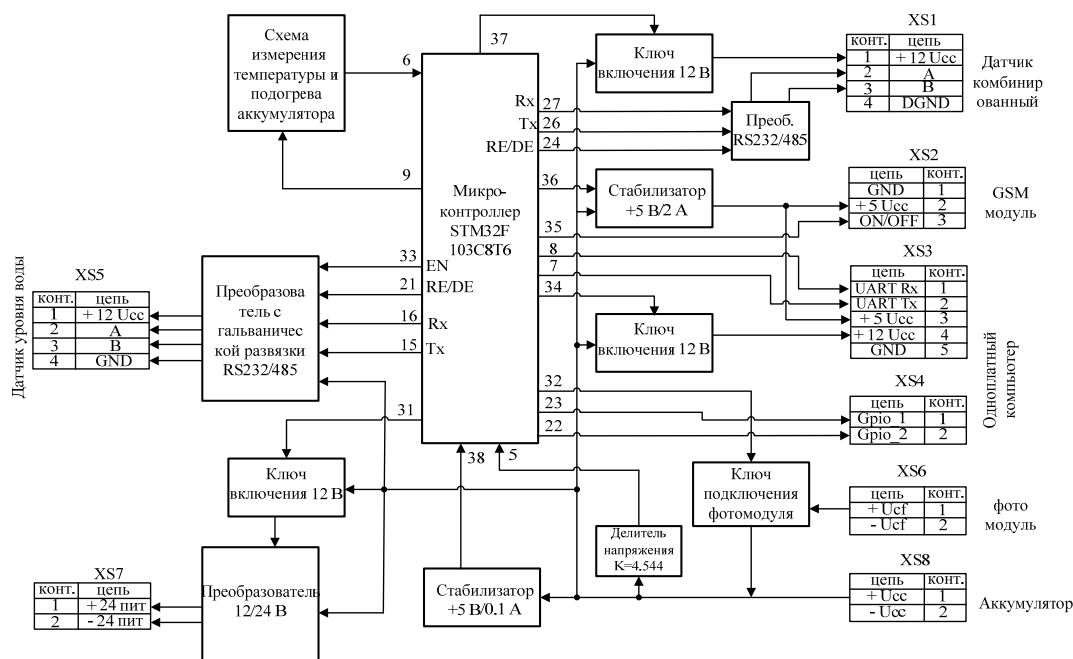


Рис. 1. Функциональная схема кросс-платы

Основу управляющей части КП составляет микроконтроллер STM32F103C8T6. К выводам микроконтроллера подключены цепи управления электропитания датчиков (ключи включения 12 В). Эти ключи подают напряжение 12 В на разъем питания соответствующего датчика на время измерения.

Специфика электропитания станции, работающей в автономном режиме, заключается в ее низком энергопотреблении в режиме сбора информации и режиме ожидания. Структура КП содержит стабилизированные преобразователи питания:

- микроконтроллера с током потребления 0,1 А;
- стабилизатора напряжения 5 В для питания GSM-модуля с током потребления 2 А;
- повышающего преобразователя для питания контроллера Liquiline CM442 с выходным напряжением 24 В и током нагрузки 3 А.

В месяцы, когда солнечная активность минимальна, общий ток потребления метеостанции в режиме ожидания не должен быть выше 1 мА. Следовательно, ток потребления каждого из преобразователей не должен превышать 0,3 мА. Для выполнения этого условия в процессе разработки преобразователей осуществлен подбор элементной базы микросхем: микроконтроллер – TPS 70950; стабилизатор напряжения на 5 В – TPS54650; повышающий преобразователь – UC2825A.

## Литература

1. Моргунов, В. К. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений / В. К. Моргунов. – Ростов н/Д : Феникс ; Новосибирск : Сибир. соглашение, 2005. – 331 с.

УДК 621.396.6

### РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ ПО СЕТИ «ИНТЕРНЕТ»

Л. А. Захаренко, Ю. В. Крышнев

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

Появление на рынке множества различных телекоммуникационных модулей невысокой стоимости позволило разрабатывать бюджетные датчики технологических параметров с передачей данных по беспроводным каналам связи, в том числе с применением мобильного интернета.

Рассмотрим построение автономного датчика технологических параметров на примере измерителя защитного потенциала нефтепровода. Так как станции катодной защиты располагаются на расстоянии десятков километров друг от друга [1], а измерять потенциал необходимо в любом месте нефтепровода, где, как правило, отсутствует электроэнергия и линии связи, то к измерителю потенциала предъявляются следующие требования:

- автономное питание;
- передача данных по беспроводному каналу связи;
- наличие GPS-приемника для определения местоположения установки датчика.

Структурная схема разработанного измерителя потенциалов представлена на рис. 1.

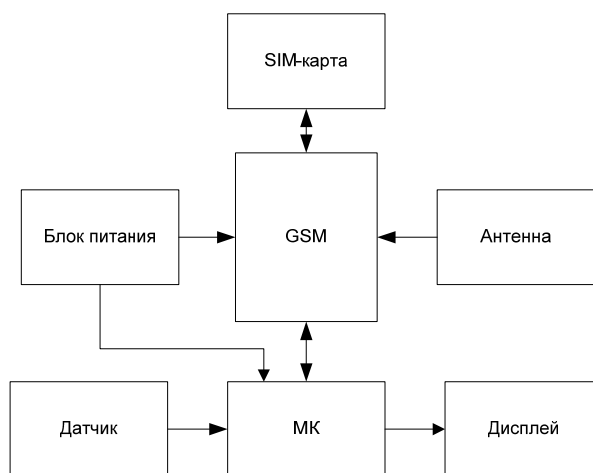


Рис. 1. Структурная схема измерителя потенциалов

Устройство предназначено для передачи информации о защитном потенциале нефтепровода, координат местоположения датчика, напряжении АКБ диспетчеру. Оно включает в себя следующие блоки:



- Датчик – датчик измерения потенциала, преобразует измеряемую величину до вида, приемлемого для дальнейшей обработки.
- МК – микроконтроллер, обрабатывает информацию поступающую от датчика, передает ее в GSM-модуль, управляет работой GSM-модуля, передает информацию на дисплей.
- Дисплей – отображает информацию об измеряемой величине, состоянии GSM-модуля.
- SIM-карта – разъем подключения SIM-карты, SIM-карта инициализирует устройство связи в сети.
- Антенна – разъем подключения антенны, служит для вещания и приема сигнала.
- GSM – GSM-модуль SIM968 передает информацию диспетчеру посредством мобильной связи. SIM968 – четырехдиапазонный GSM/GPRS-модуль с поддержкой спутниковой навигации в системах «GPS/ГЛОНАСС». Полностью законченное решение в корпусе типа SMT идеально подходит для приложений с одновременной поддержкой GSM/GPRS и GPS.

При разработке данного модуля производителем были учтены пожелания потребителей модулей предыдущих поколений, тщательно проработаны вопросы надежности встроенного программного обеспечения, введены новые режимы энергосбережения, существенно уменьшены габариты. Вместе с тем сохранены ключевые преимущества: удобный встроенный TCP/IP стек, низкая цена.

Основные характеристики модуля SIM968:

- GSM: 850/900/1800/1900 МГц;
- класс мощности 4 (2 Вт в диапазонах 850–900 МГц);
- класс мощности 1 (1 Вт в диапазонах 1800–1900 МГц);
- рабочий температурный диапазон: –40...+85 °С.
- управление AT командами (GSM 07.07, 07.05 и фирменные AT команды SIMCOM).

Интерфейсы: 80 выводов в формате SMT, интерфейс для внешней SIM-карты: 3 В/1,8 В; два аналоговых аудио интерфейса; SPI; подключение резервного питания для RTC; backup; последовательный интерфейс; отладочный интерфейс для GSM/GPRS; два последовательных интерфейса для GNSS (Global Navigation Satellite System); вход для подзарядки аккумулятора.

Встроенный TCP/IP стек позволяет посредством AT-команд организовать http-клиент или http-сервер. В измерителе защитного потенциала был реализован http-клиент, который отправляет измеренные данные на веб-сервер. Цель веб-сервера – принимать данные от большого количества устройств, сохранять их в базе данных и отображать в виде графиков по запросу пользователя. Для создания БД использовали MySQL – реляционную систему управления базами данных, относящуюся к свободному ПО.

Устройство обращается к серверу, посылая GET-запрос, содержащий измеренные данные.

Программное обеспечение сервера состоит из трех основных скриптов:

- 1) set.php – скрипт для приема и обработки запроса;
- 2) result.php – скрипт для отображения результатов в виде графиков;
- 3) admin.php – скрипт для управления устройствами.

*Скрипт обработки запроса.* Сервер, получив данный запрос, обрабатывает его, выделяя значения переменных, берет текущее время сервера и все эти значения помещает в таблицу «Данные».

*Скрипт просмотра данных.* После авторизации на данной странице будет построен график с результатами измерений, возможностью выбора начала диапазона, конца диапазона, выбора устройства (только тех, которые числятся за этим пользователем) и отображаемых параметров. Вид данной страницы в тестовом режиме приведен на рис. 2.



Рис. 2. Страница отображения данных

В заключение следует отметить, что реализация http-клиента рекомендуется для устройств, основное предназначение которых – это сбор данных и передача их на сервер. К недостаткам реализации http-клиента можно отнести невозможность оперативного управления устройством. Управляющие команды передаются сервером на устройство в ответе на запрос клиента.

Если же система предназначена для управления различными исполнительными устройствами, то необходимо реализовать http-сервер. В этом случае диспетчер может оперативно управлять устройствами.

#### Литература

- 1 Защита трубопроводов от коррозии : в 2 т. / Ф. М. Мустафин [и др.]. – СПб. : Недра, 2007. – Т. 2.

# СЕКЦИЯ 5. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

## АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЫХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА УСТРОЙСТВА НАГРУЖЕНИЯ РЕЗЕРВНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

М. Н. Погуляев, А. А. Чигринец

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

Для проведения испытаний резервных электрогенераторов, находящихся в холодном резерве, необходимо с помощью специальных нагружающих устройств (НУ) имитировать различные статические и динамические режимы работы. В последнее время такие устройства проектируются на базе статических преобразователей, которые являются источниками высших гармоник тока и напряжения.

Цель работы заключается в расчете и анализе гармонических составляющих выходных напряжения и тока энергосберегающего устройства нагружения резервных электрогенераторов с использованием имитационной модели, разработанной в прикладной программе MatLab (рис. 1) [1].

В качестве параметров, характеризующих влияние устройства на питающую сеть и испытуемый генератор, будем использовать суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (коэффициент искажений синусоидальности кривой тока)  $K_I$  и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (коэффициент искажений синусоидальности кривой напряжения)  $K_U$ .

Задавая различные значения коэффициента мощности  $K_{м1}$ , были получены значения коэффициентов несинусоидальности на входе и выходе устройства нагружения (см. таблицу).

### Значения коэффициентов несинусоидальности устройства нагружения при номинальном значении тока нагрузки и различных значениях коэффициента мощности генератора

Параметры на входе устройства нагружения					Параметры на выходе устройства нагружения				
$K_{м1}$ , %	$P_1$ , Вт	$S_1$ , ВА	$K_{U1}$ , %	$K_{I1}$ , %	$K_{м2}$ , %	$P_2$ , Вт	$S_2$ , ВА	$K_{U2}$ , %	$K_{I2}$ , %
0,9	7314	8134	25,92	21,98	0,77	-6728	8726	3,57	27,1
0,8	6437	8091	32,9	24,06	0,66	-5859	8831	4,03	26,82
0,7	5639	8103	36,72	24,84	0,69	-5065	8970	4,39	26,59
0,6	4832	8099	39,13	25,36	0,5	-4262	9076	4,54	26,33
0,5	4023	8098	40,7	25,94	0,38	-3457	9164	4,73	26,08
0,4	3218	8097	41,61	26,26	0,29	-2657	9238	4,72	25,81

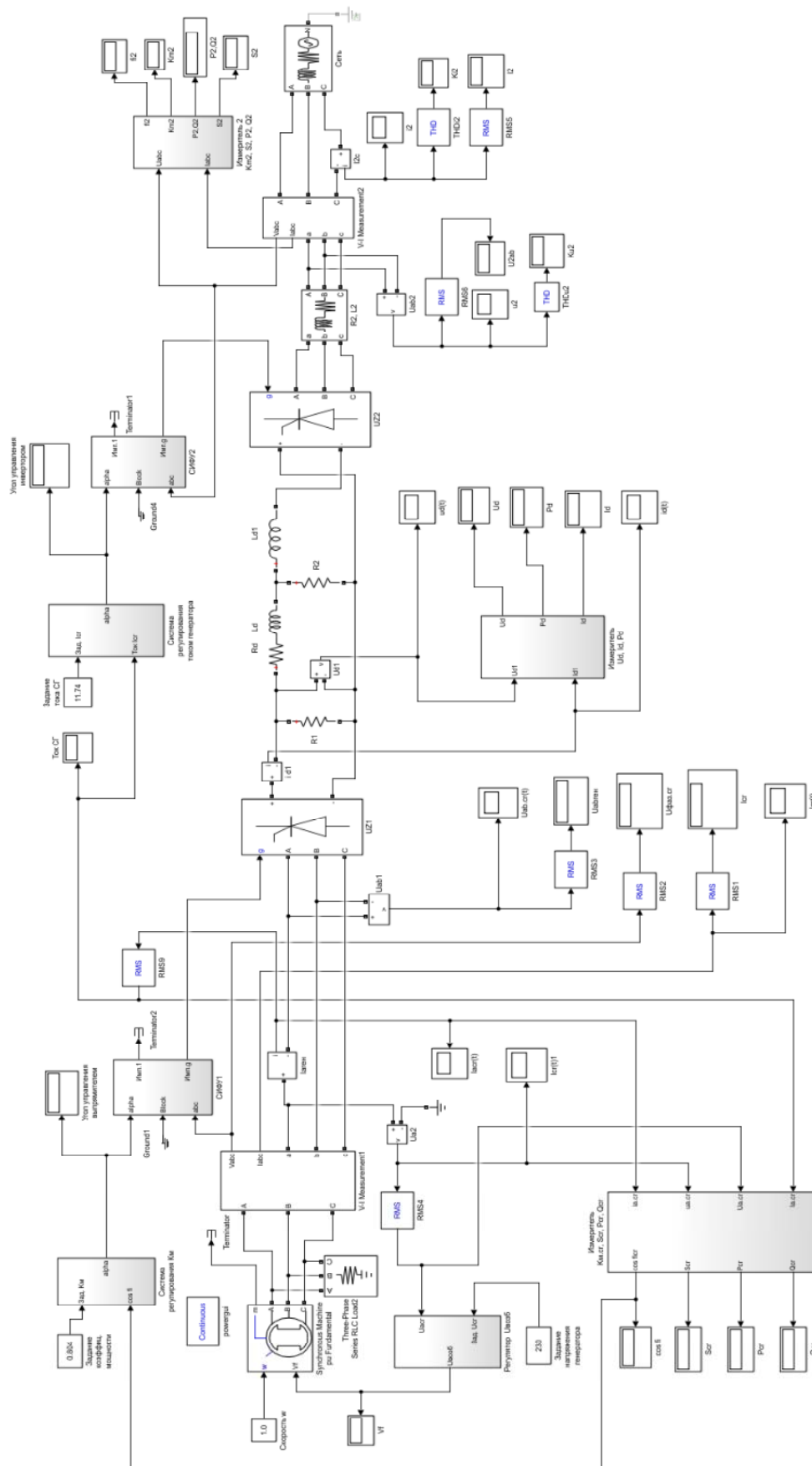


Рис. 1. Имитационная модель энергосберегающего устройства нагружения резервных электрогенераторов

По данным таблицы построены графики зависимостей коэффициентов несинусоидальности напряжения и тока на выходе нагрузителя от коэффициента мощности на входе (рис. 2).

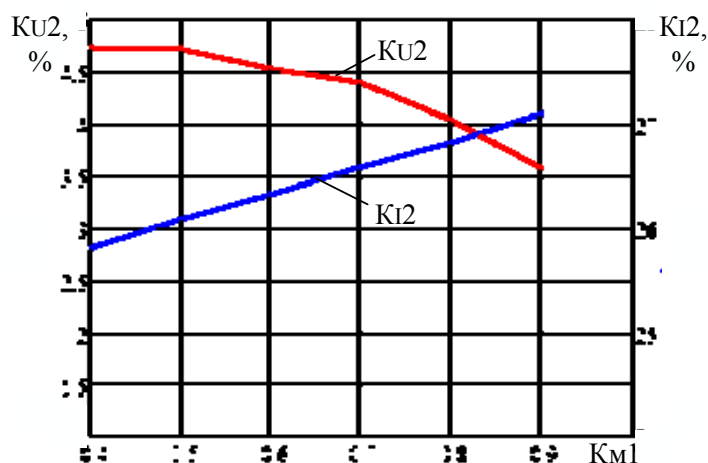


Рис. 2. Зависимость коэффициентов несинусоидальности напряжения и тока на выходе нагрузителя от коэффициента мощности на входе

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (коэффициент искажений синусоидальности кривой напряжения) на входе нагрузителя достаточно большой и может достигать 42 %. В то же время влияние нагрузителя на питающую сеть невелико ( $K_{U2} = 3,57-4,72$  %) и не превышает нормально допустимых значений (8 %), установленных ГОСТ 30824.4.30–2013 и ГОСТ 32144–2013 для сетей 0,38 кВ [3].

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что представленное энергосберегающее устройство нагружения, построенное на статических преобразователях, может успешно применяться для проведения регламентных испытаний резервных генераторов.

#### Литература

1. Чигринец, А. А. Компьютерное моделирование энергосберегающего устройства нагружения резервных электрогенераторов / А. А. Чигринец, М. Н. Погуляев // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Международ. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 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, 2019. – С. 240–243.
2. Штерн, В. И. Дизель-генераторы переменного тока напряжением до 400 В / В. И. Штерн, А. А. Самойлов. – М. : Энергия, 1972. – 104 с.
3. Теоретические и экспериментальные исследования энергосберегающих устройств поверочного нагружения резервных электрогенераторов с регулированием нагрузки по величине и характеру : отчет о НИР (заключ.) / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; рук. М. Н. Погуляев. – Гомель, 2017. – 90 с. – № ГР 20162378.

УДК 621

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СТОКОВ НА НУЖДЫ ОТОПЛЕНИЯ СТУДЕНЧЕСКОГО ОБЩЕЖИТИЯ

М. Аннаев, Ш. Акмурадов

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Нагрев воды для нужд горячего водоснабжения составляет 20–25 % от общего потребления энергии в стандартном доме, и большая часть нагрузки приходится на подогрев воды для принятия ванны или душа.

Методика исследований заключается в определении с помощью нормативной, технической литературы количества стоков, их температуры, сравнении количества тепла, производимого ТН с теплопотребностью системы отопления.

Для студенческого общежития в Государственном энергетическом институте Туркменистана, где проживают 282 студента, в период с 25 августа по 25 сентября 2020 г. по данным измерений были получены следующие результаты: в будни (с понедельника по пятницу) в учебный период года среднее потребление питьевой воды составило 116,9 л/сут на человека (соответственно 28,53 м<sup>3</sup>/сут), а средняя температура сточных вод – 24,9 °С. Средняя температура холодной питьевой воды составила около 11,8 °С в течение периода измерения.

В каждом блоке установлены ванна с душем, умывальник, раковина, унитаз со смывным бачком. Данные по расходу воды студентами принимаем согласно [1].

Согласно [1, пп. 3.12] суточный расход стоков необходимо принимать равным водопотреблению без учета расхода воды на поливку:

$$q_s = q_{tot},$$

где  $q_s$  – суточный расход стоков;  $q_{tot}$  – суммарное водопотребление горячей и холодной воды.

Для определения количества и температуры сточных вод необходимо определить расход отдельно холодной и горячей воды.

По данным [1, приложение 3] определяем два показателя водопотребления: первый – для максимально нагруженных часов водоразбора (утро, вечер), второй – среднее водопотребление за сутки:

– час наибольшего водопотребления, л/ч:

$$Q_{hr,u} = q_{hr,u}U,$$

где  $Q_{hr,u}$  – норма расхода воды в час наибольшего водопотребления на одного человека,  $q_h = 8,2$  л/ч – горячей;  $q_{hr,u}^c = 4,3$  л/ч – холодной, определяется согласно [1, приложение 3];  $U$  – количество потребителей, чел.;

– средние сутки водопотребления, л/сут:

$$Q_{u,m} = q_{u,m}U,$$

где  $q_{u,m}$  – норма расхода воды в средние сутки водопотребления на одного человека,  $q_h = 60$  л/чел. – горячей;  $q_{u,m}^c = 50$  л/сут · чел. – холодной, определяемая согласно [2, приложение 3];  $U$  – количество потребителей, чел.

## Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 183

Рассчитываем температуру стоков отдельно для двух этих показателей по формуле

$$t_{\text{см}} = \frac{t_c m_c + t_h m_h}{m_c + m_h},$$

где  $t_{\text{см}}$  – результирующая температура смеси, °С;  $t_c$  – температура холодной воды, равная 5 °С;  $t_h$  – температура горячей воды, равная 60 °С;  $m_c$  – масса стоков холодной воды, кг;  $m_h$  – масса стоков горячей воды, кг.

Результаты расчета сводим в таблицу.

Показатель	Расход горячей воды $Q_h$ , м <sup>3</sup> /ч	Расход холодной воды $Q_c$ , м <sup>3</sup> /ч	Температура смеси $t_{\text{см}}$ , °С
Час наибольшего водопотребления	2,3	1,2	41,2
Средние сутки водопотребления	16,9	14,1	35

Периоды с 6.00 до 8.00 и с 18.00 до 22.00 наиболее нагруженные, достигается максимальный часовой расход стоков ( $Q = 3,525$  м<sup>3</sup>/ч). Периоды с 9.00 до 18.00 и с 22.00 до 6.00 расход стоков среднесуточный ( $Q = 31,02$  м<sup>3</sup>/ч). Из-за высокого уровня температуры сточные воды могут быть классифицированы как идеальный источник тепла для системы с тепловым насосом. Как показано на рис. 2, бак для накопления сточных вод компенсирует колебания количества поступающей сточной воды в течение дня и служит в то же время местом установки одностороннего теплообменника, который поглощает тепло из сточных вод. Тепловой насос передает полученную тепловую энергию теплообменнику, служащему для нагрева воды. Система предназначена для двухступенчатого нагрева воды: тепловой насос совершает предварительный нагрев питьевой воды, после чего второй генератор тепла (например, обычный газовый котел) поднимает температуру предварительно нагретой воды до уровня температуры, необходимой для горячего водоснабжения – 60 °С. Это делается для того, чтобы предотвратить размножения бактерий легионеллы и обеспечить санитарно-гигиенические требования для систем ГВС.

В контексте исследовательского проекта разные схемы технических решений проанализированы в отношении их экологических и экономических преимуществ по расчетам моделирования, где гидрографы энергоемкости профилей сточных вод служат в качестве входных величин для моделирования [2]. Следующие результаты моделирования представлены на примере студенческого общежития с 282 студентами для системы теплового насоса, в которой тепловой насос обеспечивает предварительный нагрев горячей воды до 45 °С, и затем при помощи газового котла температура горячей воды повышается до 60 °С. Также при измерениях были заданы следующие значения:

- обеспечение температуры горячей воды: 60 °С;
- подогрев горячей воды через тепловой насос: 45 °С;
- внутренняя температура холодной воды: 10 °С;
- объем водонагревателя: 5 м<sup>3</sup>;
- объем хранения сточных вод: ~ 5 м<sup>3</sup>;
- тепловая мощность теплового насоса: 24 кВт;
- термическая дезинфекция водонагревателя: один раз в день с помощью газового котла.

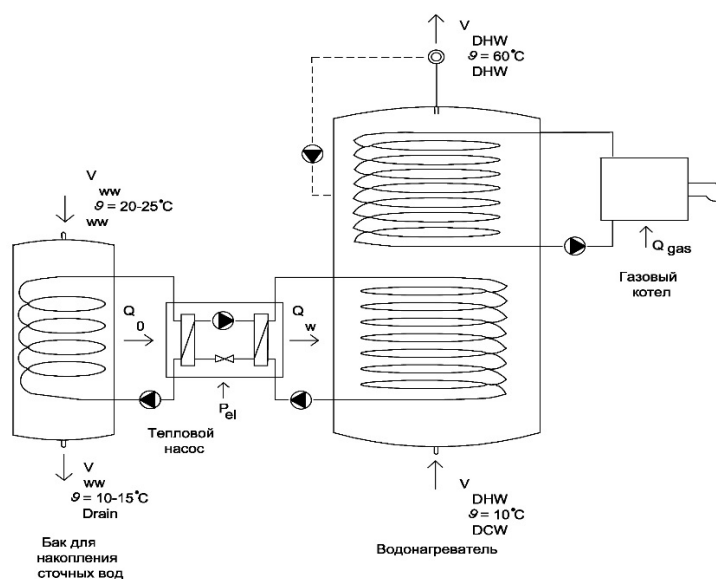


Рис. 2. Возможность использования энергии сточных вод для нагрева питьевой воды с помощью теплового насоса

Из-за насыщенности питательной среды сточных вод, как и ожидалось, произошло формирование биопленок на всех контактных поверхностях. Особый интерес здесь представляет образование биопленки на той части теплообменника, которая контактирует со сточными водами, поскольку биопленка обладает низкой теплопроводностью и таким образом имеет изолирующее действие, что может значительно снизить теплопередачу теплообменника. При моделировании биопленки со средней толщиной 1 мм, при которой требуется регулярная очистка теплообменника для сточных вод в однодневный интервал:

- толщина биопленки на теплообменнике, контактирующем со сточными водами: 1 мм;
- теплопроводность биопленки: 0,5 Вт/мК.

Исследование показало, что для эффективной работы системы необходимо сократить формирование биопленки на контактирующей со сточными водами части теплообменника, например, с помощью инновационных и автоматизированных методов очистки. Основная цель исследовательского проекта – использование сточных вод в качестве источника тепла. Рекуперацию тепла сточных вод непосредственно в здании можно рассматривать как перспективную технологию, которая позволяет увеличить энергетическую и ресурсную эффективность нагревательных приборов в зданиях.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что утилизация и повторное использование большей части энергии сточной воды позволит сэкономить тепловую энергию и снизить общую стоимость горячей воды.

#### Л и т е р а т у р а

1. СНиП 2.04.01–85. Внутренний водопровод и канализация зданий.
2. Гершкович, В. Ф. Исследование работы теплового насоса, использующего теплоту грунта и канализационных стоков, в системе горячего водоснабжения / В. Ф. Гершкович // Энергосбережение в зданиях. – 2007. – № 3 (34).



УДК 620.92

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

А. А. Матьякубов, М. Р. Оразбердиева

*НПЦ «Возобновляемые источники энергии» Государственного  
энергетического института Туркменистана, г. Мары*

На территории Туркменистана энергия солнца каждый год составляет  $1,4 \cdot 10^9$  т у. т., а количество солнечных часов в году составляет 2768–3081 [1].

В связи с тем, что климат Туркменистана является резко континентальным, то днем в летний период средняя температура окружающей среды достигает  $45\text{ }^\circ\text{C}$ , а ночью опускается до  $25\text{ }^\circ\text{C}$  [2]. Энергию солнца можно использовать днем для преобразования в другие виды энергии (электрическую, тепловую и т. д.). Но при этом возникает необходимость в накоплении энергии для ночного времени суток. Для точной оценки потенциала использования солнечной энергии для сушки сельскохозяйственной продукции необходимо знать уровень солнечного излучения в данный период времени, так как сам процесс сушки происходит в основном в летний сезон. Оптимальный угол наклона для солнечных преобразователей в условиях города Мары равен  $\beta = 36^\circ$ . Интенсивность солнечного излучения на всей территории Туркменистана оценивается в  $700\text{--}800\text{ Вт/м}^2$  [3].

Фрукты и овощи, как правило, содержат до 90 % воды, 9,5 % различных органических соединений и 0,5 % минеральных веществ. Высокое содержание влаги приводит к тому, что фрукты и овощи легко поражаются фитопатогенными микроорганизмами, и сохранность урожая является сложной организационной и технической задачей. Так как фрукты и овощи потребляются населением только в свежем виде, то только часть продукции отправляется на переработку и хранение. Исходя из этого, наряду со многими способами хранения и переработки плодовых овощей, вопросы применения сушки продукции можно отнести к весьма актуальным задачам на современном этапе [4].

Солнечная сушилка, представленная в данной научной работе, состоит из горизонтально расположенной – нагревательной и вертикально расположенной – сушильной камеры (рис. 1).

Сушка овощей и фруктов происходит следующим образом: солнечные лучи  $I$ , попадая в нагревательную камеру  $4$ , нагревают ее и по закону естественной конвекции попадают в сушильную камеру. В сушильной камере расположено несколько полок  $8$  для размещения овощей или фруктов. Часть тепла передается теплоаккумулирующим материалам  $6$ , которые находятся на дне камеры. Теплоаккумулирующие материалы одновременно позволяют регулировать температуру в сушильной камере, так как при подаче большой температуры наружный слой фруктов сильно высушивается и внутри еще остается влага, которая со временем приводит к выделению неприятных запахов и браку продукции. С падением температуры наружного воздуха за счет теплоаккумулирующих материалов и с хорошей теплоизоляцией поддерживается постоянная подача тепла, что в свою очередь приводит к качественной сушке. Также в этой установке находится тепловой датчик  $7$ , с помощью которого регулируется температура внутри камеры, так как в летнее время в полдень внутри камеры температура повышается, что в свою очередь приводит к сильной сушке овощей и фруктов. На датчике устанавливается оптимальная температура для каждого вида овощей и фруктов. Когда повышается установленная на датчике температура, то подается команда на вентилятор  $10$  для вентиляции. Питание датчика и вентилятора обеспечивается солнечной па-

нелью 9. Также в этой конструкции предусмотрены колеса 5 для передвижения, так как попадание тени от домов или деревьев приводит к уменьшению КПД данной установки.

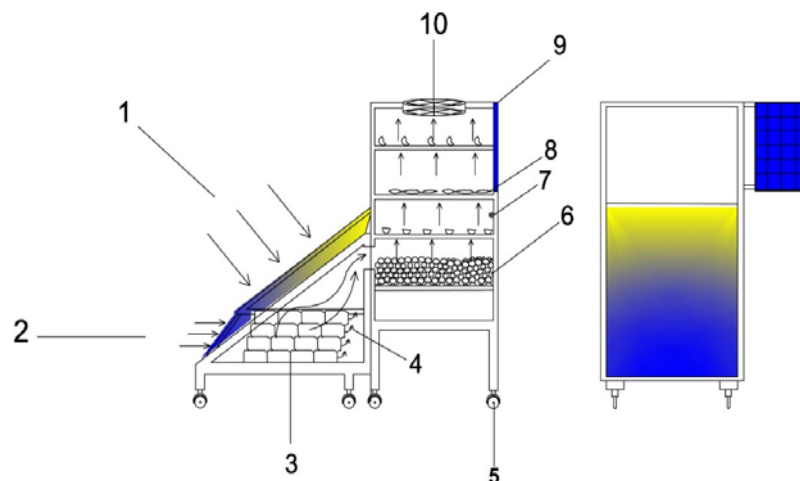


Рис. 1. Установка для сушки фруктов и овощей с использованием солнечной энергии:

- 1 – солнечные лучи; 2 – поток воздуха; 3 – дополнительные нагреватели;  
4 – горячий воздух; 5 – колеса для передвижения; 6 – накопители тепловой энергии; 7 – тепловой датчик; 8 – овощи или фрукты;  
9 – солнечная панель; 10 – вентилятор

**Сушка овощей (баклажаны).** Сушка баклажанов осуществляется следующим образом: баклажаны нарезают по длине и бланшируют в горячей воде в течение 20 мин. После этого процесса нарезанные баклажаны располагают на полках сушильной камеры. На каждую полку раскладывают по 650 г баклажанов. Процесс сушки занимает 46 ч. За это время на первой полке средняя температура составляет 44,9 °С, а на второй 45,1 °С. Результаты исследований были проверены в соответствующих лабораториях, и содержание влаги в первой полке составило 9,8 %, а во второй 9,4 % (по ГОСТу 28561–90 содержание влаги до 14 %). Как видно из полученных результатов, подача температуры с разницей 0,2 °С приводит к изменению содержания влаги в 0,4 %.



Рис. 2. Расположение баклажанов и полученные сушеные баклажаны

На основании полученных данных по измерениям температуры внутри камеры и содержанию влаги в баклажанах в течение 46 ч был сделан вывод, что для получения сушеных баклажанов с требуемым содержанием влаги необходимо поддерживать определенную температуру в течение 46 ч (рис. 3).

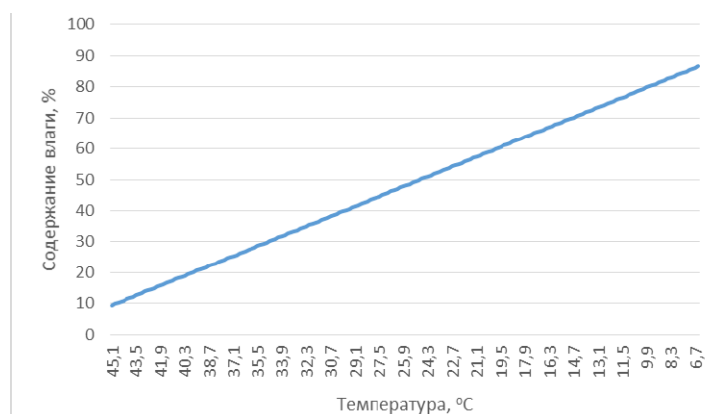


Рис 3. График зависимости содержания влаги от подаваемой температуры в течение 46 ч

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Использование солнечной энергии в условиях Туркменистана (г. Мары) для сушки овощей и фруктов очень эффективно в летнее время.
2. Процесс сушки баклажанов в солнечной сушильной установке можно ускорить с помощью колес, что позволит увеличить попадание солнечных лучей.
3. Данную установку также можно использовать для сушки других видов сельскохозяйственной продукции (хлопка и зерна), только с увеличением объема всей установки.

#### Литература

1. Государственная программа по энергосбережению на 2018–2024 гг.
2. Швер, Ц. А. Климат Ашхабада / Ц. А. Швер, А. Б. Рыхлова. – Л. : Гидрометеиздат, 1984.
3. Джумаев, А. Основы энергосбережения / А. Джумаев, Х. Солтанов. – Ашхабат, 2018.
4. Интенсификация процесса сушки продуктов растительного происхождения с использованием солнечной энергии : дис. ... д-ра философии (PhD). – Алматы, 2015.

УДК 641.56

### ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУСПЕНЗИИ ХЛОРЕЛЛЫ ПРИ ХРАНЕНИИ ПЛОДОВ

**М. Оразбердиева, Б. Джеббарова, М. Ходжалыев, Д. Джумагелдиев**

*НПЦ «Возобновляемые источники энергии» Государственного энергетического института Туркменистана, г. Мары*

Для нормального питания человека его ежедневный рацион должен состоять из фруктов и овощей. Они – поставщики витаминов, минералов, углеводов, пищевых волокон, органических кислот, пектиновых веществ.

Каждый работник сельского хозяйства, занимающийся растениеводством, выращиванием овощей и фруктов, после сбора урожая сталкивается с проблемой хранения плодов, сохранением состава и вкуса товара при его транспортировке на даль-

ние расстояния и длительном хранении. Высокое содержание воды затрудняет сохранение биологических и вкусовых качеств плодов. При решении этой задачи важную роль играет суспензия одноклеточных водорослей – хлореллы вулгариса.

Хлорелла зародилась в водах Мирового океана 3,5 млрд лет тому назад, и только 2,5 млрд лет спустя на поверхности Земли начали зарождаться другие растения. Ни одна природная катастрофа не смогла привести к исчезновению хлореллы. При таких обстоятельствах все живые существа на Земле не выдерживали испытания временем и исчезали. А хлорелла, достигнув пика совершенства, превратилась в высококачественный корм для животных [1].

Хлорелла выполняет очень важную функцию в человеческом организме: ее в основном добавляют в корма животноводства, птицеводства, пчеловодства, рыболовства в виде биологического активного вещества, широко используют для повышения устойчивости к болезням и повышения продуктивности. Хлореллу применяют для повышения урожайности почвы, а в растениеводстве для повышения качества прорастания семян. Кроме этого в последние годы хлореллу широко используют в косметологии и производстве биотоплива. Поэтому в настоящее время во всем мире растет интерес к хлорелле.

Болгарский ученый П. И. Станчев, изучая биохимический состав хлореллы, обнаружил, что в массе ее ячейки содержится 350 различных веществ. К ним в основном относятся различные углеводы, органические и жирные кислоты, углеводороды, спирты и эфиры, карбонильные соединения, витамины, стерины и другие вещества [3].

Биохимическая характеристика хлореллы: в 1 литре суспензии хлореллы содержится 6 г сырой биомассы хлореллы, а это: 45–55 % – белка; 5–10 % – липидов; 35 % – углеводов; до 10 % минеральных веществ. Хлорелла по качеству содержащегося в ее составе белка стоит выше всех пищевых добавок и пищевых продуктов. В ней содержатся все необходимые аминокислоты, в том числе незаменимые аминокислоты.

По причине противостояния (антагонизма) хлореллы вулгариса к бактериям и вирусам последние не способны жить в пищевой среде хлореллы [3].

**Методика научного исследования.** Учитывая особенности одноклеточных водорослей хлореллы вулгариса, в научно-производственном центре «Возобновляемые источники энергии» Государственного института Туркменистана были проведены опытные работы по ее использованию для хранения плодов.

Опыты проводились двумя способами: в первом образце в виде опыления суспензией хлореллы свежих плодов яблок, во втором образце – на обычных плодах. На каждое яблоко с помощью специальных шприцов напылили 20 мл суспензии хлореллы вулгариса, и в отдельности каждое яблоко поместили в чашку Петри. Образцы хранились в течение 60 дней при комнатной температуре (25 °С).

**Результаты.** По результатам проведенных опытов за период 30 дней установлено сохранение товарного вида плодов (в результате действия хлореллы) в первом образце – 83,3 %, во втором контрольном образце – 0 % (сгнили). На 43-й день эксперимента на плодах, обработанных суспензией хлореллы, начала появляться плесень, а во втором образце такой признак появился уже на 19-й день хранения. Плоды первого образца на 57-й день полностью сгнили, а второй образец сгнил на 35-й день опыта (рис. 1).

Биологической особенностью хлореллы является впитывание самого большого количества солнечной энергии, при этом выделяется кислород, а это дает возможность использования ее суспензии для хранения плодов. Хлорелла прекращает развитие анаэробных бактерий, тормозит развитие грибков.

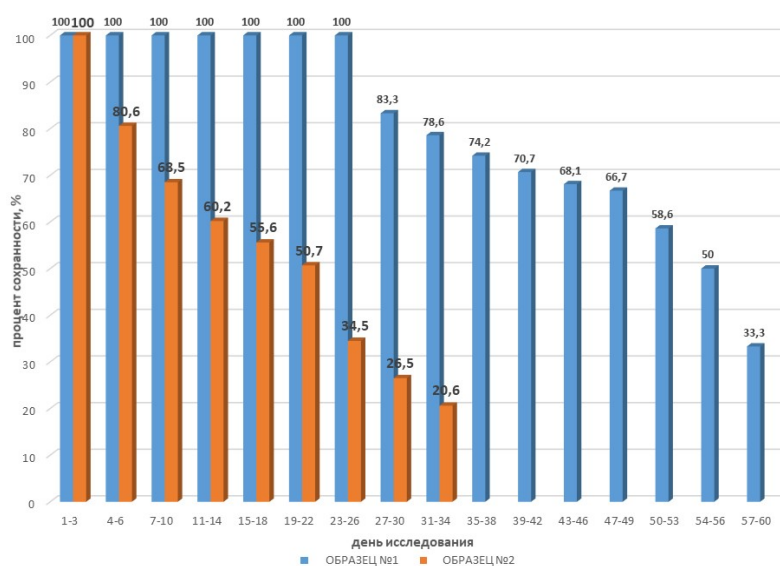


Рис. 1. График зависимости процента сохранности плодов от времени

Обработку биологическим средством (суспензией хлореллы) плодов можно провести до сбора урожая. При использовании суспензии хлореллы в сельском хозяйстве она защищает биологические и вкусовые качества яблок, фрукты остаются в экологически чистом состоянии.

Таким образом, основной особенностью обработки плодов суспензией хлореллы является долгое хранение внешнего товарного вида (30 дней) плодов, а это дает экологическую чистоту плодов, а также возможность транспортировать их на дальние расстояния.

#### Литература

1. Богданова, Т. Л. Биология : справ. для старшеклассников и поступающих в вузы / Т. Л. Богданова, Е. А. Со-лодова. – М. : АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2012.
2. Мельников, С. С. Хлорелла: физиологически активные вещества и их использование / С. С. Мельников, Е. Е. Мананкина. – Минск : Наука и техника, 1991.
3. Скрипников, Ю. Г. Прогрессивная технология хранения плодов и овощей / Ю. Г. Скрипников. – М. : Агропромиздат, 2001.

УДК 621.3

### ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ

К. А. Сарыев, Н. А. Алланазаров, Э. Б. Атаев

НПЦ «Возобновляемые источники энергии» Государственного  
энергетического института Туркменистана, г. Мары

Создание программного обеспечения проектирования солнечных станций поможет внедрению «зеленых» технологий в стране, а также, воспользовавшись данной программой, можно решить ряд технологических задач. С целью повышения качества и оптимизации ряда работ выполнено «Программное обеспечение проектирования фотоэлектрических солнечных станций» с помощью программного языка *Delphi*.

Цифровая образовательная система – это своего рода современная управленческая система в сфере образования. Эта система поможет повысить качество и облегчить трудоемкость выполняемых работ в образовательных учреждениях и научно-производственных центрах. Данное программное обеспечение позволяет лучше анализировать начальные данные, на основе которых и выполняются расчеты данного проекта, помогает получать точные данные и связь между исходными данными.

В программном обеспечении на основе расчетов выведенные данные можно также сохранить в базе данных как выполненный проект.

Предлагаемое программное обеспечение выполняет ряд работ, таких как:

- при проектировке фотоэлектрической солнечной станции расчеты для солнечных панелей, аккумуляторных батарей, инверторов, контроллеров, информация об их технических характеристиках хранится в базе данных программы;

- выполненные расчеты сохраняются для дальнейшего использования в самой программе;

- к выполненным расчетам предлагается подробная и поэтапная пояснительная записка, также ее можно распечатать;

- выполненные расчеты можно сохранить в формате *DOC*, *PDF*.

На главном окне программы можно выполнить ряд функций:

- дать оценку солнечной радиации, падающей на плоскость;

- расчеты фотоэлектрической солнечной станции;

- информационная база аккумуляторных батарей;

- информационная база инверторов;

- информационная база контроллеров;

- информационная база солнечных панелей.

**Общая информация о расчете оценки солнечной радиации, падающей на плоскость.** Чтобы определить количество солнечной инсоляции, а также солнечную радиацию, падающую на горизонтальную плоскость, требуется определить угол солнечных лучей, попадающих в зависимости от плоскости Земли. Определив угол солнечных лучей, в среднем можно определить оптимальное положение, т. е. угол расположения солнечных панелей. Определив эти основные параметры, можно дать оценку солнечной радиации, падающей на плоскость.

**Общее понятие о главе расчетов фотоэлектрических солнечных станций.**

В этой части содержится несколько важных возможностей. Для того чтобы войти в эту главу, надо войти с главного программного окна в меню «Расчеты», в раздел «Расчеты фотоэлектрических солнечных станций».

Далее открывается новое окно, откуда мы входим в меню «Задачи», и нажать на строку «Начать расчеты» или выполнить ту же задачу, нажав на горячие клавиши «*Ctrl+N*».

В открывшемся новом окне вводятся число, мощность и время использования электрических нагрузок, дальше вводится основная информация (рис. 1) о проектировании фотоэлектрической солнечной станции в данной местности.

В процессе выполнения расчетов фотоэлектрических солнечных станций в программе имеется возможность ввода изменений в исходные данные (по усмотрению), расположения солнечных панелей, например, монтаж солнечных панелей (горизонтально или вертикально), количество солнечных панелей (в ширину и длину) (рис. 2).

В итоге проведенных расчетов можно определить получаемую мощность в среднем в месяц, а также выбрать подходящие аккумуляторы для аккумуляирования, инверторы для преобразования постоянного тока в переменный и выбрать контроллер, чтобы следить за работой и вырабатываемой ею мощностью системы в целом.

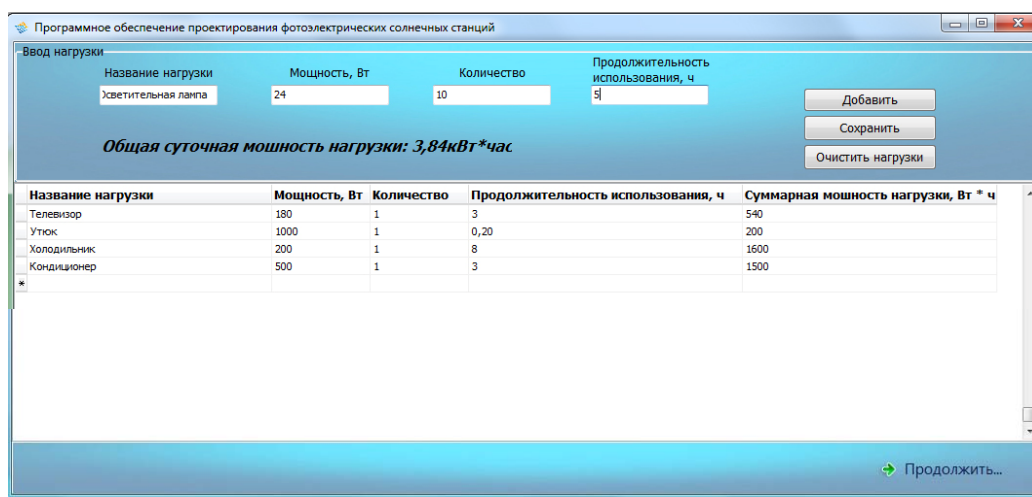


Рис. 1. Окно расчета электрических нагрузок

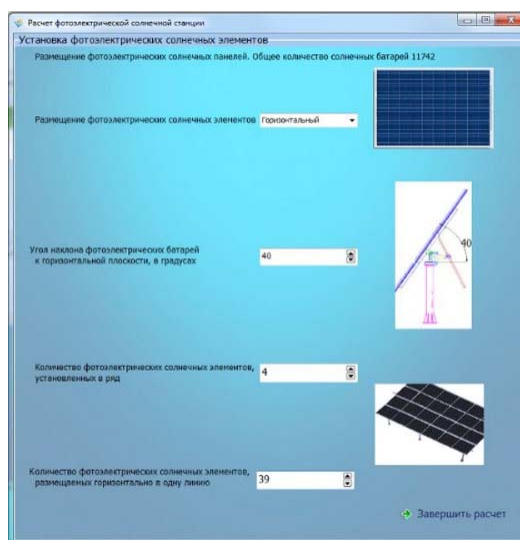


Рис. 2. Окно выбора расположения солнечных панелей

Выполненные расчеты сохраняются в информационной базе самой программы. В случае необходимости выполненные расчеты можно рассмотреть подробно в пояснительной записи, а также сохранить их в нужном формате (*DOC*, *PDF*). Выполненные расчеты можно получить и в распечатанном виде от самой программы.

**Меню информационной базы.** В информационной базе содержится та информация, которая понадобится во время расчетов, например, виды солнечных панелей, аккумуляторов, инверторов, контроллеров с их техническими параметрами. В меню информационной базы можно добавлять, изменять, корректировать, фильтровать или удалять данные.

В итоге с помощью разработанного программного обеспечения предлагается точный расчет. Этой программой можно широко воспользоваться при проектировке фотоэлектрических солнечных станций. А также можно выполнить расчет оценки солнечной радиации, попадающей на плоскость. Приняв во внимание, что проектировка фотоэлектрических солнечных станций достаточно трудоемкая работа, пред-

лагается программное обеспечение, которое не только выполнит задачу простым способом. Со временем в программном обеспечении подразумеваемого типа увеличится количество и качество информации в информационной базе, а также улучшится качество выполнения ряда технических задач.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Представленная программа является единственной по проектированию солнечных станций, и по результатам исследования получен патент на полезное изобретение.

2. Данная программа позволит повысить уровень знаний у студентов специальности «Возобновляемые источники энергии».

#### Л и т е р а т у р а

1. Джумаев. А. Научно-технический и методологический анализ ресурсов и развития солнечной энергии в Туркменистане : пособие для студентов высш. заведения / А. Джумаев. – Ашхабад, 2016.
2. Виды контроллеров для солнечных батарей и как выбирать // Электрика в доме. – М., 2017. – Режим доступа: <http://electricadom.com/kontroller-dlya-solnechnykh-batarejj-i-kak-vybirat.html>.
3. Коровин, Н. В. Химические источники тока : справочник / Н. В. Коровин, А. М. Скундин. – М. : МЭИ, 2003. – 740 с.
4. Солнечный контроллер есо «Энергия». Контроллер MPPT Pro / Компания МикроАРТ. – М., 2013, 2017. – Режим доступа: [http://www.invertor.ru/zzz/item/eco\\_mppt\\_pro\\_200\\_100](http://www.invertor.ru/zzz/item/eco_mppt_pro_200_100).
5. Инвертор для солнечных батарей / SolarSoul.net. – 2017. – Режим доступа: <http://solarsoul.net/invertor-dlya-solnechnyx-batarej>.

УДК 621

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

**Э. А. Сопыева, С. Чарыев**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена используются при строительстве кабельных линий электропередачи под землей, в траншеях, в кабельной канализации, по дну рек и озер, а также в грунтах различных категорий. Кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии при номинальном напряжении 10 кВ частоты 50 Гц в трехфазных сетях с заземленной нейтралью и прямой связью с воздушной линией или без нее на трассах с неограниченной разностью уровней.

При известном расчетном сроке безотказной работы изоляции и времени в эксплуатации остаточный срок безотказной работы можно рассчитать по формуле

$$\tau_{\text{ост.б.р}} = \tau_{\text{сл}} - \tau_{\text{экспл}}$$

Для расчета времени до полного износа изоляции требуется рассчитать время до разрушения 78 % материала, следовательно, расчет будет производиться исходя из условия  $N_t / N_0 = 0,22$  :

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln N}{b} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1,514}{-b}$$



## Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 193

Необходимо привести данные о температуре и напряжении с учетом суточной динамики изменения потребления электроэнергии, чтобы показать пример работы математической модели и спрогнозировать износ изоляции.

Для расчета остаточного срока службы требуется знать все параметры модели старения изоляции для определения скорости разрушения материала. Константу скорости реакции можно определить по графику Аррениуса для процесса термодеструкции полиэтилена (рис. 1).

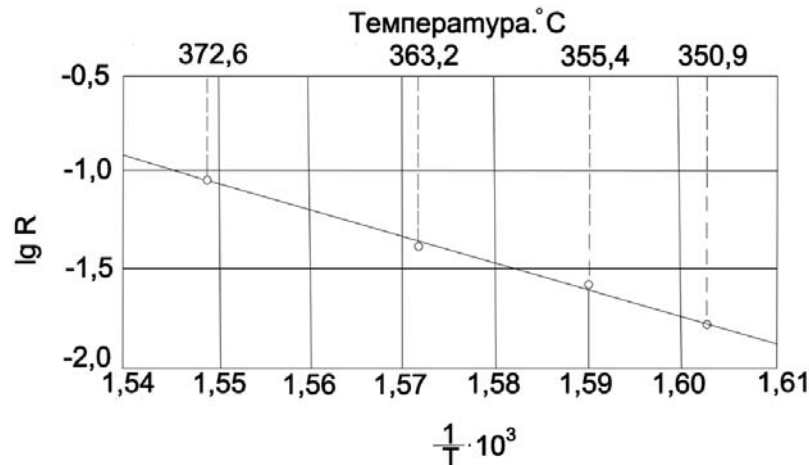


Рис. 1. График Аррениуса для процесса термической деструкции полиэтилена

Для определения зависимости константы скорости реакции от температуры необходимо знать уравнение прямой, представленной на рис. 1. Для этого нужно определить координаты двух точек, через которые проходит прямая. Примем, что прямая проходит через точки с координатами (0,001548; -1,05) и (0,00159; -1,7). Согласно уравнению прямой, проходящей через две точки, получим:

$$\frac{\frac{1}{T} - 0,001548}{0,00159 - 0,001548} = \frac{\log Kt(t) + 1,05}{-1,7 + 1,05}.$$

Отсюда

$$\log Kt(t) = +22,9,$$

где  $T$  — температура в кельвинах.

Также необходимо определить параметры формулы мощности частичных разрядов:

$$P_{\text{ч.р}} = BU^n.$$

Параметры формулы определялись исходя из электрического расчета. Значения параметров изменялись в процессе старения, однако в модели предлагается взять усредненные значения:  $B = 5,536 \cdot 10^{-3}$  и  $n = 5,73$ .

## 194 Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика

Параметр  $c$ , определяющий синергизм воздействия теплового и электрического полей, принят равным 0,01.  $N_0$  примем равным числу Авогадро  $6,022 \cdot 10^2$ .

Подставив полученные параметры в формулу скорости разрушения, получим:

$$v(t) = 0,01 \cdot 5,536 \cdot 10^{-3} U^5 \cdot 20854e \cdot 6,022 \cdot 10e^{-0,01 \cdot 5,536 \cdot 10^{-3} E^5 \cdot 20854e^{\frac{1}{7}}}$$

Срок безотказной работы изоляции:

$$\tau_{б,р} = 166730 = 19 \text{ лет.}$$

Срок службы изоляции до ее полного износа:

$$\tau_{сл} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1,514}{9,0000059} = 302220 \text{ ч} = 34,5 \text{ лет.}$$

Остаточный ресурс:

$$\tau_{ост} = \tau_{сл} - \tau_{экспл} = 302220 - 168 = 302052 \text{ ч} = 34,4 \text{ лет.}$$

Остаточный ресурс, лет

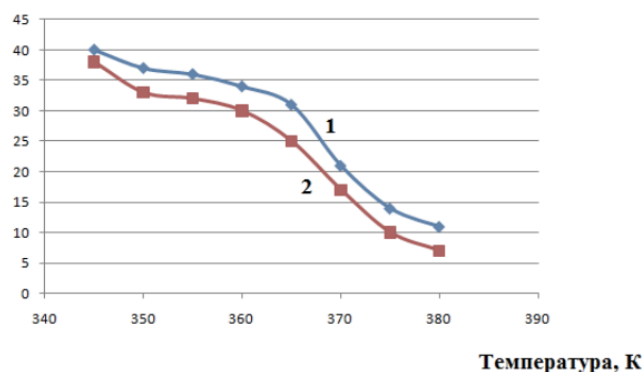


Рис. 2. График зависимости остаточного ресурса от эксплуатационных факторов

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы: погрешность необходимо определить в области рабочих значений измеряемых величин, которыми являются напряжение, токи в жиле и экране и температура поверхности кабеля. Исходя из полученных результатов расчета, с помощью разработанного устройства и математической модели рекомендуется оценивать сроки службы кабелей, эксплуатируемых в умеренном и холодном климате и проложенных в земле. В данном случае оцениваемая погрешность расчета срока службы изоляции составит порядка 8 %.

Литература

1. Койков, С. Н. Электрическое старение твердых диэлектриков / С. Н. Койков, А. Н. Цикин. – М.–Л. : Энергия, 1968. – 186 с.

УДК 621.311.031

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОСТАТОЧНОМУ НАПРЯЖЕНИЮ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ

О. Г. Широков, Т. В. Алфёрова, А. В. Купава

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

Одним из типов кондуктивных электромагнитных помех, определяющих качество электрической энергии в электрических сетях, является провал напряжения. По ранее действовавшему ГОСТ 13109–97 [1] провал напряжения характеризовался показателем *длительности провала напряжения*  $\Delta t_{\text{п}}$ , а также вспомогательными параметрами – *глубиной провала напряжения*  $\delta U_{\text{п}}$  и *частотой появления провалов напряжения*  $F_{\text{п}}$ . Для длительности провалов напряжения  $\Delta t_{\text{п}}$  по [1] была установлена следующая норма: предельно допустимое значение длительности провала напряжения в электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени релейной защиты и автоматики [1].

Введенный в действие ГОСТ 32144–2013 [2] изменения характеристик напряжения, связанные с такими явлениями как провалы напряжения, уже не нормирует. Вместе с тем в соответствии с действующим ГОСТ 32144–2013 при заключении договоров на поставку или передачу электрической энергии следует учитывать статистические данные, относящиеся к характеристикам напряжения, связанным с такими явлениями, как провалы напряжения. Однако статистических данных о характеристиках провалов напряжения в электрических сетях конкретных районов практически нет. В такой ситуации актуальными являются работы, направленные на оценку характеристик провалов напряжения.

В настоящее время на подстанциях электрических сетей установлены цифровые средства регистрации аварийных событий, с помощью которых возможно определять параметры кратковременных нарушений электроснабжения. Например на линиях подстанций Оршанских электрических сетей установлены цифровые регистраторы электрических процессов «ПАРМА РП4.06М», укомплектованные программой Transcor. Программа Transcor предназначена для просмотра и печати файлов осциллограмм, полученных цифровыми регистраторами аварийных процессов. Пример провала напряжения, зарегистрированный регистратором электрических процессов «ПАРМА РП4.06М» и визуализированный программой Transcor, представлен на рис. 1.

Провал напряжения, как правило, связан с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети. Провал напряжения рассматривается по [2] как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность провала напряжения может быть до 1 мин. В соответствии с [2] провалы напряжения классифицируются по остаточному напряжению и длительности.

Длительность провала напряжения – это интервал времени между моментом, когда напряжение в конкретной точке системы электроснабжения падает ниже порогового значения начала провала напряжения, и моментом, когда напряжение возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения.

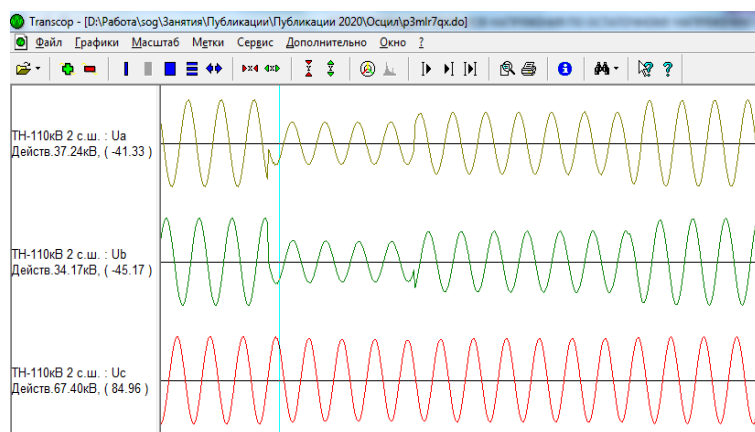


Рис. 1. Пример провала напряжения, зарегистрированный регистратором электрических процессов «ПАРМА РП4.06М» и визуализированный программой Transcor

Остаточное напряжение провала напряжения – это минимальное среднеквадратическое значение напряжения, отмеченное в течение провала напряжения. Остаточное напряжение провала напряжения выражают в процентах опорного напряжения. Опорное напряжение при оценке провалов напряжения считают равным номинальному или согласованному напряжению электропитания [2]. Однако использование номинального или согласованного напряжения при оценке остаточного напряжения провала напряжения в процентах опорного напряжения в общем случае не будет отражать действительное значение изменения напряжения в процессе его провала. Более точно остаточное напряжение провала напряжения в процентах при провале будет выражено при использовании скользящего опорного напряжения сравнения. Скользящее опорное напряжение сравнения (*sliding reference voltage*)  $U_{sr}$  – значение напряжения, усредненное за определенный интервал времени, предшествующий появлению провала напряжения, перенапряжения или быстрого изменения напряжения (ГОСТ 30804.4.30).

Для классификации провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности необходимо учитывать следующее.

В трехфазных системах электроснабжения за начало провала напряжения принимают момент, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового значения начала провала напряжения, за окончание провала напряжения принимают момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения.

Провалы напряжения измеряют в соответствии с ГОСТ 30804.4.30 на основе измерений среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого полупериода.

В электрических сетях низкого напряжения, четырехпроводных трехфазных системах учитывают фазные напряжения; в трехпроводных трехфазных системах учитывают линейные напряжения; в случае однофазного подключения учитывают питающее напряжение (фазное или линейное в соответствии с подключением потребителя).

Пороговое значение начала провала напряжения принимают равным 90 % опорного напряжения.

При измерениях в многофазных системах рекомендуется определять и записывать число фаз, затрагиваемых каждым событием.

## Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 197

Для электрических сетей трехфазных систем следует использовать многофазное сведение данных, которое заключается в определении эквивалентного события, характеризующегося одной длительностью и одним остаточным напряжением.

Пример необходимой информации для классификации провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности в соответствии с требованиями [2] на примере Оршанских электрических сетей с учетом вышеизложенного представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры провалов напряжения в Оршанских электрических сетях**

№ п/п	Дата	Время	Подстанция	В.Л	$U_{ном}$ , кВ	Файл события	Количество фаз	Количество провалов	Фаза А				Фаза В				Фаза С			
									$\Delta t_n$ , с	$U_{оп}$ , кВ	$U_{ост}$ , кВ	$U_{ост}$ , %	$\Delta t_n$ , сек	$U_{оп}$ , кВ	$U_{ост}$ , кВ	$U_{ост}$ , %	$\Delta t_n$ , с	$U_{оп}$ , кВ	$U_{ост}$ , кВ	$U_{ост}$ , %
120	24.04.2013	13:59	Орша-Северная	№ 2 Орша-330	110	p3mlr7qx.do	2	2	0,219	68,53	33,44	49	0,219	68,97	33,35	48	0,219	68,83	65,94	96
156	12.05.2014	18:40	Орша-Северная	№ 1 Орша-330	110	p3n5gwvp.do	2	2	0,216	69,45	36,71	53	0,216	69,9	31,92	46	0,216	69,59	67,88	98
371	12.08.2019	15:34	Орша-КС	КС-2	110	p3pw4iwy.do	3		0,917	67,72	60,79	90	0,787	69,3	61,52	89	0,787	69,32	61,64	89
372	14.08.2019	23:09	Орша-Северная	Задне-провье	110	p3pw8tb9.do	1		0,135	67,36	65,6	97	0,135	68,3	38,3	56	0,135	68,05	66,77	98

В процессе сбора данных по результатам работы цифровых регистраторов «ПАРМА РП4.06М» в Оршанских электрических сетях было получено и обработано 388 аварийных событий, зафиксированных данными регистраторами за период с 14.02.2008 по 02.11.2019. По этим событиям были определены ключевые данные, что позволило классифицировать провалы напряжения по остаточному напряжению и длительности в Оршанских электрических сетях с 14.02.2008 по 02.11.2019 в соответствии с требованиями ГОСТ 32144–2013 (табл. 2).

Таблица 2

**Классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности в Оршанских электрических сетях с 14.02.2008 по 02.11.2019**

Остаточное напряжение $u$ , % опорного напряжения	Длительность провала (прерывания) напряжения $\Delta t_n$ , с					
	$0,01 < \Delta t_n \leq 0,2$	$0,2 < \Delta t_n \leq 0,5$	$0,5 < \Delta t_n \leq 1$	$1 < \Delta t_n \leq 5$	$5 < \Delta t_n \leq 20$	$20 < \Delta t_n \leq 60$
$90 > u \geq 85$	48	5	2	9	–	–
$85 > u \geq 70$	43	17	3	10	–	–
$70 > u \geq 40$	110	16	1	–	–	–
$40 > u \geq 10$	17	9	3	1	–	–
$10 > u \geq 0$	3	–	–	2	1	–

Литература

1. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск : Меж. гос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 31 с. – (Взамен ГОСТ 13109–87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – М. : Изд-во стандартов, 1988).
2. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ). – Минск : Госстандарт, 2015. – 16 с. – (Взамен ГОСТ 13109–97).

УДК 628.984

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНОГО  
РЕСУРСА СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА**

**Т. Н. Савкова, Д. И. Зализный, Г. И. Селиверстов, А. И. Кравченко**

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

Светодиодные светильники (СДС) обеспечивают ряд функций, которые не могут быть реализованы с другими источниками света. В первую очередь это возможность управления яркостью или диммирование с сохранением спектра излучения во всем диапазоне регулировки яркости для освещения помещений [1], [2]. А возможность изменения спектрального состава света в зависимости от фазы роста растения используется для теплиц и парников. СДС для архитектурной подсветки и оформления дизайнерских решений, кроме управления яркостью, могут изменять цвет. Светильники для ЖКХ оснащаются фотоакустическими датчиками или датчиками движения. Все драйверы СДС имеют защиту от перегрева и токовых перегрузок, а использование коррекции коэффициента мощности позволяет повысить КПД преобразования драйвера и уменьшить уровень сетевых помех.

С расширением сфер применения СДС они получают ряд дополнительных возможностей за счет более совершенных систем управления источниками света. Добавление различных датчиков, камер и громкоговорителей расширяет возможности системы освещения и помогает различным службам вести свою работу, заменяя ведомственные узкоспециализированные сенсорные системы. Такие комбинации позволяют не только управлять включением освещения, поддерживать заданный уровень освещенности, экономить электроэнергию, но и одновременно следить за качеством воздуха, дорожным движением и загруженностью парковок, своевременно оповещать коммунальные службы о начавшемся снегопаде, делать звуковые сообщения о чрезвычайных ситуациях и т. д. [3].

В настоящее время в известных источниках нет никакой информации об автоматической системе контроля остаточного ресурса СДС.

В данной работе предлагается усовершенствованная схема СДС, которая позволит в режиме реального времени рассчитывать его остаточный ресурс. Основные составляющие аппаратной части такого светильника приведены на рис. 1.

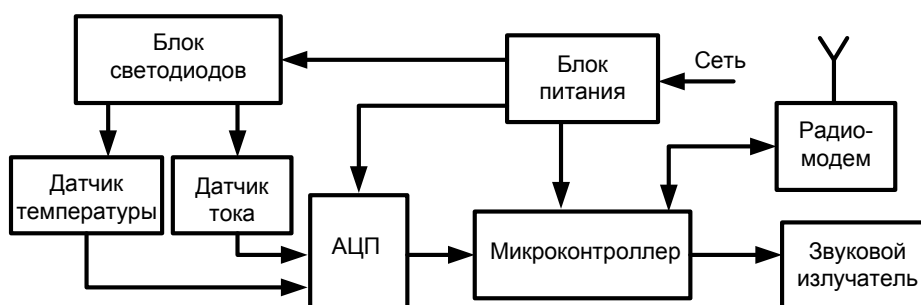


Рис. 1. Структурная схема светодиодного светильника с контролем остаточного ресурса

Система контроля остаточного ресурса СДС работает следующим образом. Блок светодиодов, питающийся постоянным током от блока питания, формирует требуемый уровень светового потока. Значения потребляемого светодиодами тока и температура их наиболее нагретого участка измеряются с помощью соответствующих датчиков. Далее через аналоговые усилители и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) значения измеренных величин поступают в оперативную память микроконтроллера, программное обеспечение которого выполняет необходимые расчеты остаточного ресурса светодиодов по алгоритмам, описанным ниже. Результаты расчетов через встроенный радиомодем по радиоканалу передаются в компьютер или смартфон. При достижении критического значения остаточного ресурса светодиодов может быть включен звуковой излучатель.

Рассмотрим алгоритмы расчета остаточного ресурса светильника в реальном времени.

Для прогнозирования остаточного ресурса СДС вводим коэффициент оптического и теплового износа  $f_i$ , который находится по выражению

$$f_i = \frac{E_i}{E_{\text{норм}}},$$

где  $E_{\text{норм}}$  – нормированное значение срока службы светодиода;  $E_i$  – срок службы светодиодов СДС для  $i$ -го режима работы светодиодов.

Тогда время выработки СДС за период дискретизации  $\Delta t$  равно:

$$E_{\text{выр}} = \frac{\Delta t}{f_i}.$$

Остаточный ресурс определяем по выражению

$$E_{\text{ост}_i} = \Delta t - E_{\text{выр}_i}.$$

Тогда формула для расчета остаточного ресурса СДС будет иметь следующее выражение:

$$E_{\text{ост}} = E_{\text{норм}} - \sum_i E_{\text{ост}_i} = E_{\text{норм}} - \sum_i (\Delta t - E_{\text{выр}_i}).$$

Предлагаемая автоматическая система контроля остаточного ресурса СДС позволяет не только рассчитывать его остаточный ресурс, но и выполнять ряд других полезных операций:

- рассчитывать потребляемую мощность светильника;
- контролировать физический износ светодиодов по сравнению значений их температуры и потребляемой мощности;
- фиксировать время нахождения во включенном состоянии;
- фиксировать количество коммутаций.

Если же блок питания оснастить средствами коммутации тока, то предложенная структура позволит выполнять защиту светильника от перенапряжений в сети.

Предлагаемая автоматическая система контроля остаточного ресурса СДС на основе микроконтроллера исключает существенное повышение стоимости светильников при условии их выпуска крупными сериями, поскольку современные электронные компоненты для рассматриваемых целей имеют относительно невысокую стоимость.

Внедрение предлагаемой системы повысит эксплуатационную надежность СДС, а также позволит своевременно осуществлять их замену, что очень важно для промышленного производства, медицины и сельского хозяйства.

#### Л и т е р а т у р а

1. Самарин, А. Светодиодные драйверы National Semiconductor / А. Самарин // Светотехника и оптоэлектроника. Электронные компоненты. – 2008. – № 3. – С. 64–68. – Режим доступа: [https://russianelectronics.ru/files/48105/ЕК2008\\_03\\_064-69.pdf](https://russianelectronics.ru/files/48105/ЕК2008_03_064-69.pdf). – Дата доступа: 17.09.2020.
2. Гужов, С. В. Перспективы использования светодиодных светильников / С. В. Гужов // Энергосбережение. – 2008. – № 3. – Режим доступа: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5444](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5444). – Дата доступа: 17.09.2020.
3. Современное состояние, тенденции и перспективы развития светодиодов для освещения / С. И. Лишик [и др.] // Светотехника. – 2017. – № 1. – С. 9–17.

УДК 621.316

### **МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ФОТОТИРИСТОРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ДУГОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЯЧЕЙКАХ КРУ (КРУН) 6–35 КВ**

**Т. Г. Сейитлиева**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Короткое замыкание, сопровождаемое электрической дугой, – это наихудшая из аварийных ситуаций, имеющих место в КРУ электрических подстанций, прежде всего по своим разрушающим последствиям.

В настоящее время наиболее часто применяющиеся ячейки КРУ имеют в своем составе выключатели с коммутационной способностью до 31,5 кА. При возникновении дугового перекрытия с такими токами происходит прожигание металла стенок ячеек и перенос повреждения в соседние ячейки. Увеличение термической стойкости за счет утолщения стенок приводит к повышению цены, веса и осложняет монтаж ячеек.

Основные причины возникновения дугового разряда в КРУ классифицируют в виде трех основных групп:

- 1) человеческий фактор (неправильная эксплуатация электроустановок) – проведение работ не в той ячейке (ошибочное), завышение пробивного напряжения



## Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 201

у разрядников 6–10 кВ, установленных на данной секции, отсутствие заземления рабочей области при проведении работ, отсутствие проверки наличия напряжения в рабочей зоне при проведении работ, присутствие в ячейках инструмента, оставленного по забывчивости после проведения работ;

2) причины технического характера (неисправности оборудования) – дефекты, неисправности или некорректная работа оборудования, деградация изоляции и износ оборудования, перенапряжение, перегрев, плохое соединение проводов или шин, неправильная установка оборудования;

3) прочие внешние факторы – появление внутри КРУ (КРУН) животных и птиц (крысы, кошки, собаки, птицы), влага, грязь и пыль в области контактов и шин, загрязнение и увлажнение поверхности малоробристых изоляторов или изоляторов, ранее обожженных дугой, коррозия.

Дуговой столб – это низкотемпературная плазма: смесь атомов, ионов, молекул, а также продуктов синтеза, имеющего место в плазме. Спектральный диапазон излучения достаточно широк: от ультрафиолета (доли мкм) до дальнего ИК (единицы мкм). Вид спектра излучения дуги зависит от ряда составляющих: материала электродов, степени загрязнения, температуры плазмы. Спектр дуги можно представить в виде суперпозиции непрерывного и линейчатого спектров. Из вышеизложенного следует, что, принимая во внимание чувствительность устройств дуговой защиты, нужно оговаривать спектральное окно пропускания фотодетектора, которое будет меняться в зависимости от типа фотодетектора.

Любой фотоприемник излучения можно описать функцией преобразования (токовой чувствительностью):

$$R_{\lambda} = f(\lambda) = A/V_{т},$$

где  $A/V_{т}$  – размерность в системе СИ.

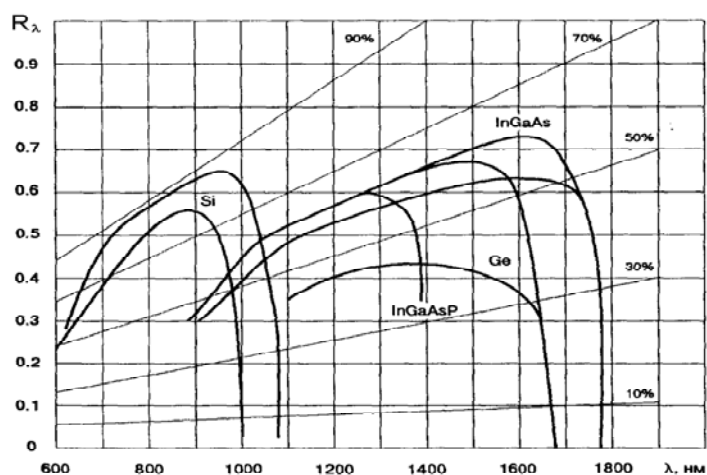


Рис. 1. Спектральная зависимость токовой чувствительности для фотодиодов из различных полупроводниковых материалов

Одним из главных параметров излучения является поток излучения, который определяется энергией излучения, переносимой в единицу времени. Добавление соответствующих нижних индексов в обозначении потока излучения ( $\Phi$ ) позволяет определять этот параметр или как энергетический, или как световой поток. В данном

## 202 Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика

контексте «световой» означает размерность в световых или фотометрических единицах [2].

Энергетический световой поток измеряется в ваттах, световой поток в люменах:  $\Phi_e = [\text{Вт}]$ ;  $\Phi_v = [\text{лм}]$ .

В XIX в. международная комиссия по освещенности ввела понятие относительной спектральной эффективности  $V_\lambda$ , известной под названием «функции видности стандартного наблюдателя» или «кривой МКО» (рис. 2).

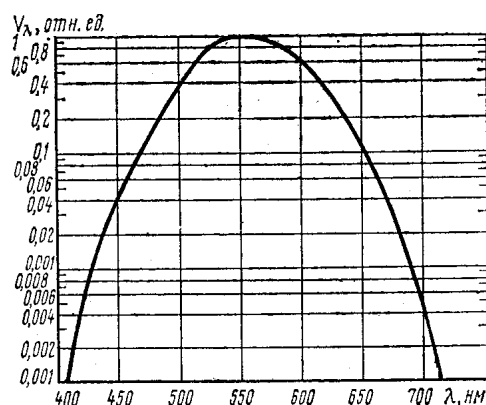


Рис. 2. Относительная функция видности МКО на пике  $1 \text{ Вт} = 680 \text{ лм}$

Эта функция является усредненным спектром пропускания человеческого глаза. Таким образом, излучение любого источника, выраженное в световых единицах, получается путем пропускания энергетического потока излучения источника через фильтр  $V_\lambda$ :

$$\Phi_v = 680 [\text{лм/Вт}] \int_0^\infty (d\Phi_e / d\lambda) V_\lambda d\lambda,$$

где  $d\Phi_e / d\lambda$  – спектральная плотность энергетического потока излучения источника света.

Световые единицы легко преобразовать в энергетические с помощью световой эффективности  $\eta$  – отношения светового потока к энергетическому:

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{\Phi_e}.$$

Для зеленого цвета ( $\lambda = 550 \text{ нм}$ )  $\eta_v = 680 \text{ лм/Вт}$ , для красного ( $\lambda = 655 \text{ нм}$ )  $\eta_v = 60 \text{ лм/Вт}$ .

Устройства дуговой защиты на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД) позволяют формировать широкую полосу пропускания электронного тракта, а также исключать влияние низкочастотного изменения освещенности. В отличие от фототристорной защиты в устройствах дуговой защиты на основе ВОД в зоне дуги находится только пассивный приемник оптического излучения – объектив или линза ВОД, соединенная с электронным блоком устройства оптическим кабелем.

Но и этот вид защиты обладает существенным недостатком – наибольшей стоимостью оборудования и обслуживания. Следует также учесть, что оптическая дуговая защита не точно срабатывает при попадании прямых лучей солнечного света или при зажигании ламп накаливания мощностью 60 Вт на расстоянии далее 10 мм [1].

*Литература*

1. Оптико-электрическая дуговая защита КРУН 6–10 кВ / В. И. Нагай [и др.] // Энергетик. – 2000. – № 8. – С. 38–39.
2. Григорьев, В. А. Волоконно-оптическая дуговая защита ячеек КРУ 6–10 кВ / В. А. Григорьев, В. Е. Милохин, Э. Л. Палей // Энергетик. – 2002. – № 2. – С. 23–24.
3. Серeda, Н. Н. Применение фототиристорov для защиты сетей при дуговых коротких замыканиях / Н. Н. Серeda, В. В. Харитонов // Новые комплектные электротехнические устройства : материалы семинара. – М. : Моск. дом науч.-техн. пропаганды, 1990. – С. 53–57.

УДК 621.313.333

**СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТ ДЛЯ КЛАПАНА ДЫМОУДАЛЕНИЯ**

**В. В. Брель, В. В. Логвин**

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

В клапанах дымоудаления часто используются силовые электромагниты мощностью не более 70 Вт. Это связано с работой системы дымоудаления противопожарного оборудования.

Одним из значимых требований при конструировании клапанов дымоудаления является минимальная потребляемая мощность при заданном усилии и ходе якоря силового электромагнита. Для производителя также важными являются минимальные габариты силового электромагнита. Это приводит к уменьшению себестоимости силового электромагнита.

В настоящей работе рассматривается разработанный авторами силовой электромагнит клапана дымоудаления с улучшенными параметрами и оптимизированными габаритами.

Требования по мощности не более 70 Вт, при тяговом усилии в 70–80 Н и ходе якоря в 5,5 мм сильно ограничивают поиск наилучшей конструкции и сочетания параметров, габаритов и формы силового электромагнита.

Стандартные конструкции, применявшиеся ранее, не обеспечивают соблюдения настоящих требований [1], [2].

Инженерные методы расчета, использующие форсировку электромагнитов постоянного тока, не подходят. В момент форсировки потребление мощности электромагнитом превышает 70 Вт, что недопустимо по техническому заданию.

Инженерные методы расчета магнитных цепей «усредняют» значения тяговых характеристик, что не позволяет проанализировать прирост тяги электромагнита за счет небольшого изменения формы и размеров электромагнита.

Для разработки силового электромагнита при данных технических условиях наилучшим является метод конечных элементов. Он позволяет получать точные значения тяговой характеристики электромагнита при различных изменениях форм и размеров силового электромагнита. Это позволило авторам за счет изменения формы якоря и оптимизации параметров катушки получить дополнительное тяговое усилие и уменьшить объем стали электромагнита.

Авторы улучшили силовой электромагнит для клапана дымоудаления по следующим параметрам: увеличили тяговое усилие в 1,28 раза и уменьшили объем стали в 1,3 раза при этом мощность электромагнита осталась 70 Вт и ход якоря 5,5 мм. Это удешевило себестоимость силового электромагнита клапана дымоудаления на 18 % и повысило надежность срабатывания электромагнита.

Экспериментальные исследования подтвердили правильность полученных математических моделей и выявленных закономерностей.

#### Л и т е р а т у р а

1. Клименко, Б. В. Форсированные электромагнитные системы / Б. В. Клименко. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
2. Соленков, В. В. Асинхронный электродвигатель со встроенным комбинированным тормозным устройством на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты / В. В. Соленков, В. В. Брель // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2011. – № 6. – С. 20–26.

УДК 621.311.031

### **ЦИФРОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**О. Г. Широков, Т. В. Алфёрова, К. В. Керус**

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

Одной из главных задач сетевых предприятий и организаций является бесперебойное снабжение потребителей электрической энергией надлежащего качества. Для выполнения требований надежности необходимо современное высокотехнологичное оборудование. Целью данной работы является обоснование целесообразности применения цифровых трансформаторных подстанций для улучшения качества передаваемой энергии, исключение возможных перебоев в питании потребителей и повышение тем самым надежности работы оборудования подстанций.

Переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления подстанцией позволит создать технологическую инфраструктуру для внедрения информационно-аналитических систем, снизить ошибки недоучета электроэнергии, уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты на обслуживание подстанции, а также повысить электромагнитную безопасность и надежность работы микропроцессорных устройств. Внедрение данных систем обеспечивает более высокую скорость и безопасность передачи информации, взаимозаменяемость отдельных компонентов и повышение надежности всей системы в целом.

Цифровая подстанция (ЦПС) – подстанция, оборудованная комплексом цифровых устройств (терминалов) для решения задач релейной защиты и автоматики (РЗА) и АСУТП – регистрации аварийных событий (РАС), учета и контроля качества электроэнергии, телемеханики. Все оборудование komponуется между собой и центральным сервером объекта по последовательным каналам связи на единых протоколах.

Система автоматизации энергообъекта, построенного по технологии «Цифровая подстанция», делится на три уровня: 1) полевой уровень (уровень процесса); 2) уровень присоединения; 3) подстанционный уровень.

## Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 205

Полевой уровень состоит из:

- первичных датчиков для сбора дискретной информации и передачи команд управления на коммутационные аппараты (micro RTU);
- первичных датчиков для сбора аналоговой информации (цифровые трансформаторы тока и напряжения).

Уровень присоединения ЦПС состоит из:

- устройств управления и мониторинга (контроллеры присоединения, многофункциональные измерительные приборы, счетчики АСКУЭ, системы мониторинга трансформаторного оборудования и т. д.);
- терминалов релейной защиты и локальной противоаварийной автоматики.

Уровень подстанции состоит из:

- серверов верхнего уровня (сервер базы данных, сервер SCADA, сервер телемеханики, сервер сбора и передачи технологической информации и т. д., концентратор данных);
- АРМ персонала подстанции.

Подробная блок-схема организации уровней цифровой подстанции представлена на рис. 1.

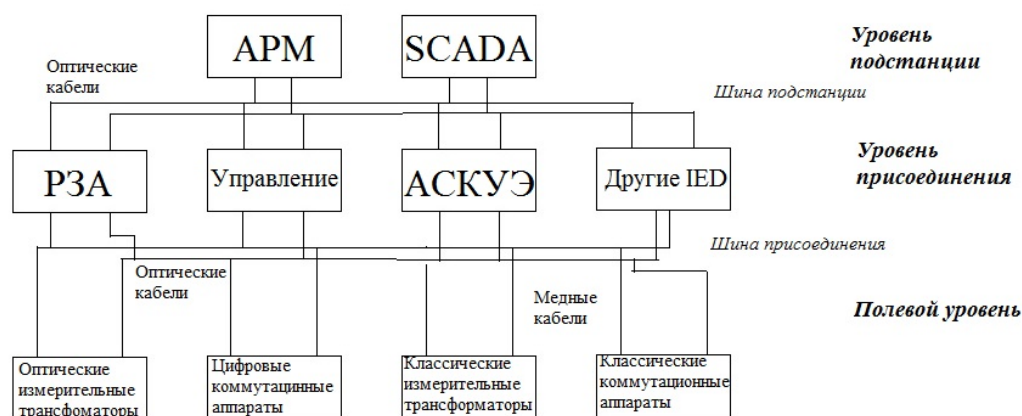


Рис. 1. Блок-схема уровней системы автоматизации ЦПС

В данной работе детально разобрана концепция цифровой подстанции, реализованная на ПС-110 «Приречная» с применением системы Hard Fiber Process Bus – системы выносных модулей ввода/вывода с передачей данных по оптоволоконным кабелям. Система включает в себя МПРЗА, оптические кабели и выносные модули ввода/вывода (УСО), которые получили название Bricks («Кирпичи»). Схема ОРУ 110 кВ ПС – двойная система шин с обходной с семью присоединениями: две ВЛ 110 кВ, три трансформатора, ШСВЭ, ОВЭ. В качестве устройств релейной защиты присоединений 110 кВ были применены микропроцессорные РЗА GE серии UR, в которых платы прямого аналогового ввода были заменены на платы ввода МЭК 61850 (оптический Ethernet). На каждом присоединении 110 кВ установлено по два модуля ввода/вывода (Brick), подключенных к разным клеммам ТТ. Также на них заведены вторичные цепи ТН 1С.Ш. 110 кВ и ТН 2С.Ш. 110 кВ. Переключение с одного ТН на другой производится вручную испытательными блоками в зависимости от фиксации каждого присоединения.

Операции отключения и включения выключателя выполняются контактами Brick по командам устройств РЗА серии GE UR. В каждом Brick имеется четыре

независимых цифровых ядра и, таким образом, к одному Brick можно подключить до четырех устройств защиты по схеме «точка – точка».

Для защиты каждого присоединения используются два одинаковых терминала защиты, каждый из которых может общаться с каждым Brick, установленным на выключателе, т. е. неисправность любого компонента системы не приводит к фатальным последствиям.

Переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления ПС позволит получить целый ряд преимуществ, в том числе:

- существенно сократить затраты на кабельные вторичные цепи и каналы их прокладки, приблизив источники цифровых сигналов к первичному оборудованию;
- повысить электромагнитную совместимость современного вторичного оборудования – микропроцессорных устройств и вторичных цепей благодаря переходу на оптические связи;
- упростить и, в конечном итоге, удешевить конструкцию микропроцессорных интеллектуальных электронных устройств за счет исключения трактов ввода аналоговых сигналов;
- унифицировать интерфейсы устройств IED, существенно упростить взаимозаменяемость этих устройств (в том числе замену устройств одного производителя на устройства другого производителя) и др.

Таким образом, можно сделать выводы о целесообразности использования технологий ЦПС: цифровые подстанции исключают электрические связи между высоковольтным оборудованием и панелями релейной защиты и управления, что создает более безопасные условия работы и в то же время снижает требования к занимаемой площади, затраты на строительство, на монтажные и пусконаладочные работы, на обслуживание всей системы и эксплуатационные затраты. Цифровые подстанции являются ключевым компонентом интеллектуальной сети, в которой появляется все большее количество непостоянных возобновляемых источников электроэнергии, а также помогают повысить безопасность и надежность за счет нового качества предоставляемых данных и сокращения времени принятия решений при авариях.

УДК 536.24

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОСИФОНОВ, ЗАПРАВЛЕННЫХ ХЛАДАГЕНТАМИ**

**А. В. Шаповалов Н. М. Кидун, Т. Н. Никулина**

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

В настоящее время термосифоны используются в промышленности достаточно редко. Объяснить данное явление можно тем, что еще недостаточно изучена физика процессов, протекающих в термосифонах (совместно протекающие процессы теплопроводности, конвекции и фазовых переходов в зонах испарения и конденсации). Помимо этого накопленные знания в данной области представляют собой, как правило, выводы, полученные для конкретных вариантов термосифонов и теплоносителей, конструктивных схем и технических решений [1]. Анализ наиболее значимых результатов исследований теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах показывает, что наиболее значимыми характеристиками их работы являются эффективная теплопроводность или термическое сопротивление [2]–[5].

## Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 207

Цель данного исследования заключается в определении параметров работы эффективных двухфазных замкнутых теплопередающих систем, заправленных хладагентами R134a, R407c, R410a, R404a при разных углах наклона.

**Экспериментальные данные.** Для исследования процессов, протекающих в полости термосифона, на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» был создан экспериментальный стенд, представленный на рис. 1.

На стенде была проведена серия экспериментальных исследований замкнутых двухфазных теплопередающих устройств (термосифона без внутренних циркуляционных вставок и пародинамического термосифона), заправленных озонобезопасными хладагентами R134a, R407c, R404a, R410a, в диапазоне подводимых тепловых потоков 20–135 Вт.

Установленные экспериментальные данные в дальнейшем позволят разработать эффективные теплообменники с двухфазными теплопередающими элементами для их применения в энергетике, холодильной технике, системах вентиляции и кондиционирования, промышленности, с целью уменьшения потребляемой энергии, материалоемкости, а также повышения качества выпускаемой продукции.



*Рис. 1. Экспериментальный стенд*

На рис. 2 представлен график результатов опытных данных для термосифона, заправленного фреонами R134a, R407c, R410a, R404a. Анализ полученного графика позволяет установить зависимость параметров, характеризующих эффективность работы термосифона, в частности термического сопротивления, от свойств фреонов, используемых для их заправки. Изучив свойства используемых для заправки фреонов R134a, R407c, R410a, R404a, было установлено, что наибольшее влияние на значение термического сопротивления термосифона, от которого зависит значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  (обратно пропорциональная зависимость), оказывают такие параметры, как давление  $p$ , плотность  $\rho$ , удельная теплота парообразования  $r$ , динамическая вязкость  $\mu$ , удельная теплоемкость  $c$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  используемой рабочей жидкости.

Анализ экспериментальных данных показал, что термическое сопротивление  $R$  термосифона непрерывно падает с увеличением давления при кипении фреонов. Это свидетельствует о росте коэффициента  $\alpha$  и повышении эффективности процесса теплоотдачи. Однако при низких давлениях зависимость  $\alpha$  от  $p$  менее резкая, чем при высоких.

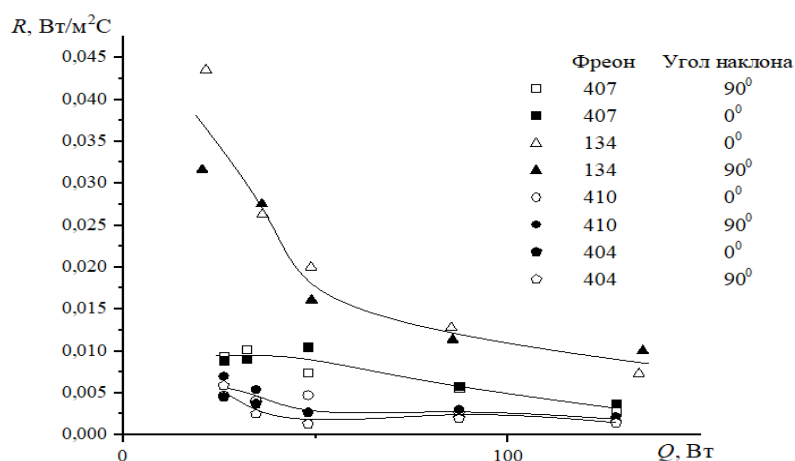


Рис. 2. Зависимость термического сопротивления от подводимого теплового потока для классического и пародинамического термосифона, заправленного фреонами R134A, R407C, R410A при углах наклона 0, 45 и 90 град

Исследование влияния коэффициента теплопроводности  $\lambda$  на значение термического сопротивления термосифона показало, что с ростом  $\lambda$  значение термического сопротивления уменьшается, следовательно, повышается эффективность работы термосифона. Также установлено незначительное уменьшение значения термического сопротивления с увеличением удельной теплоемкости фреона.

Плотность  $\rho$  и динамическая вязкость  $\mu$  фреонов также оказывают непосредственное влияние на интенсивность процесса передачи тепла в двухфазных теплопередающих устройствах, в частности фреон R134a с наибольшим значением плотности имеет наибольшие значения термических сопротивлений на всем диапазоне подводимых мощностей. Для фреонов R407c, R410a, R404c было установлено, что изменение угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости не влияет на теплопередающие характеристики термосифона, термические сопротивления для указанных выше хладагентов имеют близкие значения и колеблются в диапазоне  $0,0025\text{--}0,012 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$  при подводимой тепловой нагрузке 20–135 Вт.

Влияние всех вышеуказанных параметров в большей степени проявляется в диапазоне небольших подводимых мощностей до 50 Вт. С ростом подводимой нагрузки значение термического сопротивления термосифона становится более стабильным и практически не меняется на всем диапазоне.

В рамках данного исследования также проводились эксперименты с замкнутыми двухфазными теплопередающими устройствами (термосифона без внутренних циркуляционных вставок и пародинамического термосифона), заправленными дистиллированной водой (рис. 3), которые показали, что угол наклона термосифона оказывает большое влияние на теплопередающие характеристики термосифона, а также термическое сопротивление в термосифонах, заправленных дистиллированной водой значительно ниже по сравнению с термическим сопротивлением термосифонов, заправленных хладагентами R407, R410, R404.

Классический термосифон (рис. 3, а) на всем диапазоне подводимых мощностей работает в оптимальном режиме с наименьшим термическим сопротивлением в вертикальном положении, т. е. при угле наклона 90°. Изменение положения термосифона без внутренних циркуляционных вставок, заправленного водой, целесообразно



разно только при значении подводимой нагрузки от  $400 \text{ Вт/м}^2$ , так как в диапазоне величин  $Q$  до  $400 \text{ Вт/м}^2$  не достигнуты оптимальные параметры работы устройства: объема пара, образующегося при кипении в испарителе, недостаточно для стабильной циркуляции теплоносителя, поэтому происходит быстрое охлаждение пара и не хватает движущей силы для проталкивания конденсата.

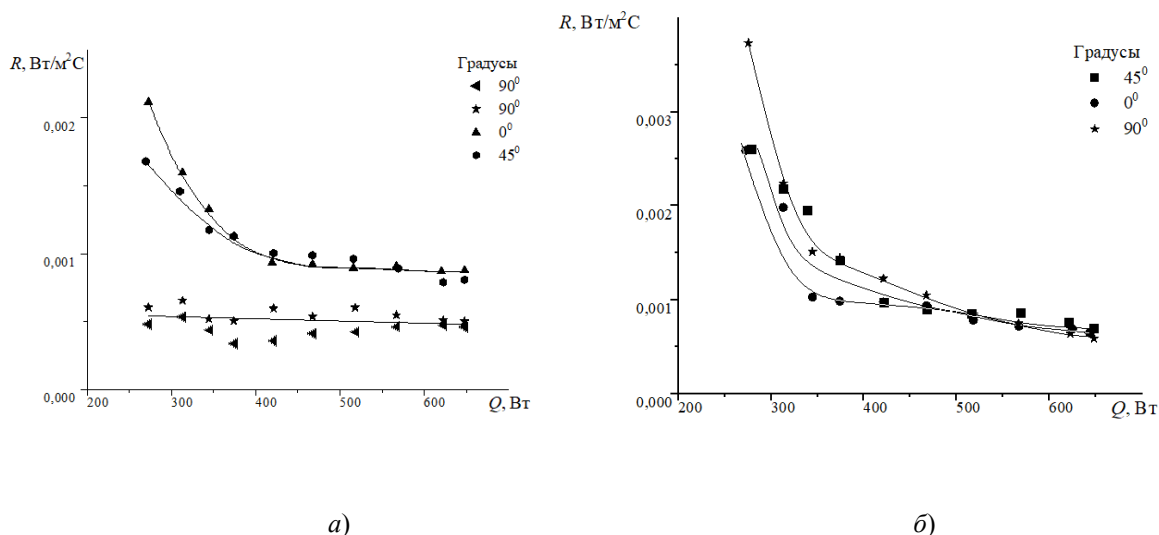


Рис. 3. Зависимость термического сопротивления от подводимого теплового потока:

*a* – классического термосифона, заправленного водой, при углах наклона 0, 45 и 90 град; *б* – для пародинамического термосифона, заправленного водой, при углах наклона 0, 45 и 90 град

Пародинамический термосифон, заправленный дистиллированной водой (рис. 3, б), работает в оптимальном режиме с наименьшим термическим сопротивлением в диапазоне мощностей от  $350 \text{ Вт/м}^2$  и выше и при уменьшении угла наклона до  $0^\circ$ , т. е. в горизонтальном положении термосифона.

#### Литература

1. Noie, S. H. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosiphon / S. H. Noie // Appl Therm Eng. – 2005. – Vol. 25. – P. 495–506.
2. Кузнецов, Г. В. Режимы смешанной конвекции в замкнутом двухфазном термосифоне цилиндрической формы / Г. В. Кузнецов, М. А. Аль-Ани, М. А. Шеремет // Изв. ТПУ. – 2011. – Т. 318, № 4. – С. 18–23.
3. Jouhara, H. Experimental investigation of small diameter two phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283 / H. Jouhara, A. J. Robinson // Applied Thermal Engineering. – 2010. – Vol. 30. – P. 201–211.
4. Sobhan, C. B. A review and comparative study of the investigations on micro heat pipes / C. B. Sobhan, R. L. Rag, G. P. Peterson // Int J Energy Res. – 2007. – Vol. 31. – P. 664–688.
5. Xue, Z. H. High performance loop heat pipe with flat evaporator for energy-saving cooling systems of supercomputers / Z. H. Xue, W. Qu, M. H. Xie // J. Heat Transfer. – 2020. – No. 142 (3): 031901. – 7 p.

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ТОПЛИВНОГО ХОЗЯЙСТВА ГОМЕЛЬСКОГО  
ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА**

**А. В. Шаповалов, Н. З. Заглубоцкий, О. Ю. Морозова**

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

Целью работы является анализ эффективности планируемых мероприятий по реконструкции топливного хозяйства котельных, функционирующих в пиковом и основном режимах выработки и распределения тепловой энергии, Гомельского теплофикационного комплекса (далее –ТФК) при переводе их с мазутного на печное бытовое топливоснабжение в качестве резервного либо аварийного.

Данное направление модернизации является чрезвычайно актуальным, как в рамках решения вопросов энергоэффективности производства тепловой энергии, так и в экономическом и экологическом аспектах функционирования топливного хозяйства.

В частности, Протоколом заседания Республиканской комиссии по контролю за осуществлением расчетов за природный газ, электрическую и тепловую энергию Совета Министров Республики Беларусь от 26.06.2011 г., в целях экономии топливно-энергетических ресурсов Министерству энергетики было поручено исключить сжигание топлива на поддержание мазутного хозяйства на пиковых котельных.

Кроме того, Гомельским областным комитетом природных ресурсов и охраны окружающей среды 17.05.2018 г. были даны рекомендации о замене резервного мазутного источника топливоснабжения пиковых котельных на альтернативный, так как массовая доля выбросов серы в окружающую среду, образующаяся при сжигании мазута используемой марки, является крайне высокой (от 2,5–3 % и более), а в соответствии с экологическими нормами и правилами (ЭкоНиП), утвержденными Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды от 18 июля 2017 г., нормы выбросов диоксида серы при сжигании жидкого топлива для котельных установок (КУ) номинальной мощностью более 100 МВт, введенных в эксплуатацию в определенные сроки, должны соответствовать следующим значениям:

- для КУ, введенных в эксплуатацию с 1.01.1975 до 1.07.2006 –  $850 \text{ мг/м}^3$  (0,85 %);
- для КУ, введенных в эксплуатацию с 1.07.2006 до 31.12.2018 –  $400 \text{ мг/м}^3$  (0,4 %);
- для КУ, введенных в эксплуатацию с 1 января 2019 г. –  $200 \text{ мг/м}^3$  (0,2 %).

Также установлено, что в настоящее время из-за глубокой переработки мазута на белорусских нефтеперерабатывающих заводах условная вязкость мазута марки М-100 при 100 °С составляет более 6,8 ВУ. Для его устойчивого горения требуется повысить температуру разогрева со 125 °С, как было ранее и на которую были спроектированы подогреватели мазута и горелки котлов, до 135 °С и более. Помимо этого для применения мазута высокой вязкости требуется выполнить реконструкцию мазутного хозяйства и горелок котлов, а также увеличить расход пара, а, следовательно, и топлива на его разогрев. В процессе эксплуатации на теплотехническом оборудовании мазута глубокой переработки, который используется на котельных установках, было выявлено, что использование подобного высоковязкого мазута приводит к физическому загрязнению и порче оборудования.

Решение об изменении резервного источника топливоснабжения на ряде котельных Гомельской области было задокументировано в «Схеме теплоснабжения г. Гомеля на 2025 г. с перспективой до 2030 г.» (далее – Схема), разработанной РУП «БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ» и утвержденной Министерством энергетики

## **Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 211**

Республики Беларусь в 2018 г. В соответствии с указанной Схемой, на печное бытовое топливо (далее – ПБТ) планируется перевести:

- пиковую котельную «Западная», на которой ПБТ будет использоваться в качестве аварийного топлива с требуемым суммарным объемом не менее 558 м<sup>3</sup>;
- пиковую котельную «Северная» с использованием ПБТ в качестве аварийного источника топливоснабжения суммарным объемом не менее 611 м<sup>3</sup>;
- Гомельскую ТЭЦ-1, на которой ПБТ планируется использовать в качестве резервного топлива в суммарном объеме не менее 1200 м<sup>3</sup>;
- районную котельную «Черниговская» – с ПБТ в качестве резервного топлива запасом не менее 460 м<sup>3</sup> (5-суточный запас) при доставке автомобильным транспортом и 943 м<sup>3</sup> (10-суточный запас) при доставке по железной дороге.

Процесс перехода с мазута на ПБТ в качестве резервного либо аварийного вида топлива является перспективным проектом для Гомельского ТФК, и в настоящее время основные аспекты и направления его реализации оцениваются на базе районной котельной «Черниговская».

В соответствии с заданием на проектирование (далее – Задание), которое разработано на основании Акта-предписания № 10/16 от 27.05.2016 УНРОЭЭиТС ГПО «Белэнерго», в качестве топливоиспользующего оборудования на указанной котельной планируется задействовать два водогрейных котла ПТВМ-30М, которые уже имеются в мазутном хозяйстве данной котельной, что позволяет значительно сэкономить финансовые и технические ресурсы на переоснащение котельной при реконструкции топливного хозяйства. Кроме того, предусматривается использование существующих мазутных резервуаров для хранения ПБТ.

Особенно важным является разработка мер по предотвращению застывания топлива в резервуарах и трубопроводах ПБТ при отрицательных температурах наружного воздуха. Хотя температура застывания ПБТ в зависимости от календарного периода не превышает значения –15 °С с 1 октября по 31 марта и –5 °С с 1 апреля по 30 сентября, что исключает затраты на его постоянный разогрев (при соблюдении правил хранения) и, соответственно, значительно снижает затраты на собственные нужды топливного хозяйства по сравнению с мазутом, который застывает уже при температуре порядка +25 °С, однако с целью сохранения качества топлива предполагается использовать средства обогрева, которые должны обеспечивать также и пожарную безопасность. Помимо этого, предусматривается оборудование резервуаров и трубопроводов теплоизоляцией.

Положительным моментом, позволяющим использовать уже существующий объект котельной и, соответственно, снизить экономические затраты на переоснащение при переходе с мазута на ПБТ, является 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 осуществляется в соответствии с требованиями действующих НТД и ТНПА, с учетом требований промышленной безопасности и охраны труда.

Также предполагается осуществить очистку внутренних поверхностей не демонтируемых трубопроводах мазутного хозяйства, нулевой емкости от остатков мазута для обеспечения возможности использования ПБТ, что также позволит снизить финансовые вложения на реконструкцию. При этом необходимо предусмотреть замену мазутных форсунок существующих котлов ПТВМ 30М с учетом сжигания ПБТ.

Все проектируемое оборудование должно соответствовать требованиям, установленным действующими правилами по технике безопасности и охране труда, по обеспечению пожарной и промышленной безопасности оборудования и топливных резервуаров, СНБ 3.02.01–98 и другим ТНПА, действующим в Республике Беларусь.

Планируемая реконструкция будет осуществлена в условиях действующего предприятия – районной котельной «Черниговская» филиала «Гомельские тепловые сети» РУП «Гомельэнерго». Режим работы РК «Черниговская» – круглосуточный, круглогодичный.

Принимая во внимание все вышеизложенное, эффективность мероприятий по реконструкции резервного топливного хозяйства котельных Гомельского теплофикационного комплекса на примере районной котельной «Черниговская» при переводе с мазутного на печное бытовое топливоснабжение является перспективным ввиду: обеспечения соответствия экологическим нормативам, регламентируемым ЭкоНиП; уменьшения материальных вложений на разогрев топлива и поддержание работоспособности оборудования; минимальных затрат на модернизацию существующих элементов котельного оборудования.

УДК 536.24

### **ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОСИФОННЫХ СИСТЕМ С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

**А. В. Шаповалов, К. А. Светличный**

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

В последнее время в различных теплообменных установках применяются замкнутые, герметичные устройства с испарительно-конденсационным циклом, заправленные промежуточным теплоносителем. Утилизация тепла с помощью таких устройств (тепловых труб и термосифонов) представляет определенный интерес. На основе двухфазных теплопередающих устройств возможно разработать энергосберегающие системы термотрансформации (абсорбционные холодильные установки и тепловые насосы, системы когенерации и тригенерации энергии), использующие нетрадиционные возобновляемые источники энергии, а также сбросную теплоту промышленных и коммунально-бытовых предприятий.

В теплообменниках, изготовленных с использованием термосифонов, достигается передача больших тепловых потоков благодаря эффективной теплопроводности устройств, так как скрытая теплота парообразования велика. Несмотря на простоту идеи, исполнение теплообменников может быть крайне разнообразным и зависит от схемы применения и используемых теплопередающих сред.

При определенных условиях теплообменный аппарат на основе термосифонов можно использовать вместо кожухотрубчатых и пластинчатых теплообменников, так как они обладают следующими преимуществами: высокий коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности термосифона (за счет фазового перехода теплоносителя в термосифоне) и высокий коэффициент теплопередачи от испарителя к конденсатору термосифона; способностью быстро выходить на рабочий режим; способностью работать при малом градиенте температур.

Рассмотрим возможное применение теплообменного аппарата с термосифонами в гелиоколлекторах для нужд горячего водоснабжения, схема которого приведена на рис. 1.

## Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 213

В данной схеме солнечный коллектор 1 является основным источником теплоты для нужд ГВС. Сконденсировавшийся теплоноситель, которым заправлен термосифон, отдает теплоту воде контура ГВС через теплообменник, установленный в бойлере косвенного нагрева 8. В случае неиспользования горячей воды бойлер служит баком-аккумулятором. Так как температура горячей воды у потребителей не должна превышать 70 °С, устанавливается термостатический трехходовой клапан 7.

Данный тип коллекторов способен работать в зимнее время, так как специальное селективное покрытие помогает воспринимать малейшее тепло, вакуум помогает максимально сократить тепловые потери, а антифриз не замерзает при минусовых температурах.

В случае плохой погоды в качестве дублирующих источников теплоты могут быть использованы котлы, работающие на различных видах топлив либо ТЭНы, которые догреют воду до необходимой температуры. Подключение котлов, как дублирующих источников теплоты, осуществляется по отдельному контуру. При использовании ТЭНа необходима установка магниевого анода для предотвращения образования накипи и образования коррозии на ТЭНе. Для осуществления циркуляции в контуре устанавливаются рециркуляционные насосы 2, которые управляются с помощью блока управления 3.

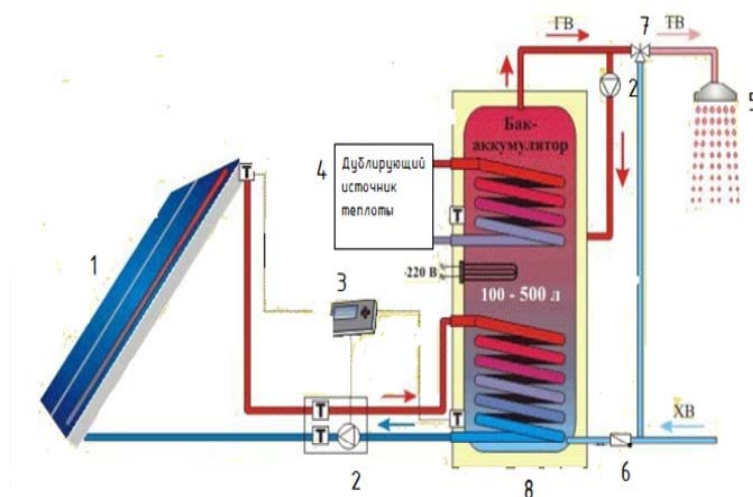


Рис. 1. Схема подключения термосифонного гелиоколлектора к системе ГВС

Термосифонные системы в составе солнечных коллекторов возможно использовать и для получения холода в абсорбционных холодильных машинах. Источником энергии для таких машин является тепловая энергия теплоносителей, в качестве которых применяются вода и водяной пар, горячие дымовые газы и т. д.

Под руководством профессора А. В. Дорошенко в учебно-научном Институте холода, криотехнологий и экоэнергетики имени В.С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий разрабатываются альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха с использованием абсорбционного цикла. Одноступенчатая абсорбционная холодильная машина (АБХМ) с использованием солнечной энергии, предназначенная для кондиционирования помещений, представлена на рис. 2 [3].

Отличительной особенностью рассматриваемой установки является применение совмещенного солнечного коллектора 1 с фотоэлектрической панелью 2, подключенной к аккумулятору 4 через контроллер 3 к инвертору 5. В остальном работа солнечной АБХМ не отличается от традиционной.

Использование солнечного излучения в АБХМ позволяет снизить эксплуатационные расходы на вентиляцию и кондиционирование помещений.

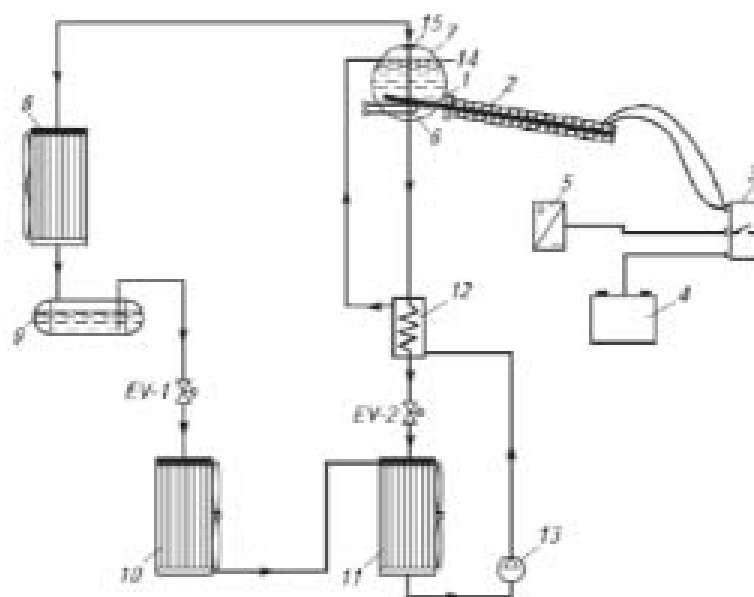


Рис. 2. Принципиальная схема холодильной установки с использованием солнечной энергии [3]:

- 1 – солнечный коллектор; 2 – фотоэлектрическая панель; 3 – контроллер;  
4 – аккумулятор; 5 – инвертор; 6 – нагреватель; 7 – генератор;  
8 – конденсатор; 9 – ресивер; 10 – испаритель; 11 – адсорбер;  
12 – теплообменник; 13 – насос бинарного раствора;  
14 – распылитель; 15 – каплеуловитель

Таким образом, применение теплообменников на базе двухфазных термосифонов находит место в различных отраслях промышленности из-за своих преимуществ, описанных выше, тем самым обеспечивая меньшую металлоемкость теплообменного оборудования, продлевая время работы установки в целом и улучшая ее технико-экономические показатели.

#### Литература

1. Аварийное расхолаживание реакторной установки АЭС с ВВЭР при полном длительном обесточивании энергоблока / И. И. Свириденко [и др.] // Вестн. НТУУ (КПИ). Серия машиностроения. – 2002. – № 43. – С. 198–201.
2. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. – Киев : Факт, 2005. – 704 с. : ил.
3. Горин, А. Н. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха / А. Н. Горин, А. В. Дорошенко. – Донецк : Норд-Пресс, 2006. – 341 с.

## СЕКЦИЯ 6. РАЗРАБОТКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 622.276:658.58(476)

### РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ПОЛИРОВАННОГО ШТОКА УСТАНОВКИ ШТАНГОВОГО ГЛУБИННОГО НАСОСА

В. С. Горбаченко

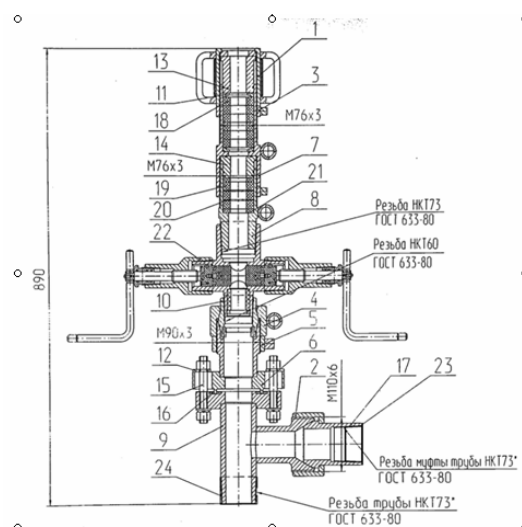
*РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»  
БелНИПИнефть, г. Гомель*

В процессе добычи нефти с использованием установок штанговых глубинных насосов возникает осложнение, вызванное проявлением утечек нефти и газа по уплотняющей полированный шток части устьевого оборудования. Данное осложнение в первую очередь вызвано появлением в процессе работы установки штангового глубинного насоса (УШГН) некоторого зазора между полированным штоком и боковой стенкой внутреннего отверстия сальникового уплотнителя. Таким образом, при поднятии колонны насосных штанг и, соответственно, росте устьевого давления, через образовавшееся незначительное отверстие начинает поступать добываемая скважинная продукция.

В случае появления зазора между полированным штоком и пакетом сальников устьевого герметизатора можно выделить следующие отрицательные факторы (рис. 1): 1) утечки нефти и газа; 2) загрязнение окружающей среды; 3) снижение качества покраски (увеличение скорости наружной коррозии устьевого оборудования), нанесенной на поверхность устьевого оборудования.



*Рис. 1. Утечки нефти  
в случае износа сальников  
устьевого герметизатора*



*Рис. 2. Сальник устьевого  
с самоустанавливающейся  
головкой*

Выделенные факторы подчеркивают актуальность направления по повышению качества герметизации полированного штока.

В НГДУ «Речицанефть» в качестве устройства для герметизации полированного штока применяется сальник устьевого с самоустанавливающейся головкой (рис. 2), который представлен винтом 1, гайкой 2, контргайками 3 и 5, компенсатором радиальным 6, корпусами 7 и 8, тройником 9, компенсатором угловым 10, шайбами 11 и 12, втулками 13 и 14, шпильками 15, прокладками 16 и 20, ниппелем 17, пакетами сальниковых набивок 18 и 19, кольцом 21, превентором малогабаритным 22, пробкой 23, крышками 24.

При износе пакета сальников, что проявляется утечками скважинной жидкости, производится поджатие пакета сальников 18 и 19 путем закручивания винта 1 и корпуса 7 соответственно. При поджатии винта 1 и корпуса 7 происходит поперечное сжатие пакета сальниковых набивок, что приводит к некоторому объемному перераспределению сальников в закрытых корпусах 7 или 8. Эти мероприятия позволяют на некоторое время увеличить срок службы сальниковой набивки. Однако процесс герметизации полированного штока пакетом сальниковых уплотнителей ограничен физическими свойствами техпластины (модулем сдвига  $G$  и модулем Юнга  $E$ ) 2Н-II-ТМКЩ-С ГОСТ 7338–90, которая используется в качестве уплотняющего материала.

Анализируя опыт по эксплуатации различных конструкций устьевого герметизаторов, в том числе и выше рассматриваемого сальника устьевого с самоустанавливающейся головкой (СУСГ), была предложена и разработана следующая конструкция для герметизации полированного штока (рис. 3).

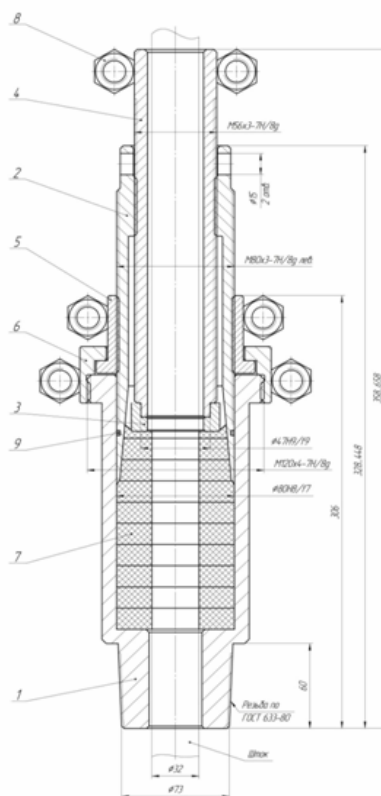


Рис. 3. Устройство для герметизации полированного штока



Разработанное устройство для герметизации полированного штока ШГН (УГПШ) состоит из корпуса 1 (который соединяется с малогабаритным превентором) уплотнительной части 2, упорной части 3, винта регулировочного 4, гайки зажимной 5, гайки упорной 6 и сальников 7.

Отличительная особенность разработанного УГПШ от уплотнительной части СУСГ заключается в том, что при поджатии пакета сальниковой набивки происходит как поперечное, так и продольное сжатие сальников. Продольное сжатие сальниковой набивки выполняется за счет конструктивной особенностью УГПШ, а именно наличием конической уплотнительной части 2.

При износе пакета сальниковой набивки 7 в корпусе 1 УГПШ выполняется поджатие сальников. Для этого необходимо выкрутить на несколько оборотов винт 4 из уплотнительной части, затем на несколько оборотов закрутить гайку зажимную 5. При зажатии гайки 5 происходит продвижение конической уплотнительной части 2 внутрь корпуса УГПШ, что приводит к обжатию сальниковой набивки с боковой стороны.

Таким образом, по причине создания дополнительного продольного сжатия сальниковой набивки происходит увеличение срока службы одного пакета сальниковой набивки.

По данной разработке в 2018 г. в НГДУ «Речицанефть» было подано рацпредложение по совершенствованию устройства для герметизации полированного штока УШГН, после чего было проведено ОПИ на скважинах № 83 Давыдовского н. м. (с 24.10.2019 г.), № 157 Н. Давыдовского н. м. (с 17.10.2019 г.) и № 136 Вишанского н. м. (с 14.11.2019 г.).

Итогом ОПИ стали следующие результаты:

1. Скважина № 83 Давыдовского н. м. эксплуатируется НВ-44,  $L = 3$  м,  $N = 4$  об./мин,  $Q = 16$  м<sup>3</sup>/сут, анализ проб: обводненность 52÷91 %, удельный вес 1,176÷1,183 г/см<sup>3</sup>. Период замены сальников до установки УГПШ в среднем составлял шесть суток, а после установки УГПШ составил 40 суток (*технологический эффект выше в 6,5 раза*).

2. Скважина № 157 Н. Давыдовского н. м. эксплуатируется НВ-32,  $L = 3$  м,  $N = 6,4$  об./мин,  $Q = 17$  м<sup>3</sup>/сут, анализ проб: обводненность 83÷99 %, удельный вес 1,2÷1,218 г/см<sup>3</sup>. Период замены сальников до установки УГПШ составлял одни сутки, а после установки УГПШ составил семь суток (*технологический эффект выше в 7 раз*). Скважина переведена в контрольный фонд с 05.05.2020 г.

3. Скважина № 136 Вишанского н. м. эксплуатируется НВ-38,  $L = 2,5$  м,  $N = 6,4$  об./мин,  $Q = 13$  м<sup>3</sup>/сут, анализ проб: обводненность 90÷95 %, удельный вес 1,174÷1,186 г/см<sup>3</sup>. Период замены сальников до установки УГПШ составлял 10 суток, а после установки УГПШ составил 55 суток (*технологический эффект выше в 5,5 раза*).

На основании проведенных ОПИ можно сделать вывод, что испытываемый УГПШ на скважинах ЦДНГ-3 НГДУ «Речицанефть» зарекомендовал себя с положительной стороны, показательно увеличил срок эксплуатации единичного комплекта сальниковых уплотнений при работе в высокообводненной и высокоминерализованной среде.

В 2020 г. планируется установить УГПШ на осложненных скважинах ЦДНГ-3, а также несколько УГПШ на скважинах в ЦДНГ-1 и ЦДНГ-2 НГДУ «Речицанефть» с целью проведения опытных испытаний.

Применение УГПШ позволил достичь следующих положительных результатов:

1) уменьшение объема производимых сальниковых уплотнителей для герметизации полированного штока УШГН;

2) снижение количества остановок УШГН с целью замены сальниковых уплотнителей, что в свою очередь определяет производительность фонда скважин;

3) уменьшение негативного воздействия на окружающую среду путем снижения выбросов в окружающую среду.

Также даны рекомендации по замене кольцевых сальниковых уплотнителей на резиновый шнур прямоугольного или круглого сечения, что позволит достичь значительных положительных показателей.

УДК 622.276.6

### **ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ В УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Д. В. Ткачѳв, А. И. Гавриленко, П. М. Галко, Н. О. Баранова**

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

Опыт разработки нефтяных месторождений РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», представленных неоднородными по фильтрационно-емкостным свойствам карбонатными и терригенными коллекторами, показывает, что поддержание высоких темпов добычи нефти требует разработки более совершенных и эффективных методов воздействия на продуктивные пласты. По мере выработки активных запасов увеличивается доля трудноизвлекаемых, около 40 % которых составляют запасы, сосредоточенные в низкопроницаемых коллекторах. Традиционные методы воздействия на призабойную зону пластов (ПЗП) с пониженными фильтрационными свойствами путем кислотных обработок не приносят желаемого результата. В таких условиях, на основе теоретических исследований и промысловых испытаний, для выполнения геолого-технических мероприятий (ГТМ) по интенсификации притока наиболее эффективны технологии комплексного воздействия на пласт, сочетающие в одном процессе реагентное (химическое) и частотное (импульсное) воздействие с использованием различных гидродинамических скважинных генераторов колебаний давления (пульсаторов).

Стоит отметить, что в большинстве случаев, у известных конструкций скважинных генераторов отсутствуют обоснованные параметры генерируемых колебаний давления. Чаще всего испытание разработанного и изготовленного образца сводится непосредственно к проведению обработок скважин, по результатам которых делается заключение о практической ценности той или иной конструкции, а затем на его основе выдаются рекомендации к внедрению. Использование недостаточно обоснованных технологий, отсутствие объективных данных о параметрах рекомендуемых генераторов колебаний приводят к снижению успешности перспективного метода и, как следствие, к падению интереса к нему со стороны нефтегазодобывающих предприятий.

Целью данной работы была разработка оборудования и технологии струйно-импульсного воздействия (СИВ) на пласт с применением ротационного пульсатора для повышения эффективности ГТМ по интенсификации притока. При работе разработанного устройства за счет импульсного кругового движения скважинной жидкости и (или) химического реагента должны происходить размыв призабойной зоны, деформации трещин пласта, а также создаваться дополнительная сеть трещин для улучшения фильтрационных свойств.

Наибольшие импульсы давления возникают при совпадении устьев насадок пульсатора с устьями перфорационных каналов – затопленная турбулентная струя рабочей жидкости, бьющая в тупик [1]. При неподвижном позиционировании пульсатора в скважине такой вариант носит случайный характер. Для повышения вероятности совпадения струи рабочей жидкости с перфорационным каналом применяют ротационные пульсаторы, отличающиеся наличием вращающейся головки с рабочими соплами. При этом обеспечивается воздействие на всю поверхность обсадной колонны.

Известны устройства ротационного типа, позволяющие генерировать импульсы давления в ПЗП [2]–[6]. Следует отметить, что подобное технологическое оборудование зарубежных сервисных компаний отличается высоким качеством изготовления и уровнем технических характеристик. Однако стоимость оборудования и сервисных услуг сопоставимы с рентабельностью достигаемых результатов.

В 2018–2019 гг. в БелНИПИнефть совместно с ГГТУ им. П. О. Сухого была выполнена разработка оборудования для реализации технологии струйно-импульсного воздействия на пласт. Суть технологии заключается в формировании импульсного кругового движения скважинной жидкости или химического реагента за счет прокачки ее через пульсатор ротационный. В результате этого в интервале установки пульсатора (в ПЗП) происходит размыв породы, деформация трещин пласта, создается дополнительная сеть трещин для улучшения фильтрационных свойств.

С учетом недостатков, выявленных в конструкциях описанных выше устройств, был предложен вариант исполнения пульсатора ротационного с одиночным турбинным колесом (рис. 1). Далее приведен принцип работы пульсатора. Нагнетаемая жидкость поступает к пульсатору по колонне НКТ и по тангенциально расположенным отверстиям подводится к лопаткам турбинного колеса. Поток жидкости образует крутящий момент на турбинном колесе и приводит его во вращение. Турбинное колесо через вал связано с корпусом форсунок. Нагнетаемая жидкость после взаимодействия с лопатками турбинного колеса через вал направляется в корпус форсунок. Истекающая из форсунок жидкость распыляется струями. Все струи образуют распыляющиеся факелы с образованием эффекта кавитации и, следовательно, к появлению высокочастотной составляющей колебаний давления истекающей жидкости.

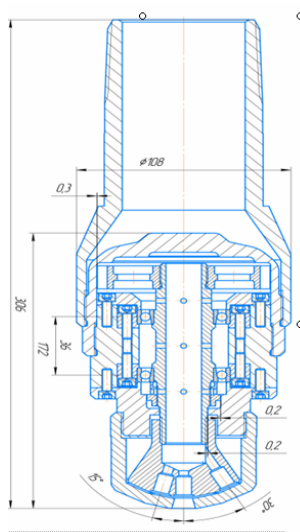


Рис. 1. Общий вид пульсатора с турбинным колесом

При разработке пульсатора ротационного было выполнено численное моделирование гидродинамических процессов в камере ротационного пульсатора. Анализ профиля скоростей течения рабочей жидкости (рис. 2) показал невысокие гидравлические сопротивления на пульсаторе. Для оценки гидравлического сопротивления корпус форсунок с установленными форсунками и скобой были исключены из рассматриваемой модели. В результате расчета было установлено, что вращающий момент составил  $65 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , осевая сила –  $380 \text{ Н}$ .

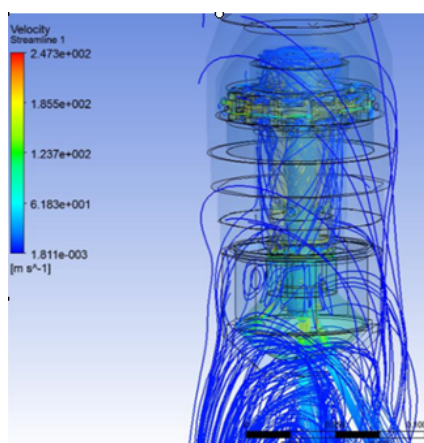


Рис. 2. Линии тока в моделируемой области пульсатора, м/с

По результатам расчетов оборудования и выполненного моделирования процессов был изготовлен пульсатор ротационного типа (рис. 3, а) и проведены стендовые испытания (рис. 3, б). Испытания изготовленной конструкции данного пульсатора полностью подтвердили его работоспособность и соответствие характеристик техническому заданию, допустимое гидравлическое сопротивление, наглядное наличие пульсаций рабочей жидкости при апробации на открытом воздухе (визуально зафиксировано вращение корпуса форсунок на всех режимах испытания, при повышении расхода насосного агрегата с 3 до 7 л/с происходит увеличение скорости вращения вала в 1,5–2 раза). По результатам стендовых испытаний пульсатор ротационный был рекомендован для проведения опытно-промышленных испытаний (ОПИ) в скважинных условиях.



Рис. 3. Пульсатор ротационный (а) и стендовые испытания (б)

Испытания технологии были проведены на трех объектах НГДУ «Речица-нефть»: скважины 5п и 3 3-Сосновского и 25 Чкаловского месторождений. Ревизия ротационного пульсатора после интенсифицирующего воздействия показала минимальный износ его конструктивных элементов (незначительно увеличился диаметр тангенциальных отверстий обтекателя на 1,5–2,0 мм, а также были отмечены следы коррозионного воздействия кислотным составом на корпус обтекателя). То есть можно говорить о том, что ресурс устройства составит не менее пяти скважино-операций при аналогичных объемах и режимах закачки, а также коррозионной активности рабочей жидкости (кислотного состава).

Эффективность всех выполненных работ на скважинах оценивалась по полученной дополнительной добыче нефти относительно базовой или планируемой. Данные по эффективности представлены в таблице.

Анализ результатов выполненных работ (см. таблицу) показал достаточно высокую эффективность работ как в плане получения дополнительной добычи нефти (суммарно получено 2003,9 т), так и времени проведения работ (на весь комплекс работ, учитывая работы по переходу на в/л горизонт, затрачено от 5 до 9 сут/скв.).

**Показатели эффективности работ по СИВ на скважинах  
РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» (на 01.08.2020 г.)**

Скважина, месторождение	Дата выполнения ремонта	Базовый дебит/плановый прирост дебита нефти, т/сут	Показатели эффективности				
			Дополнительная добыча нефти, т	Длительность эффекта, сут	Прирост дебита нефти, т/сут	Дебит нефти, т/сут	Увеличение продуктивности ( $\Delta K_{пр}$ ), %
5п, Западно-Сосновское	22.12.2019–01.01.2020	0/5	847	180,5	4,00	4,00	
3, Западно-Сосновское	09–13.03.2020	1,22*/3	381	122,2	3,12	4,34	132
25, Чкаловское	20–27.04.2020	2,11/7	775,9	55,0	14,1	16,2	380
		<i>ИТОГО</i>	<b>2003,9</b>				

\*Базовый дебит рассчитан согласно СТП № 09100.17015.177–2017.

Таким образом, данная технология как на этапе ОПИ, так и при внедрении на объектах зарекомендовала себя как высокоэффективная и низкзатратная и рекомендована для внедрения в производство на нефтедобывающих предприятиях Республики Беларусь и при оказании сервисных услуг в других нефтяных регионах.

**Л и т е р а т у р а**

1. Ибрагимов, Л. Х. Интенсификация добычи нефти / Л. Х. Ибрагимов, И. Т. Мищенко, Д. К. Челоянц. – М. : Наука, 2000. – 414 с.
2. Способ обработки прискважинной зоны продуктивного пласта : пат. RU 2542016 / М. В. Омелянюк, И. А. Пахлян. – Оpubл. 20.02.2015.
3. Устройство для гидродинамического воздействия на стенки скважины : пат. RU 2224090 / В. И. Иванников, И. В. Иванников. – Оpubл. 20.02.2004.

4. Генератор струйный гидроимпульсный для обработки скважин : полез. модель RU 171999 / Ю. Г. Дублистов, Н. Х. Мусин, Б. М. Кириллов, С. Н. Корнеев, В. В. Якушин, Д. Ю. Маллабаев, С. А. Бобров. – Оpubл. 26.06.2017.
5. Гидравлический вибратор для обработки скважин : полез. модель RU 173616 / Ю. Г. Дублистов, Н. Х. Мусин, Б. М. Кириллов, С. Н. Корнеев, Д. Ю. Маллабаев, С. А. Бобров. – Оpubл. 04.09.2017.
6. Технология и технические средства улучшения гидродинамической связи скважины с пластом / Н. А. Шамов [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2006. – Т. 4, № 1. – С. 47–57.

УДК 622.276.66

## ОЦЕНКА ЦЕЛОСТНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

А. М. Жуковский, А. И. Малашенко

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

Эффективность работы скважин во многом зависит от методов их крепления и цементирования. Качественное цементирование должно надежно разобщить продуктивные пласты от водоносных, укрепить склонные к обвалам породы, предохранить от коррозии обсадную колонну и повысить ее несущую способность и долговечность. В случае некачественного цементирования ущерб может достигать больших значений, вплоть до полной потери скважины. Качественное разобщение пластов в настоящее время является важной задачей при обеспечении долговечности и продуктивности скважин.

С целью повышения нефтеотдачи продуктивных пластов и стимуляции охваченных заводнением скважин используются различные методы интенсификации, связанные с повышением перепада давления, что приводит к увеличению напряженно-деформированного состояния цементного кольца скважины и нарушению герметичности заколонного пространства.

Одним из наиболее часто применяемых и эффективных методов интенсификации притока является создание обширной сети искусственных трещин в пласте и активация фильтрации в естественных трещинах с помощью гидроразрыва пласта.

Сущность гидравлического разрыва пласта в том, что посредством закачки жидкости при высоком давлении происходит раскрытие естественных или образование искусственных трещин в продуктивном пласте и при дальнейшей закачке песчано-жидкостной смеси или кислотного раствора расклинивание образованных трещин с сохранением их высокой пропускной способности после окончания процесса и снятия избыточного давления [1].

Целью данной работы является оценка вероятности возникновения и развития трещин растяжения в цементном камне при увеличении давления в скважине во время проведения гидроразрыва пласта.

В ходе выполнения работы решались следующие задачи: выбор математической модели, описывающей свойства материала, проверка адекватности выбранной модели при испытаниях на растяжение «бразильским тестом», построение геометрической модели скважины и околоскважинного пространства, анализ зон разрушения.

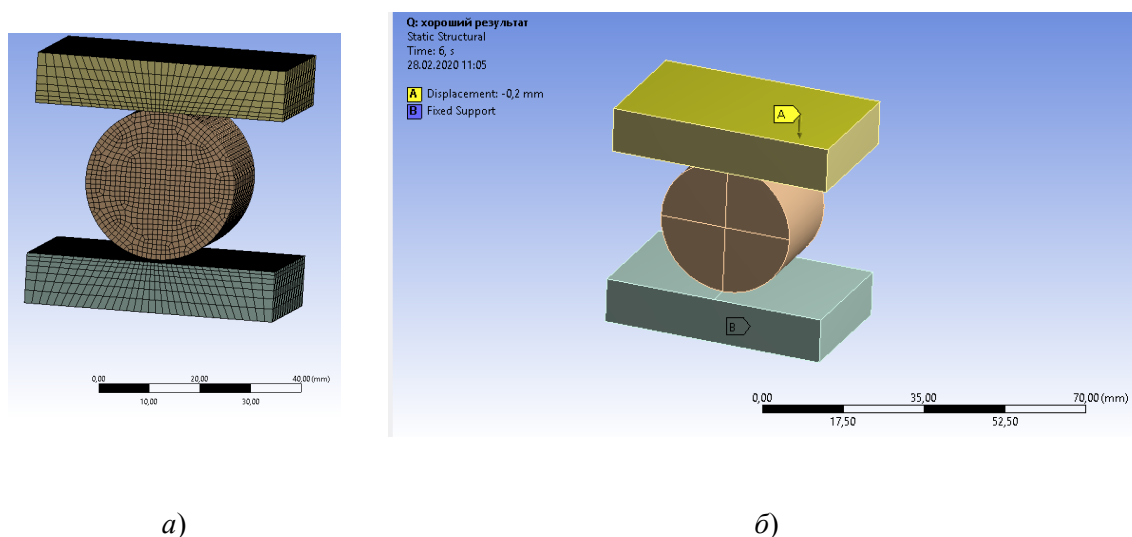
Построение геометрии и дальнейшее моделирование осуществлялось в студенческой версии ПК ANSYS, имеющей ограничение до 32000 конечных элементов.

Для описания свойств материала цементного камня была выбрана математическая модель, ориентированная на описание упруго-хрупкого поведения бетона, Вильяма и Варнке, используемая совместно с конечным элементом SOLID65 [2]. SOLID65 – восьми-узловой конечный элемент, специально предназначенный для моделирования бетона и железобетона, способного к растрескиванию при растяжении и дроблению при сжатии.

Проверка адекватности выбранной модели осуществлялась путем сравнения результатов, полученных при лабораторных исследованиях образцов по определению предела прочности на растяжение согласно ГОСТ 21153.3–85, с результатами этих же экспериментов на модели.

Расчетная модель для «бразильского теста» представлена цилиндрическим образцом и двумя плитами, построенная сетка содержит 30000 элементов. В качестве граничных условий задавалось перемещение верхней плиты и жесткая заделка основания нижней плиты (рис. 1).

Материалом для верхней и нижней плит была выбрана сталь, имеющаяся в библиотеке ANSYS. Образец цемента – модель бетона Вильяма и Варнке, с заданием модуля Юнга, коэффициента Пуассона, предела прочности при растяжении, коэффициентов передачи сдвиговых напряжений при открытой и закрытой трещине.



a)

б)

Рис. 1. Расчетная модель:

*a* – конечно-элементная модель; *б* – граничные условия модели

В результате моделирования были получены значения распределений главных напряжений в образце. На графике (рис. 2) можно увидеть линейное увеличение значения главного максимального напряжения до предела прочности при растяжении и потерю устойчивости на следующей стадии нагружения.

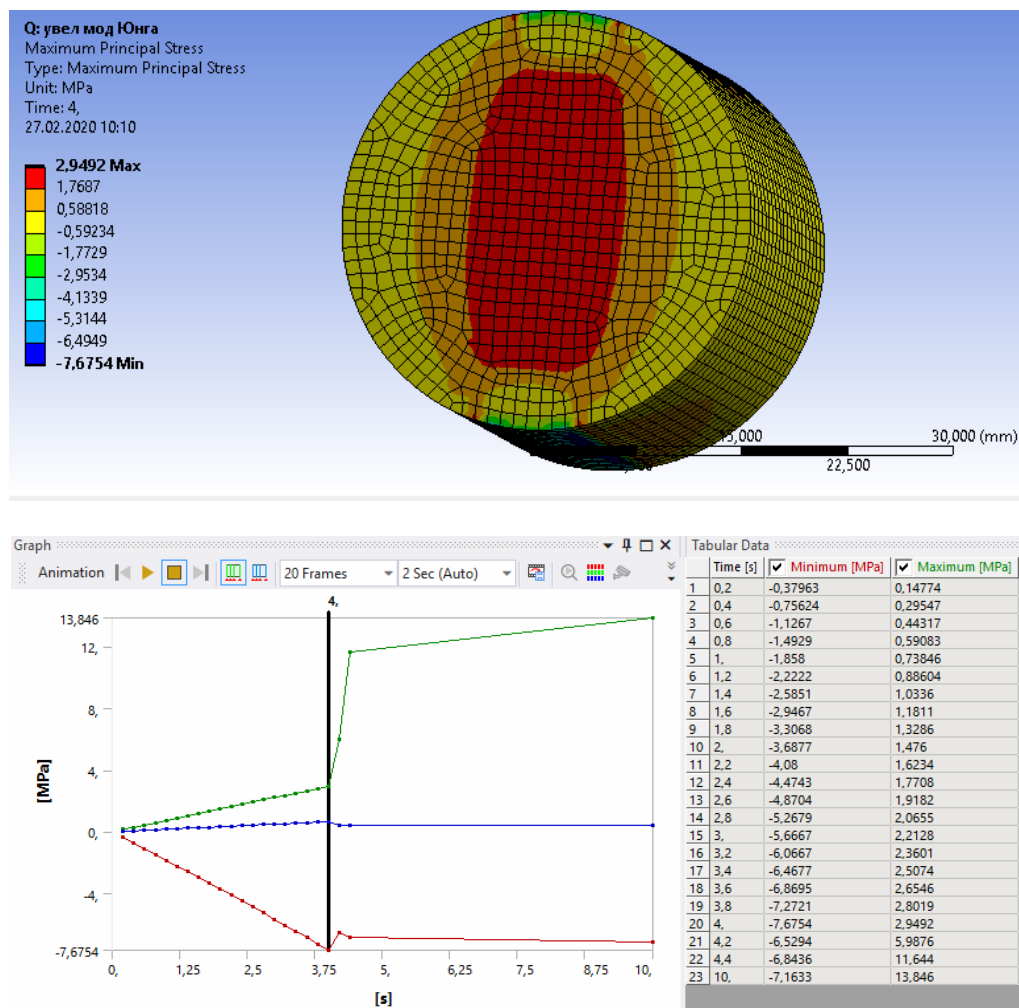


Рис. 2. Распределение главного максимального напряжения

Значение максимального главного напряжения в момент разрушения совпадает с заданным пределом прочности при растяжении, а усилие при разрушении на модели имеет отклонение  $< 7\%$  от значения силы, полученного при определении предела прочности на растяжение согласно ГОСТ 21153.3–85. На основании полученных результатов можно говорить об адекватности используемой модели.

Следующим этапом является построение геометрической модели, формирование сетки конечных элементов, определение свойств материалов и задание граничных условий модели скважины и околоскважинного пространства, включающего обсадную колонну, цементный камень и горную породу (рис. 3, а).

В качестве граничных условий задавались: жесткая заделка горной породы, ограничение движения по нормали для поверхностей модели, постепенное увеличение давления на внутреннюю поверхность обсадной колонны от 0 до 70 МПа (рис. 3, б).



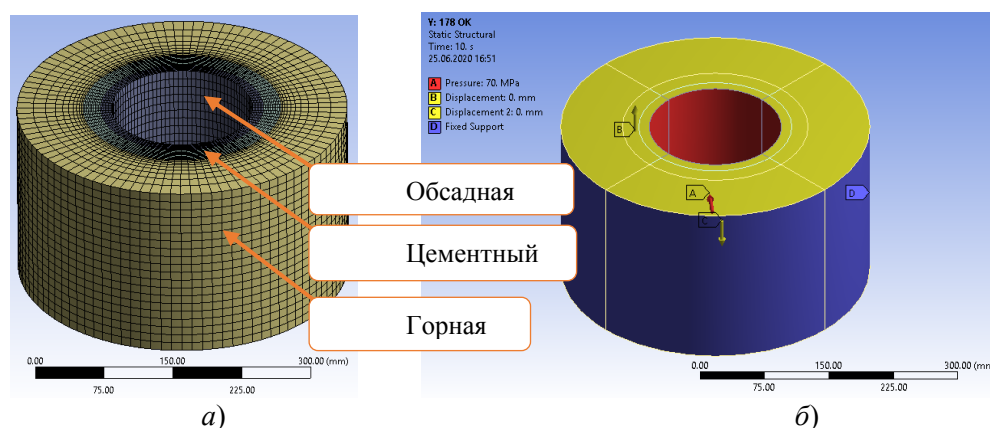


Рис. 3. Расчетная модель:

*a* – конечно-элементная модель; *б* – граничные условия модели

На рис. 4, *a* представлено распределение значения главного максимального напряжения при давлении 70 МПа на внутреннюю поверхность обсадной колонны.

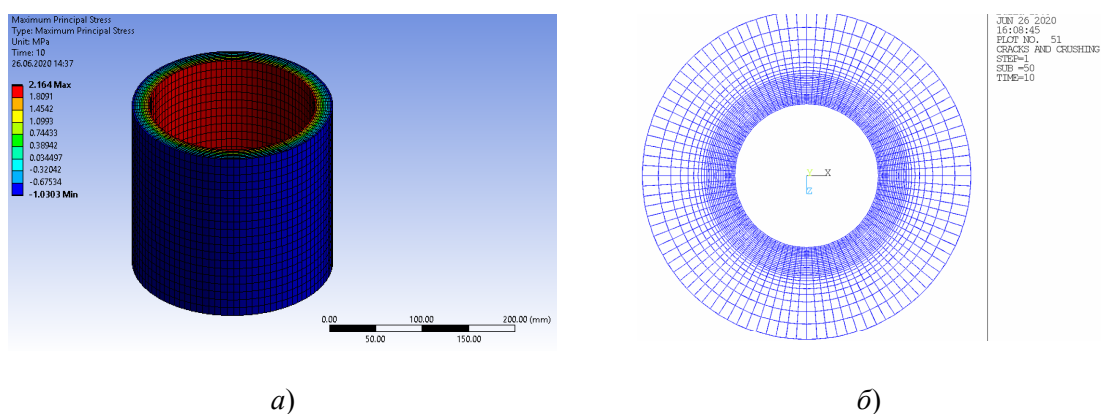


Рис. 4. Результаты моделирования:

*a* – распределение главного максимального напряжения;  
*б* – конечно-элементная модель

На основании построенной модели можно сделать вывод, что для заданных условий и выбранной модели материала при давлении на внутреннюю поверхность обсадной колонны 70 МПа не достигается предельное состояние, при котором происходит образование трещин растяжения (рис. 4, *б*).

В дальнейшем планируется оценить влияние изменения упругих и прочностных параметров цементного камня на величину возникающих напряжений, учесть эксцентричное расположение обсадной колонны.

Построенную модель можно использовать для подбора оптимальной рецептуры тампонажного раствора, параметры которого должны соответствовать ожидаемым нагрузкам на обсадную колонну при проведении гидроразрыва пласта.

#### Литература

1. Меликберов, А. С. Теория и практика гидравлического разрыва пласта / А. С. Меликберов. – М. : Недра, 1967. – 139 с.
2. Willam K. J., Warnke E. D. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete. Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. – Vol.19. ISMES. Bergamo, Italy. R.174 (1975).

УДК622.276.66

## ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДИЗАЙНА МНОГОСТАДИЙНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

А. М. Жуковский

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

В последние годы в большинстве нефтегазоносных регионов происходит сокращение запасов легкой нефти и увеличение запасов трудноизвлекаемой (в том числе высоковязкой) нефти. Увеличение числа месторождений, находящихся на заключительной стадии разработки, ведет к необходимости более тщательного подхода к разработке и эксплуатации месторождений, разведке ранее неизученных объектов и разработке залежей в нетрадиционных коллекторах. Для реализации всего вышперечисленного необходимо использование прогрессивных исследований, высокоэффективных методов и технологий на всех стадиях разработки освоения месторождений. Геомеханическое моделирование, проводимое с целью оптимизации бурения скважин (выбор оптимальной траектории скважин) и разработки месторождений (поддержание пластового давления, оптимизация гидравлического разрыва пласта) относится к одному из наиболее перспективных направлений таких исследований.

Одной из самых передовых технологий в нефтяной отрасли является многостадийный гидроразрыв пласта в горизонтальных скважинах. Его отличие от одностадийного гидроразрыва в том, что в одной скважине проводится поочередно, цикл за циклом, несколько гидроразрывов пласта.

Классический метод создания дизайна гидроразрыва пласта основан на опыте проведения гидравлического разрыва пласта (ГРП) в данном регионе. При таком методе осуществляется деление разреза на литологические слои (песчаник, глина, известняк и т. д.) на основании интерпретации стандартного комплекса геофизического исследования скважины (ГИС). Далее каждому слою на основании регионального опыта присваиваются значения градиента давления закрытия трещин, значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

В данной работе будет рассмотрена задача по созданию геомеханической модели с ее дальнейшей интеграцией в дизайн гидроразрыва пласта. В качестве объекта для создания интегрированной модели была выбрана скважина 117q Мармовичского месторождения нефти.

Процесс построения геомеханической модели можно разложить на несколько этапов:

- сбор и анализ исходных данных;
- определение механических свойств;
- определение профиля вертикального напряжения;
- определение порового давления;
- определение направления горизонтальных напряжений;
- определение профиля горизонтальных напряжений;
- калибровка построенной модели.

Основой для создания геомеханических моделей являются данные ГИС. Необходимый комплекс ГИС должен включать кросс-дипольный акустический каротаж, плотностной каротаж, кавернометрию, акустический телевизор и (или) электрический микроимиджер.

Показания таких методов, как плотностной и акустический каротаж подвержены искажениям из-за технологических и геолого-геофизических причин, поэтому на этапе анализа исходных данных выполняется их корректировка путем синтеза по другим методам ГИС.

К механическим свойствам горных пород относят упругие (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, объемный модуль) и прочностные (предел прочности на растяжение, предел прочности на сжатие, угол внутреннего трения) параметры. Выделяют динамические и статические упругие модули: динамические определяют по скоростям распространения продольных и поперечных волн, прямые статические методы подразумевают непосредственное механическое воздействие на образец до его полного или частичного разрушения.

Для расчета статических упругих модулей были использованы корреляционные зависимости, полученные при проведении специальных лабораторных исследований на образцах керна  $\text{rtr-el}$  горизонтов Речицкого месторождения. В интервалах, где не было лабораторных исследований, были использованы литературные зависимости.

Для калибровки параметров проведения многостадийного гидроразрыва пласта в пилотном стволе 117g скважины был проведен информационный ГРП.

Одним из важных параметров при геомеханическом моделировании является направление действия главных горизонтальных напряжений. Этот параметр существенно влияет на устойчивость ствола скважины, ориентацию распространения трещин в пласте и в том числе на направление движения флюидов при разработке.

Для оценки текущих направлений действия главных напряжений существуют различные методики (микросейсмический мониторинг ГРП, кросс-дипольный акустический каротаж, микроимиджер, многорычажный каверномер, анализ сейсмических данных, исследования на ориентированном керне) [1]. Для получения исходной информации о состоянии стенки ствола скважины, значениях анизотропии свойств, направлении распространения трещин запись приборами электрического микросканера и кросс-дипольного акустического каротажа была выполнена в открытом стволе до и после информационного ГРП. На записи электрического микросканера, сделанной после информационного ГРП, вдоль ствола скважины наблюдается интервал с сетью трещин ГРП, до проведения ГРП трещины в данном интервале отсутствовали. Результаты, полученные по акустическому каротажу, подтверждают наличие трещин: коэффициент анизотропии по интервальному времени пробега поперечных волн не превышал 1 % до проведения ГРП, а после ГРП стал равен 12,5 %.

Проведение исследований, по оценке состояния ствола скважины электрическим микросканером, позволило получить предполагаемое направление действия главного максимального напряжения, равное  $0-10^\circ$  ( $180-190^\circ$ ) по магнитному азимуту – полученное значение совпадает с ориентацией распространения быстрой поперечной волны.

Профиль горизонтальных напряжений строился на основании пороупругой модели [2]. На основании коэффициента анизотропии, полученного по скоростям быстрой и медленной поперечных волн, можно говорить об изотропии главных горизонтальных напряжений (к-т анизотропии не превышает 2,5 %).

Магнитуда минимального горизонтального напряжения с большой точностью может быть оценена при проведении гидравлического разрыва пласта. Кроме ГРП определение минимального горизонтального напряжения может производиться с помощью стандартного (LOT) или расширенного теста (XLOT, аналогичное название ELOT) на поглощение в скважине [3].

При проведении информационного гидроразрыва пласта было получено значение градиента давления закрытия трещины, которое использовалось для калибровки профиля минимального бокового напряжения.

В работе рассмотрен подход интеграции параметров геомеханической модели в дизайн гидроразрыва пласта. Полученный профиль статических упругих модулей и боковых напряжений был использован для определения показателей развития трещины при проведении гидроразрыва пласта. Было выполнено сравнение классического подхода при построении дизайна ГРП с моделью, полученной в результате использования геомеханических параметров. Сделан вывод о сходности общей конфигурации трещин (длина, ширина, высота), однако наблюдаются и значительные расхождения двух моделей.

Трещины отличаются по профилю: при классическом способе более гомогенный по ее высоте, с геомеханическими данными – явное расширение к верхней части. Можно предположить, что увеличение ширины трещины в верхней части обусловлено уменьшением напряжения вверх по разрезу в сравнении с начальным дизайном ГРП. По второй модели концентрация проппанта в продуктивном интервале в трещине превышает результаты классического способа, а также по второй модели лучше закреплены пересекаемые нижние продуктивные пропластки.

Глубина нижней границы трещины с использованием геомеханической модели смещена ниже и цепляет воду. Таким образом, уменьшение напряжений и увеличение модуля Юнга вниз по разрезу способствовало большему развитию трещины и прорыву ее в водонасыщенный горизонт. Основным критерием прорыва воды можно считать получение обводненной продукции из нижележащих интервалов.

Скважина 117g Мармовичская была запущена в эксплуатацию после проведения многостадийного гидроразрыва в июне 2020 г. Фактические параметры эксплуатации скважины (01.08.2020 г.): дебит нефти 1,2 т/сут, дебит жидкости 3,17 т/сут, обводненность 61,46 % (1,2 г/см<sup>3</sup>). По состоянию на 07.08.2020 г. дебит скважины составил 17,1 м<sup>3</sup>/сут при обводненности 100 %, дебит нефти – 0 т/сут.

Лабораторией нефтепромысловой гидрогеологии выполнен анализ воды, отобранной из скважины 08.07.2020 г., согласно которому химический состав представлен смесью пластовых рассолов (около 70 %) и пресной технологической воды [4]. На основании этого можно утверждать о поступлении пластовой воды из нижележащих слоев елецкого горизонта, что свидетельствует о прорыве в них трещин ГРП.

В результате проделанной работы, на примере скважины 117g Мармовичского месторождения нефти, показана роль геомеханического моделирования при создании дизайна и прогнозировании геометрии трещин многостадийного гидроразрыва пласта для интенсификации притока нефти.

#### Литература

1. Zoback, M. D. Reservoir Geomechanics. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 505 p.
2. Breckels, I. M. and Van Eekelen, H. A. M. (1981). “Relationship between horizontal stress and depth in sedimentary basins: Paper SPE10336, 56th Annual Fall Technical Conference”. Society of Petroleum Engineers of AIME, San Antonio, Texas, October 5–7, 1981.
3. Zoback M. D., Barton C. A., Brudy M., Castillo D. A., Finkbeiner T., Grollimund B. R., Moos D. B., Peska P. Ward C. D., Wiprut D. J. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells // Int. J. Rock Mechanic. – Min. Sci. 40, 1049–1076, 2003.
4. Степанов, И. А. Заключение о природе воды из скв. 117g Мармовичской от 10.07.2020 / И. А. Степанов ; БелНИПИнефть. – Гомель, 2020.

УДК 622.276.65

**ПОВЫШЕНИЕ НЕФТЕОТДАЧИ  
ПРИ ТЕРМОГАЗОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПЛАСТ  
(НА ПРИМЕРЕ ВИШАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ)**

А. А. Кудряшов, А. О. Цыганков

*РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»*

*БелНИПИнефть, г. Гомель*

Сущность метода термогазового воздействия (ТГВ) заключается в закачке воздуха при помощи компрессорных установок в пласт. За счет внутривластных окислительных и термодинамических процессов кислород ( $O_2$ ) трансформируется в эффективные вытесняющие агенты ( $CO_2$  + широкая фракция легких углеводородов). Характерная особенность термогазового метода заключается в его интегрированности, т. е. в совмещении теплового и газового воздействия на горные породы. При таком воздействии прогревается нефть и окружающие породы, из нефти выходят легкие фракции, которые, смешиваясь с газами-продуктами окисления, образуют высокоэффективный смешивающийся агент [1], [2].

В Припятском прогибе технология ТГВ реализовывалась на елецко-задонской залежи второго блока Вишанского месторождения. Работы носили опытно-промышленный характер ввиду отсутствия опыта реализации в прошлом. Осуществлялись они в соответствии с Технологической схемой опытно-промышленных работ от 2013 г.

Для опытного участка месторождения (район скважины № 134) предусматривались следующие технологические параметры закачиваемой водовоздушной смеси:

- расход закачки газа в скважину № 134 – 24000 м<sup>3</sup>/сут (в поверхностных условиях);
- давление закачки газа на устье скважины № 134 – 10–35 МПа;
- расход закачки воды в скважине № 134 – 24–50 м<sup>3</sup>/сут.

Скважина 134-Вишанская переведена под закачку воздуха в июле 2014 г. с начальной приемистостью 22–24 тыс. м<sup>3</sup>/сут (в поверхностных условиях) при давлении нагнетания на устье скважины 18–21,5 МПа (интервалом перфорации были вскрыты отложения туровских слоев елецкого горизонта  $D_{3el}(tr)$ ). Период эксплуатации водовоздушной скважины 134-Вишанской можно разделить на два этапа: эксплуатация скважины до выполнения работ по приобщению нижележащего интервала ( $D_{3zd}(vsh+trm)$ ) и после данного вида работ.

*Первый период* (07.2014–05.2016 гг.), который характеризуется:

- закачкой воздуха в скв. 134 со стабильной приемистостью 22–24 тыс. м<sup>3</sup>/сут при давлении нагнетания 20–22 МПа и затрубном давлении 9–10 МПа;
- ростом забойной температуры по скв. 134 с 53 до 88 °С по результатам промыслово-геофизических исследований (ПГИ);
- выделением группы реагирующих скважин (№ 115, 133, 157n, 165г, 166г и 168n);
- ростом доли содержания азота в пробах скважин опытного участка с 5 до 70–75 % по ближайшим к скв. 134 скв. 165г и 168 и с 5 до 30–40 % по скв. 166г, 133;
- ростом доли углекислого газа (с 0,2–0,5 до 3–6 %) в добываемой продукции реагирующих скважин;
- ростом динамических уровней (в среднем на 500–600 м) и пластового давления (на 4–6 МПа) на опытном участке залежи.

Работа скв. 134-Вишанской со стабильной приемистостью и, как следствие, рост пластового давления и динамических уровней способствовали увеличению среднесуточной добычи нефти по опытному участку с 40–45 до 50–55 т/сут (рис. 1).

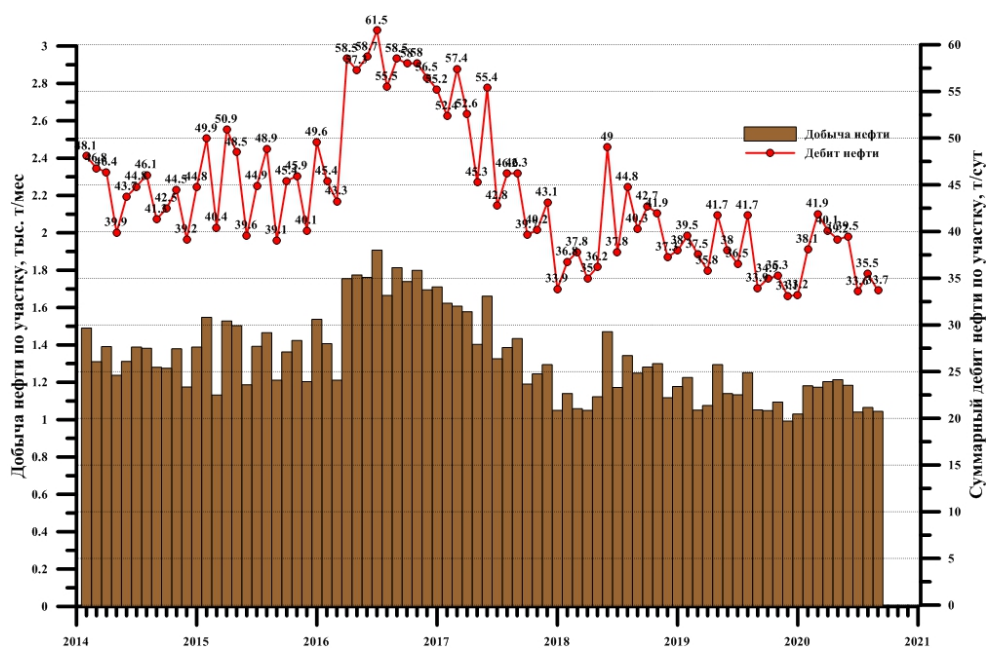


Рис. 1. Динамика добычи и дебита нефти по скважинам опытного участка

С целью увеличения охвата пласта вытеснением в мае 2016 г. в скв. 134-Вишанской был выполнен дострел вишанско-тремлянских слоев задонского горизонта в интервале глубин (2509,3–2522 м). По данным промыслово-геофизических исследований (ПГИ), выполненных после данных работ, приобщенный интервал жидкость не принимал (2 %). После приобщения нижележащего интервала по скв. 134 отмечался рост давления нагнетания с 21 до 29 МПа. В августе 2016 г. при попытке проведения очередного ПГИ отмечалась посадка шаблона на отметке 2475 м. Бригадой КРС выполнен ремонт скважины и обеспечен забой, по результатам дефектоскопии отмечались многочисленные деформации и нарушения целостности колонны в неперфорированном ранее интервале дроздовских слоев (2467–2474 м, D<sub>3el</sub>(dr)) [2].

Таким образом, с мая 2016 г. (после выполнения работ по приобщению нижележащего интервала) начался *второй период* эксплуатации скв. 134-Вишанской, который характеризуется:

- установлением нарушений эксплуатационной колонны скв. 134 выше интервала перфорации (D<sub>3el</sub>(dr));
- выявлением в скв. 134 (по данным ПГИ 2016 и 2017 гг.) заколонного перетока вверх (78 % в отложения дроздовских слоев);
- снижением среднесуточной приемистости по скв. 134 (с 22–24 тыс. м<sup>3</sup>/сут до 10–12 тыс. м<sup>3</sup>/сут) вследствие частых остановок для ремонтных работ, а также кольматации призабойной зоны, так как при ремонтных работах использовались рабочие жидкости удельным весом 1,36–1,54 г/см<sup>3</sup> и глинистые растворы удельным весом 1,9 г/см<sup>3</sup>;
- снижением до базовых величин динамических уровней и пластового давления и, соответственно, среднесуточного дебита нефти по скважинам опытного участка (рис. 1).

Основным параметром оценки эффективности той или иной технологии, применяемой на залежи нефти, служит получение дополнительной добычи нефти (рис. 1). Расчет величины дополнительной добычи нефти, за счет реализации ОПР по термо-

газовому воздействию, выполнялся прямым методом. За период расчета взят промежуток от начала реализации ОПР (07.2014 г.) по 01.01.2019 г. (к этому времени среднесуточный дебит нефти по участку достиг базового значения). За этот период прирост среднесуточного дебита нефти по опытному участку составил около 1,5 т/сут, что обеспечило прирост добычи нефти в 2,45 тыс. т (оценка производилась исключительно по скважинам опытного участка, так как в период 2017–2019 гг. елецко-задонская залежь нефти активно разбуривалась, что привело к значительному росту среднесуточного дебита нефти по залежи в целом). Если проводить оценку эффективности ОПР исключительно в рамках первого периода (07.2014–05.2016 гг.), то прирост среднесуточного дебита нефти составил около 3 т/сут, что выражается в 1,98 тыс. т дополнительно добытой нефти за этот период. Рост добычи нефти по участку подтверждается и приростом темпа отборов от НИЗ: до реализации ОПР по ТГВ среднее значение темпа отборов от НИЗ по опытному участку составляло 3,8 %, после начала реализации ОПР (на рубеже первого и второго периода эксплуатации скв. 134) – 5,0 %. Экстраполяция прироста дебита нефти за первый период на весь срок реализации ОПР (если принять в расчет, что скв. 134 работала со стабильной проектной среднесуточной приемистостью по воздуху весь период реализации ОПР) показывает, что дополнительная добыча нефти могла составить около 5,8 тыс. т. При таком раскладе за 15-летний период прирост КИН по опытному участку (НИЗ по участку = 1680 тыс. т) мог достигнуть 0,0115 ден. ед.

Таким образом, впервые на месторождениях Припятского прогиба была реализована технология термогазового воздействия на залежи нефти с карбонатным типом коллектора, характеризующимся низкой проницаемостью. Проанализировав информацию, представленную в данной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Подтверждено протекание в рассматриваемой залежи нефти самопроизвольных внутрислоевых окислительных процессов с низкой начальной пластовой температурой ( $t = 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

2. С технологической точки зрения опытно-промысловые работы по термогазовому воздействию на елецко-задонской залежи второго блока Вишанского месторождения можно признать успешными.

В результате прямого метода расчета дополнительная добыча нефти, за счет реализации ОПР, оценена в 2,45 тыс. т (что могло быть в разы выше, в случае стабильной эксплуатации скв. 134 с проектной приемистостью).

3. Основной причиной резкого снижения пластового давления и динамических уровней по реагирующим скважинам является необеспечение стабильной среднесуточной приемистости по воздуху в скв. 134 на уровне проектных показателей (проект – 24 тыс. м<sup>3</sup>/сут, факт за весь период реализации ОПР – 20,2 тыс. м<sup>3</sup>/сут).

В результате невыполнения проектных решений эффект от реализации ОПР по термогазовому воздействию на Вишанском месторождении оказался кратковременным.

#### Л и т е р а т у р а

1. Боксерман, А. А. Термогазовый метод увеличения нефтеотдачи / А. А. Боксерман // Георесурсы. – 2007. – № 3 (22). – С. 18–20.
2. Повжик, П. П. Эффективность технологии термогазового воздействия на пласт при разработке трудноизвлекаемых запасов в низкопроницаемых коллекторах / П. П. Повжик, А. А. Кудряшов, Н. А. Демяненко // Недропользование XXI век. – 2019. – № 3 (79). – С. 176–185.

УДК 550.81:553.982(476.2)

**ОБОСНОВАНИЕ ПЕРВООЧЕРЕДНЫХ УЧАСТКОВ  
ДЛЯ ПОСТАНОВКИ НЕФТЕПОИСКОВЫХ РАБОТ В ПРЕДЕЛАХ  
ЮЖНОЙ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ  
ЗОНЫ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА**

**И. Р. Захария, А. А. Лопушко**

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

В единственном нефтегазоносном регионе Беларуси – Припятской нефтегазоносной области (НГО) – выделяются три нефтегазоносных района: Северный, в тектоническом плане охватывающий Северную структурно-тектоническую зону (ССТЗ), а также Центральный (ЦНГР) и Южный (ЮНГР), располагающиеся в пределах Внутреннего грабена Припятского прогиба [1], [2]. Геолого-геофизическая изученность трех районов с позиций их нефтегазоносности весьма сильно отличается. Если в пределах Северной СТЗ пробурено около 3327 скважин, то в пределах Южной структурно-тектонической зоны (Южной СТЗ, ЮСТЗ) пробурено всего 156 скважин при площади зоны около 8700 км<sup>2</sup>. Соответственно и преобладающее количество месторождений открыто в Северном НГР, начальные суммарные извлекаемые ресурсы (НСР) углеводородов (УВ) согласно последней количественной оценке 2009 г. составляют 296 у. е. (85 % ресурсной базы УВ Беларуси), в то время как в пределах ЮНГР открыто всего одно месторождение в 2019 г., НСР составляют всего 22,5 у. е. (всего 6 %) [3]. При этом разведанность НСР ЮНГР весьма низкая.

В Южной СТЗ в последние годы была открыта межсолевая залежь нефти на Ново-Ельской площади. Во многих скважинах Южного района отмечались признаки нефти в керне по всему разрезу – от надсолевых пород и верхнесоленосных отложений до пород подсолевого комплекса. Перспективы нефтегазоносности связываются в основном с отложениями межсолевого комплекса, в меньшей степени – с верхнесоленосным, подсолевым и надсолевым комплексами. Отмечается и высокая газонасыщенность пластовых вод, в большей степени это относится к верхнесоленосному комплексу. При бурении скв. 2 в пределах Ельской площади еще в 1953 г. был получен первый в Припятском прогибе приток нефти дебитом 15–18 м<sup>3</sup>/сут из пласта песчаника верхнесоленосных отложений. Также получены притоки нефти в скважинах 14 Радомлянская, 3 Восточно-Выступовичская, 35 Южно-Валавская.

Площадь Южной СТЗ с некоторой долей условности была разделена на 15 участков с целью оценки их нефтегазоносности, ранжирования и выделения первоочередных площадей для постановки ГРР – сейсморазведочных работ и поисково-разведочного бурения. Участки сильно отличаются по степени геолого-геофизической изученности, разные по площади и перспективности с позиций нефтегазоносности (рис. 1).



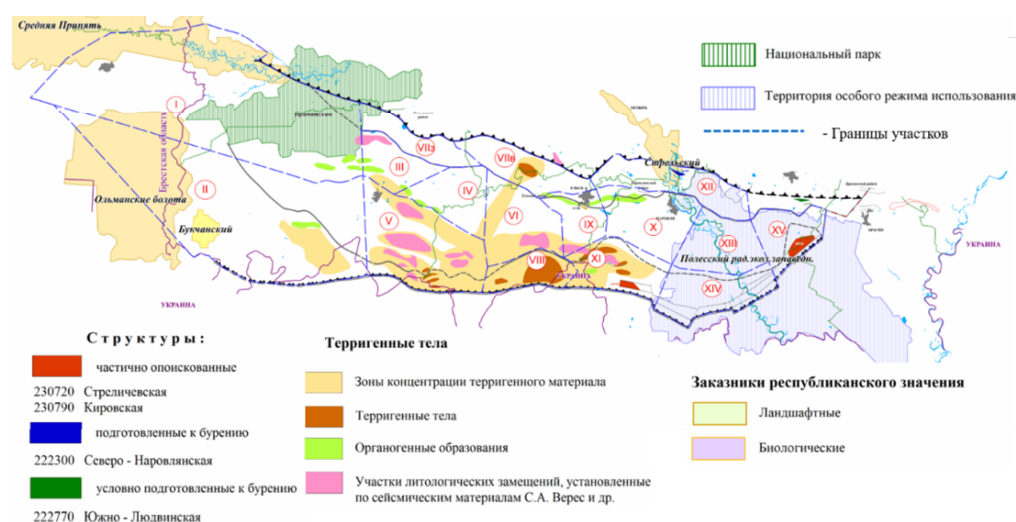


Рис. 1. Участки в пределах ЮСТЗ. Основа – карта структурно-тектонического районирования межсолевого комплекса Припятского прогиба (Бескопыльный, 2011)

Выделенные участки: Туровско-Симоновичский (I); Южно-Туровско-Боровский (II); Великопольско-Дубницкий (III); Западно-Софиевский (IV); Валавско-Южно-Валавский (V); Николаевско-Ново-Рудницкий (VI); Буйновичско-Анисимовско-Заозерный (VIIз, VIIв); Скородиноско-Выступовичский (VIII); Ельский (IX); Восточно-Ельский (X); Восточно-Выступовичско-Кировский (XI); Наровлянский (XII); Вепровско-Карповичский (XIII); Радомлянско-Желоньский (XIV); Стреличевский (XV).

При выборе первоочередного участка для обоснования постановки поисковых работ нами применены следующие критерии: 1 – притоки нефти, признаки в керне; 2 – обоснованное выделение ловушек на основании предыдущих работ (развитие пород-коллекторов, флюидоупоров), в том числе и ловушек неструктурного типа; 3 – приуроченность к разломным зонам, региональным разломам глубинного заложения, краевым разломам; 4 – геохимические и гидрохимические положительные аномалии; 5 – предполагаемые ресурсы УВ выделенных ловушек. Также к критериям выбора участка в данном случае можно отнести степень изученности геофизическими и буровыми работами и возможность переобработки ранее проведенных сейсмических работ.

В Южном НГР притоки нефти были получены на Ельской (IX участок), Южно-Валавской (V участок), Восточно-Выступовичской (XI участок), Радомлянской (XIV участок) площадях (1-й критерий), и по первому критерию эти объекты являются самыми привлекательными для дальнейшего анализа. Три последние площади тяготеют к Южно-Припятскому суперрегиональному краевому разлому (3-й критерий) и расположены в пределах зон концентрации терригенных тел, или зон сноса терригенного материала с УКЩ, который весьма активно проходил во время накопления межсолевой толщи.

По результатам проведенного ранжирования установлено, что Валавско-Южно-Валавский участок – один из лучших участков Южного НГР, в достаточной мере соответствующий всем вышеприведенным критериям выбора приоритетного участка постановки дальнейших ГРП (рис. 2). Это и притоки и признаки нефти в скважинах, и наличие хороших пород-коллекторов и флюидоупора, и приуроченность структур к Южно-Припятскому суперрегиональному краевому разлому 1-го

порядка, и положительные геохимические аномалии и гидрохимические показатели. Участок является одним из самых изученных геолого-геофизическими работами в Южной СТЗ.

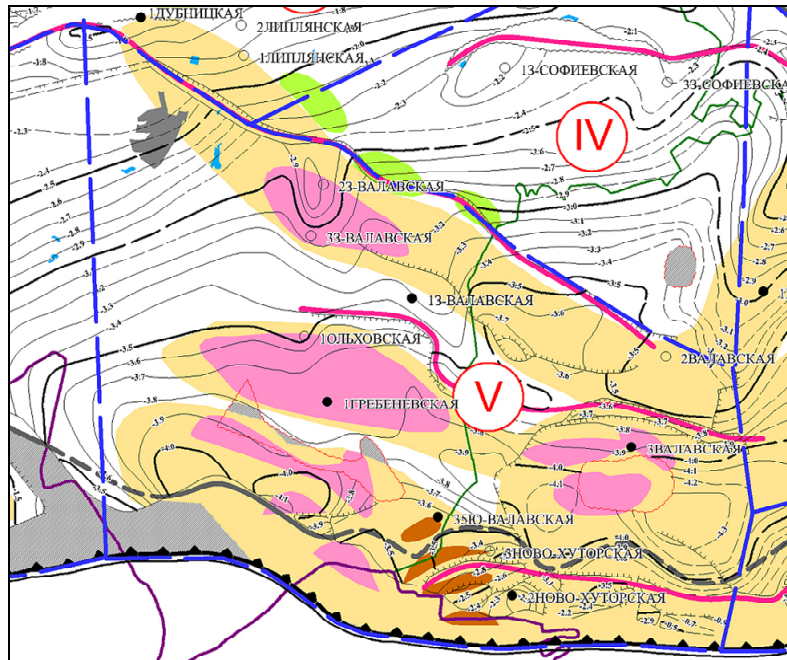


Рис. 2. Валавско-Южно-Валавский (V) участок. Основа – карта поверхности межсолевых отложений с отмеченными прямыми признаками НГН в керне

В пределах участка пробурено всего 11 скважин – 1, 2, 3 Западно-Валавские, 1 Ольховская, 1 Гребеневская, 1, 35 Южно-Валавские, 2, 3 Валавские, 2, 3 Ново-Хуторские. Во всех скважинах, кроме 1 Ю-Валавская, 2 Валавская, 3 Западно-Валавская, 2 Валавская и 1 Ольховская, в поднятом керне отмечены прямые признаки нефтеносности. Вскрытые скважинами пласты-коллекторы обладают хорошими ФЕС, о чем свидетельствуют притоки флюида по скважинам при испытании в процессе бурения, приток нефти с водой и нефти с фильтратом бурового раствора получены только в скв. 35 Южно-Валавская из воронежских отложений. В колонне в скважине 35 Южно-Валавская был получен приток нефти из подсолевых воронежских отложений дебитом  $0,91 \text{ м}^3/\text{сут}$ , а в скв. 1 Южно-Валавская из высоконапорного пласта внутрисолевых отложений получен приток пластовой воды с высоким содержанием газа дебитом  $480 \text{ м}^3/\text{сут}$ . По анализам пластовых вод участка также отмечены положительные значения гидрохимических показателей нефтеносности по содержанию некоторых компонентов (в основном анионов  $\text{SO}_4$ ) в скважинах участка.

В пределах участка выделяется 17 перспективных структур, которые в настоящее время числятся в фондах структур РУП «НПЦ по геологии». Это следующие структуры: Алексеевская (два объекта – межсолевой, евлановский), Ново-Вороновская (межсоль), Гребеневская (межсоль), Усовская (четыре объекта – подсолевой, петриковский, туровский, внутрисолевой), Южно-Валавская (три объекта – подсолевой, петриковский, туровский), Северо-Валавская (межсоль), Лескинская и Глазкинская внутрисолевые структуры, а также Дворецкая (3 объекта) надсолевые структуры с суммарными извлекаемыми прогнозными ресурсами, согласно фондам

структур 14246 у. е., из них 5290 у. е. – ресурсы подготовленных к поисковому бурению объектов. Кроме того, выделялись и другие перспективные структуры, которые по тем или иным причинам не были включены в фонды.

В пределах Валавско-Южно-Валавского участка к настоящему времени уже проведен ряд сейсморазведочных работ 2Д разного уровня детальности. Тем не менее строение района весьма и весьма сложное и неоднозначное, на что указывали неоднократно авторы тематических работ (А. П. Шадура, Л. Г. Москалец, И. А. Слободянюк, З. Л. Познякевич и др.). Все вышеизложенное свидетельствует в пользу постановки дальнейших ГРП в Южном ареале Припятской НГО в пределах данного участка и указывает на необходимость обоснования сейсморазведочных работ и поискового бурения.

Таким образом, для Валавско-Южно-Валавского участка на основании всех ранее проведенных работ установлено следующее: 1) пробурено 11 глубоких скважин (5 параметрических, 5 поисковых, 1 опорная); 2) установлена нефтегазонасыщенность разреза (притоки нефти, высокая газонасыщенность пластовых вод, прямые признаки в керне); 3) выделено большое количество перспективных объектов – 17 числятся в фондах структур, еще 4 – вне фондов; 4) суммарные извлекаемые прогнозные ресурсы перспективных объектов, числящихся в фондах структур, весьма существенные – 14246 у. е., из них 5290 у. е. – ресурсы подготовленных к поисковому бурению объектов; 5) более легкая нефть, полученная в процессе испытаний на приток: она составляет  $0,8891 \text{ г/см}^3$ , тогда как все остальные нефти ЮСТЗ тяжелее  $0,9 \text{ г/см}^3$ .

Вышеизложенное свидетельствует в пользу постановки дальнейших и первоочередных ГРП в Южном ареале Припятской НГО именно в пределах данного участка – необходимости обоснования детализационных сейсморазведочных работ 3Д и поискового бурения.

#### Литература

1. Айзберг, Р. Е. Тектоника нефтеносных комплексов Припятского палеорифта и ее связь с глубинным строением земной коры / Р. Е. Айзберг, Р. Г. Гарецкий, С. В. Клушин // Сов. геология. – 1988. – № 2 – С. 3–14.
2. Бескопыльный, В. Н. Тектоническое районирование как основа прогноза остаточных перспектив нефтегазонасыщенности Припятского прогиба / В. Н. Бескопыльный, Р. Е. Айзберг, Я. Г. Грибик // Потенциал добычи горючих ископаемых в Беларуси и прогноз его реализации в первой половине XXI века. – Гомель : РУП «ПО «Белоруснефть», 2012. – С. 9–54.
3. Захария, И. Р. Ресурсная база углеводородов Республики Беларусь: оценка, тенденции, прогнозы / И. Р. Захария [и др.]. // Потенциал добычи горючих ископаемых в Беларуси и прогноз его реализации в первой половине XXI века. – Гомель : РУП «ПО «Белоруснефть», 2012. – С. 77–85.

УДК 550.822.5/7

## РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ БУРЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ARMADILLO

А. Ю. Кравченко, Р. Е. Гутман, А. М. Жуковский

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

Целью данной работы является разработка рекомендаций для сохранения целостности ствола скважины, в частности, подбор плотности бурового раствора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить ориентацию и направление основного напряжения по данным инклинометрии, кавернометрии;
- определить градиент минимального и максимального горизонтального напряжения в естественном залегании;
- рассчитать градиент разрушения при сдвиге, механические и упругие свойства пород;
- построить одномерные (1D) модели упруго-механических свойств, порового давления, горного давления.

Блок № 55 расположен в центральной части восточного нефтегазоносного бассейна Республики Эквадор. Основными коллекторами месторождения Armadillo являются песчаники формаций Hollin, Napo и Tena. В пределах месторождения Armadillo промышленная нефтегазоносность установлена в песчаных пластах Hollin superior (Hs), Napo (U inferior – Ui), Tena (Basal Tena – BT), а также в вулканических образованиях формации Napo (Napo Volcanico). Потенциально перспективными в пределах региона являются отложения Hollin inferior (Hi) и Napo T (T inferior – Ti). В пробуренных скважинах они являются водонасыщенными.

После анализа имеющейся информации по скважинам Блока № 55 было установлено, что основная масса осложнений при бурении связана с затяжками, вызванными обильным кавернообразованием интервалов Napo и некоторых интервалов формации Tena. Обильное кавернообразование связано с недостаточной прочностью горных пород. Помимо обрушения ствола скважины причиной затяжек также является дифференциальное притягивание бурового инструмента к стенкам скважины, вызванное большим перепадом гидростатического давления в скважине и в пласте.

Для построения 1D геомеханической модели осуществлен сбор, контроль и анализ имеющихся геолого-геофизических и технологических материалов, относящихся к месторождению Armadillo.

Направления главных стрессов в пласте играют важную роль при проектировании и строительстве скважин. Поэтому для оценки текущих направлений пластовых напряжений была использована информация из открытых литературных источников, а также информация о результатах исследований по скважинам месторождения Armadillo.

На месторождении Armadillo присутствуют данные FMI. По результатам анализа данных FMI четко выделяется наличие трещин растяжения и вывалов сжатия. Среднее значение азимута направления вывалов составляет  $22,5^\circ$ , что соответствует азимуту минимального горизонтального напряжения. Эти данные очень хорошо согласуются с результатами из литературных источников по ближайшим месторождениям PaloAzul, Aguatico, Tapi, Purahuacu, Oglan (рис. 1) [1]–[3].

Из литературных источников было установлено, что для НГБ Ориенте Мараньон характерен режим напряженного состояния, связанный с взбросом [4].

Надежными методами калибровки минимального горизонтального напряжения ( $S_{Hmin}$ ) являются гидравлический разрыв пласта (ГРП) либо стандартные, расширенные тесты на поглощение в скважине (LOT, XLOT).

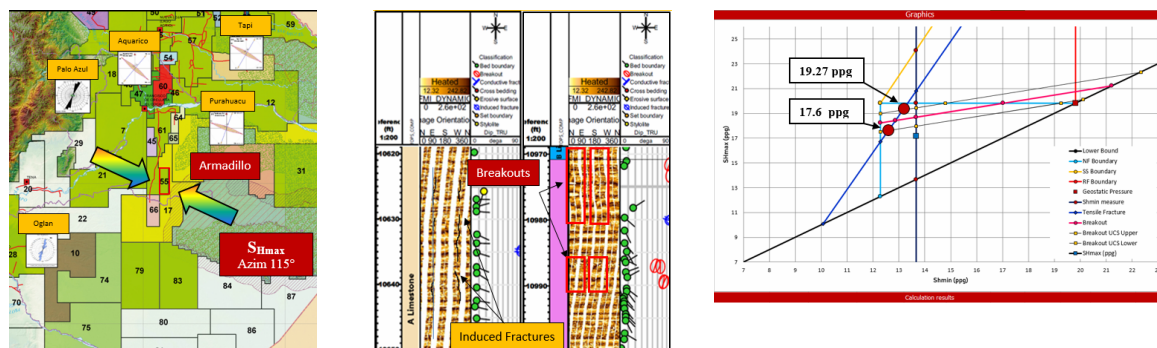


Рис. 1. Направление действия  $S_{Hmax}$  по площади НГБ Ориенте-Мараньон и данные FMI по исследуемой скважине

Найденная величина не превышает градиента горного давления, равного 19,4 ppg ( $S_v > S_{Hmin}$ ) – это говорит о том, что режим напряженно-деформированного состояния не является взбросом. Такое соотношение главных напряжений характерно для режимов сброса или сдвига. Также данные результаты подтверждаются работой [1], в которой предоставлена информация о градиентах максимального горизонтального напряжения, определенного по углам вывалов, а также о градиентах минимального горизонтального напряжения, определенного по результатам LOT. Таким образом, с геологической позиции это означает, что месторождение Armadillo расположено не в области взбросовых дислокаций, а в переходной части от зоны складчатости (Андийская часть) к континентальной.

Максимальное горизонтальное напряжение  $S_{Hmax}$  с точки зрения расчета считается наиболее сложной составляющей тензора напряжений [4]. Для ограничения области максимального горизонтального напряжения могут использоваться данные микроимиджеров (FMI), предоставляющие ценные сведения о трещинах растяжения, углах вывалов и т. д. Для этого в интервалах карбонатов Caliza A, где наблюдаются трещины растяжения, был построен stress polygon. Stress polygon позволяет оценить магнитуды главных латеральных напряжений, которые теоретически могут существовать в массиве горных пород, не приводя к их разрушению. Для определения границ stress polygon воспользуемся теорией трения при движении разломов [4].

По результатам расчета stress polygon эта величина  $S_{Hmax}$  должна составлять 18,43 ppg. Принимая во внимание неопределенность по оценке прочности породы на сжатие ( $\pm 10\%$ ), диапазон  $S_{Hmax}$  составляет 17,60 – 19,27 ppg. В этом диапазоне, вероятнее всего, должна находиться величина  $S_{Hmax}$ , чтобы на стенке скважины начали образовываться трещины растяжения, и при этом не происходило образование вывалов. На основе проделанного моделирования было принято, что для данного месторождения характерен режим сброса.

По скважинам месторождения Armadillo отсутствуют данные геомеханических исследований керна. Все проведенные испытания были направлены на изучение петрофизических свойств. В связи с этим расчет прочностных свойств проводился на основе общепринятых зависимостей.

Основным результатом моделирования является разработка рекомендаций для сохранения целостности ствола скважины. По результатам расчетов и построения модели можно сделать заключение о том, что величина минимального пластового стресса в песчаниках меньше по сравнению с глинистыми породами. Это объясняется тем, что практически во всех песчаниках-коллекторах наблюдается пониженное пластовое давление, вызванное разработкой залежи. На некоторых скважинах, где сильно снижено пластовое давление, наблюдается значительная разница между напряжениями в глинах и напряжениями в коллекторах-песчаниках. К тому же интервалы глин в пределах формации Наро и Hollin характеризуются повышенными значениями порового давления, что негативно влияет на устойчивость ствола скважины.

Наиболее высокий риск нестабильности стенки скважины связан с разрушениями и образованием вывалов в интервалах неустойчивых глин в пределах формации Наро, а также при бурении вулканогенных пород формации VOLCANIC, где градиент обрушения достигает 12–13 ррг. При вскрытии этих интервалов на стенке скважины возникают окружные напряжения, превышающие прочность горных пород, в результате чего образуются вывалы. Уменьшения магнитуды эффективных окружных напряжений можно добиться за счет увеличения плотности бурового раствора. Однако ввиду пониженного пластового давления в коллекторах песчаниках и, как следствие, низких абсолютных латеральных напряжений, чрезмерное увеличение плотности бурового раствора повысит интенсивность радиальной инфильтрации бурового раствора в коллектора, что приведет к чрезмерному росту фильтрационной корки, а также увеличит вероятность получения затяжек и дифференциальных прихватов при бурении интервалов коллектора. Помимо этого очень сильно возрастает вероятность получения поглощений ввиду разрыва горной породы.

Подбор оптимальной плотности бурового раствора основывается на компромиссе между сохранением целостности ствола скважины и сохранением коллекторских свойств продуктивных интервалов, а также недопущением осложнений, вызванных поглощениями. Для снижения вероятности возможных обрушений стенки ствола скважины в интервалах вулканогенных пород необходимо увеличение плотности бурового раствора с 9,09 ррг до 10,8–11,25 ррг.

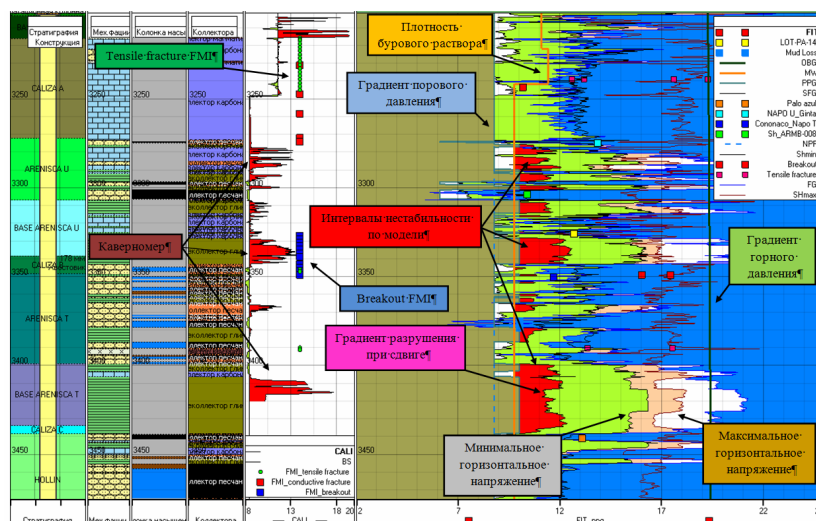


Рис. 2. Анализ устойчивости стенок скважины

При бурении скважины под ОК 245 мм в интервалах Tena–Caliza A рекомендуется использовать буровой раствор с плотностью 10,8 ppg до 11,25 ppg для снижения вероятности возможных обрушений стенки ствола скважины. При бурении скважины под ОК 178 мм в интервалах Arenisca U – Hollin рекомендуется использовать буровой раствор с плотностью 10,4 ppg до 10,7 ppg для снижения вероятности возможных обрушений стенки ствола скважины. На рис. 2 представлен планшет, который подтверждает согласованность результатов моделирования и фактических данных полученных со скважины.

#### Литература

1. Torres M. E., Frydman M., Casalis D., Ramirez A., León F., Villalba E. 3D Analysis for Wellbore Stability: Reducing Drilling Risks in Oriente Basin, Ecuador”. SPE 94758. – LACPEC Brazil. – 2005.
2. J. Toro-Alava, K. Luzuriaga, O. Corozo, L. Coral “Reservoir Characterization and Geological Model for the Lower T Sandstone and Lower U Sandstone, Tapi – TTT Oilfield, Oriente Basin, Ecuador: A Core- and Log-Based Study” SPE-177178-MS – 2015.
3. A. Andrade, R. H. Correa, G. E. Atahualpa, G. Ripa, M. Brignoli, T. Ciccarone “Sand Production Risk Evaluation and Sand Control Screening, the Complete Workflow for the Future Development of the Oglan Field – Ecuador” SPE-185525-MS – 2017.
4. Zoback M. D. Reservoir Geomechanics. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 505 p.

УДК 55:004.9:622.276(476.2)

### **ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ГИС ПО СКВАЖИНЕ № 40S2 НАДВИНСКАЯ. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ГИС**

**В. Н. Чаркина**

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

Геофизические методы исследования скважин, базирующиеся на современных физических методах исследования горных пород, используются для изучения геологического строения недр по скважинным разрезам, выявления и оценки запасов углеводородного сырья, использования промыслово-геофизической информации при проектировании, контроле и анализе, разработке месторождений нефти и газа и технического состояния скважин.

В статье представлено описание основных методов геофизических исследований скважин (ГИС), а также результаты геофизической интерпретации на примере скважины № 40s2 Надвинского месторождения.

Целью работы является выбор наиболее информативного комплекса ГИС для получения максимально возможного объема полезной информации.

Выбор рационального комплекса ГИС зависит в том числе и от целей, которые Заказчик ставит перед исполнителем. В большинстве случаев результатом проведенных каротажных работ является получение следующей информации: 1) литологии; 2) общей и открытой пористости; 3) глинистости; 4) мощности пород-коллекторов, 5) Кн и характера насыщения.

В геоструктурном отношении Надвинское месторождение расположено в пределах Северной структурно-тектонической зоны Припятского прогиба. Девонские подсолевые отложения данной структуры включают две формации: витебско-

ланскую глинисто-терригенную и саргаевско-евлановскую карбонатную – их мы и рассмотрим на примере скважины Надвинская 40s2.

**Комплекс ГИС.** Геофизические методы исследования скважин, базирующиеся на современных физических методах исследования горных пород, используются для изучения геологического строения недр по скважинным разрезам, выявления и оценки запасов углеводородного сырья, использования промыслово-геофизической информации при проектировании, контроле и анализе разработки месторождений нефти и газа и технического состояния скважин.

*Гамма-каротаж (ГК)* – определение естественной радиоактивности, в зависимости от интенсивности  $I_\gamma$  естественного  $\gamma$ -излучения, которое регистрируется прибором, движущимся по стволу скважины.

*Нейтронный гамма-каротаж (НГК)* – породу облучают постоянным потоком нейтронов, а в ответ регистрируют образовавшееся гамма-излучение.

Одним из характерных физических свойств горных пород, которое широко используется при изучении геологического разреза скважин, является способность горных пород проводить электрический ток.

*Боковой каротаж (БК)* – каротаж сопротивления зондами с экранными электродами и фокусировкой тока. Через горную породу пропускают ток и регистрируют сопротивление.

*Акустический каротаж (АК)* – основан на разной скорости распространения упругих волн от источника к приемнику прибора ( $V$  м/сек) в зависимости от литологии, пористости и флюида, заполняющего пустотное пространство горной породы.

*Кавернометрия (ДС)* – в скважинах проводится с целью измерения изменения диаметра скважин, контроля за их техническим состоянием [1].

В апреле 2019 г. забурена скважина 40s2 Надвинская с использованием части аварийного ствола 40 Надвинская. Проектный горизонт – ланско-старооскольский.

Коллектора выделяются на каротажных кривых падениями по ГК, незначительным ростом НГК (относительно глинистой части разреза) и ростом АК (рис. 1).

В местах низких значений кривой ГК (рис. 1) – это неглинистые или слабogliнистые породы, которые могут быть представлены коллекторами.

Незначительный рост значений НГК на фоне низких значений ГК – один из главных качественных признаков наличия пород-коллекторов.

Расчет общей пористости и литологии проводился по методике Заляева, в основу которой заложены функциональные преобразования данных НГК и АК.

Глинистость рассчитывалась по методике Заляева, а также по двум опорным пластикам на основе метода ГК.

Для определения характера насыщения на качественном уровне использовалась нормализация методов сопротивления и метода НГК на плотном и глинистом пластах. Рост кривой сопротивления относительно НГК свидетельствует о наличии углеводорода в пласте коллекторе, снижение кривой сопротивления относительно кривой НГК говорит об обводненности коллекторов.

В скважине 40s2 Надвинская вода от закачиваемой соседней скважины проникла в кровлю старооскольского горизонта. По данным БК в обводненной части отмечается снижение значений сопротивления до 5,5 Ом, в нефтяной части коллектора отмечается рост значений сопротивления выше 30 Ом.

Последующая разработка залежи подтвердила наличие незначительного обводнения пород-коллекторов.



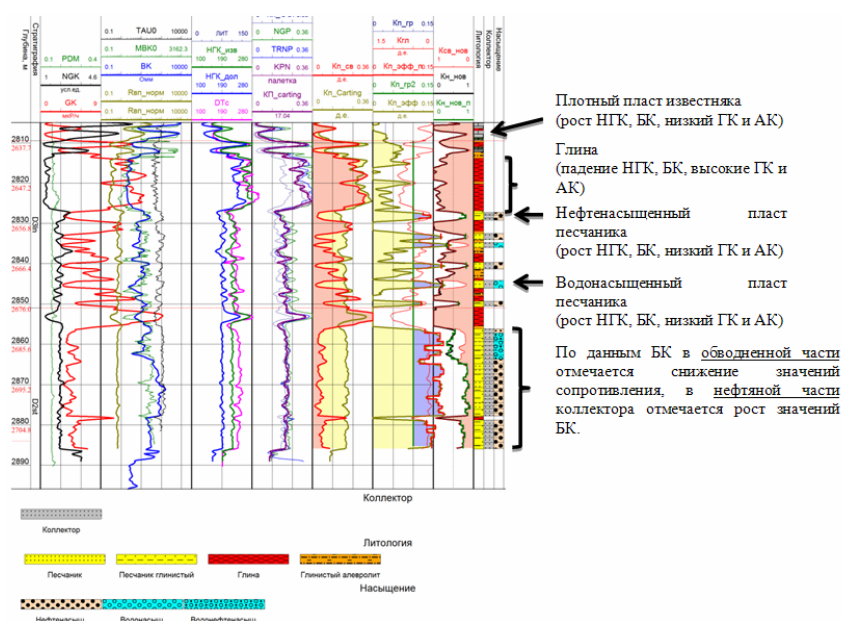


Рис. 1. Планшет по результатам обработки Надвинская 40s2

Таким образом, для определения литологии и пористости необходимы методы ГК, НГК, АК, ГГК-П. Если задача состоит в определении еще и минерального состава глин, а также для выявления аномальных высокогаммных пород-коллекторов, тогда дополнительно можно рекомендовать еще и SGK. Для оценки Кн и характера насыщения в карбонатных породах необходим метод БК и МБК, для оценки Кн и характера насыщения в терригенных породах БК и ИК.

Особенностью ланско-староосткольской залежи Надвинского месторождения является наличие пород-коллекторов с достаточно высокой открытой пористостью, при этом проницаемость пород-коллекторов – низкая. Как следствие, фактические дебиты обычно не достигают проектных.

По данным керна, породы ланско-староосткольской залежи литологически представлены мелкозернистыми разностями крепкого плотного песчаника. Открытая пористость достигает 18–20 %, проницаемость данной породы не превышает 3–10 Мд. Одной из причин низкой проницаемости породы может быть повышенное содержание известковистого и глинистого цемента в песчанике, что негативно сказывается на проницаемости и добычной способности скважин.

Повысить проницаемость данных пород можно используя одну из технологий ГРП. Для этого целесообразно включить в комплекс ГИС методы кросс-дипольного акустического каротажа, а также ГГК-П. Это необходимо для построения 1D геомеханической модели, которая должна быть положена в основу дизайн-проекта ГРП.

Если проведение ГРП все же не планируется или представляется нецелесообразным, тогда вместо кросс-дипольного акустического каротажа необходимо проведение ЯМК в сильном поле, для оценки наиболее проницаемых зон, а также содержания связанной воды. Это необходимо для оптимизации способа освоения и более эффективной разработки залежи.

Таким образом, выбор рационального комплекса ГИС зависит от особенностей литологического состава пород, ФЕС, а также от специальных задач, которые ставятся Заказчиком.

## Литература

1. Мартынова, В. Г. Геофизические исследования скважин : справ. мастера по промысловой геофизике / под общ. ред. В. Г. Мартынова, Н. Е. Лазуткиной, М. С. Хохловой. – М. : Инфра-инженерия, 2009. – 960 с.

УДК 778.39+778.342

**ФОТОДОКУМЕНТИРОВАНИЕ КЕРНА КАК ЭТАП ПОДГОТОВКИ  
КЕРНА К ЛАБОРАТОРНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ****С. О. Гапоненко***РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»  
БелНИПИнефть, г. Гомель*

Цифровая фотосъемка керна — это сложный процесс, включающий точную передачу текстуры и цвета горных пород, минеральных и органических включений, входящих в состав горных пород, наличие каверн, наличие люминесцирующих участков.

Цифровые изображения керна, созданные при фотодокументировании в дневном и ультрафиолетовом свете, используются при описании керна, для построения литолого-седиментологических колонок, для формирования у геолога устойчивой связи внешнего вида керна и его микроскопической структуры при изучении петрографических шлифов. Также фотографии керна в ультрафиолетовом свете используются для оперативного выделения нефтенасыщенных интервалов и прослоек керна, характеристики распределения и уточнения характера нефтенасыщенности интервалов, что способствует правильному и обоснованному отбору образцов на лабораторные исследования.

Целью работы является систематизация имеющихся данных о технической фотографии и уточнение техники фотодокументирования керна при подготовке к дальнейшим лабораторным исследованиям.

Материалы и методы. Подготовка, фотодокументирование и исследования керна проходят в фотолаборатории Центра обработки, исследования и хранения керна в Белорусском научно-исследовательском и проектном институте нефти. Фотолаборатория оснащена фотоустановкой, в которую входят цифровая фотокамера с высоким разрешением, широкоугольный объектив, бокс с источниками дневного и ультрафиолетового света (длина волны 365 нм), тележка с предметным столом для укладки керна, персональный компьютер (рис. 1).

Стены фотолаборатории покрашены в черный, матовый цвет, чтобы исключить попадание постороннего света другого спектрального состава на объект съемки при фотографировании.

Полученные изображения в дальнейшем обрабатываются в графических редакторах.



Рис. 1. Фотоустановка для фотографирования керна

**Методика фотодокументирования.** Для фотографирования используется полноразмерный или распиленный керна (рис. 2, а и 2, б).

Для получения качественных снимков необходимо соблюдать единообразие условий освещения фотографируемых объектов: использование однотипных источников освещения с постоянной и строго контролируемой цветовой температурой; отсутствие постороннего освещения другого спектрального состава; равномерность освещения объекта [1].



Площадь - Речицкая. Скважина № 601.  
Керн - 7. Ящики - 35 - 38.  
Интервал отбора - 2639,7- 2652,9.

а)



Площадь - Речицкая. Скважина № 601.  
Керн - 11. Ящики - 73 - 76.  
Интервал отбора - 2908,4 - 2915,9.

б)

Рис. 2. Полноразмерный (а) и распиленный (б) керна

Для установки точного баланса белого и для точной оценки окраски горных пород при фотографировании в дневном свете используются цветокалибровочные таблицы (рис. 3). Оптимальным фоном для размещения керна является черная подложка [2].



Рис. 3. Цветокалибровочная таблица

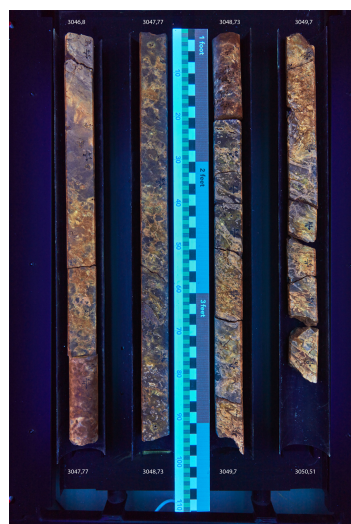
Параметры выдержки и светочувствительности фотокамеры, а также величина открытия или закрытия диафрагмы объектива определяются исходя из особенностей источников освещения и используемого объектива.

При фотографировании керна делается два снимка (рис. 4). Один снимок в дневном свете, второй – в ультрафиолетовом. На снимках, сделанных в дневном свете фиксируют цвет, структурные и текстурные особенности горных пород. На снимках, сделанных в ультрафиолетовом свете фиксируют люминесцирующие участки керна.



Площадь - Летешинская. Скважина № 9.  
Керн - 1. Ящики - 1-4.  
Интервал отбора - 3046,5-3052.

а)



Площадь - Летешинская. Скважина № 9.  
Керн - 1. Ящики - 1-4.  
Интервал отбора - 3046,5-3052.

б)

Рис. 4. Фотография керна в дневном (а) и ультрафиолетовом свете (б)

При съемке в дневном свете распиленного керна, для более детального проявления текстуры горной породы, допускается смачивание поверхности керна водопроводной водой или глицерином. Однако при фотографировании таких объектов следует обращать внимание на возможное образование на поверхности смоченного керна бликов от ламп, что будет искажать текстуру горной породы.

При съемке в ультрафиолетовом свете также необходимо обращать внимание на некоторые особенности. Некоторые горные породы под воздействием ультрафиолетового света люминесцируют, причем характер люминесценции зависит от разных причин, в частности от состава породы. Люминесценция наблюдается при содержании в горной породе карбонатов.

Также характер люминесценции зависит от свойств углеводородов, насыщающих породу. Легкие нефти светятся голубоватым, желтым цветом, нефти средней плотности и тяжелые излучают желтовато-оранжевые, коричневые и буроватые тона.

При фотографировании керна, длительно хранящегося и уже прошедшего стадии отбора образцов на исследования, также может наблюдаться люминесценция. Такая люминесценция может быть связана с различного рода вставками. Это могут быть дерево, бумага или пластик, вложенные в тару вместо кусков керна, отобранных на лабораторные исследования. В отдельных случаях, при фотодокументировании керна в таре, может светиться материал самой тары. Такие помехи не всегда удается исключить в процессе фотодокументирования, и поэтому, при анализе фотографий керна, сделанных при ультрафиолетовом свете, необходимо выявлять и исключать из рассмотрения светящиеся интервалы, слои, пятна и точки, которые могут создать трудности в интерпретации результатов.

В результате проделанной работы были проанализированы и систематизированы данные о технической фотографии, выделены важные пункты фотодокументирования керна, которые, при их соблюдении, позволяют получить фотографии высокого качества в высоком разрешении, содержащие необходимую для дальнейших исследований информацию. В последующем данные файлы помогают более детально изучать керн, а также используются литологическими службами для описания керна и привязки к данным ГИС.

#### Литература

1. Славных, В. А. Цифровая фотосъемка произведений живописи / В. А. Славных, Д. А. Тарасов, В. В. Филимонов // Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации : Междунар. науч.-практ. конф. / Екатеринбург, 19–20 марта 2015 г. – Екатеринбург, 2015. – С. 209–215.
2. Отбор, прием, документирование, обработка, хранение, сокращение, ликвидация керна материала нефтяных и газовых скважин : СТП 09100.17015.230–2019. – Введ. 03.09.2019. – Гомель : РУП «ПО «Белоруснефть», 2019. – 66 с.

УДК 553.982.2

### **ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КУРШСКОЙ ВПАДИНЫ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ДЕБИТЫ НЕФТИ**

**Е. Н. Нерезько, А. Н. Гумерова**

*Российский государственный университет нефти и газа  
(национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина,  
г. Москва*

Основными продуктивными отложениями в пределах Куршской впадины являются среднекембрийские отложения дейменаского горизонта. С точки зрения литологического отношения и вещественного состава, продуктивный горизонт представлен отложениями однородных и мономинеральных кварцевых разнозернистых песчаников, в которых наблюдаются умеренное переслаивание аргиллитов и глинистых алевролитов [1]. В свою очередь, гранулометрический состав данных песчаников разнообразный и меняется как по площади месторождения, так и по его разрезу.

При изучении нефтеносных отложений была построена трехмерная геологическая модель пласта, позволяющая наглядно оценить закономерности изменчивости фильтрационно-емкостных свойств пласта [3]. В ходе построения данной модели было определено, что значения пористости изучаемого пласта изменяются на всем участке исследуемой территории Западно-Куршского вала, увеличиваясь в восточном направлении. Так, значения пористости сводовой части достигают около 14 %,

в то время как на крыльях структуры 9,5 %. Достаточно часто изменения значений пористости зависит от наличия глинистой составляющей в породе. Средневзвешенная проницаемость пласта также имеет изменчивые значения, достигая в сводовой части величины 0,177–0,217 мкм<sup>2</sup>, на крыльях структуры 0,039 мкм<sup>2</sup> [4]. Сложный характер распределения пористости и проницаемости является свидетельством неоднородности целевых пластов, которая связана как с внутренней структурой, так и со вторичными процессами, изменяющими структуру порового пространства. Изменение нефтенасыщенности происходит закономерно в сторону к периферии залежи от сводовой ее части. Наиболее высокие средневзвешенные значения нефтенасыщенности характерны для поднятой сводовой части структуры в чистых кварцевых песчаниках – 93 %, в крыльевых частях значения коэффициента нефтенасыщенности значительно ниже – около 70 %.

Характер изменения дебитов по площади залежей отражает особенности геологического строения среднекембрийских отложений, а именно площадную и слоистую неоднородность, а также изменчивость фильтрационно-емкостных свойств [2].

С целью определения влияния геологической изменчивости фильтрационно-емкостных свойств на процесс извлечения нефти были рассмотрены зависимости дебита нефти от эффективной нефтенасыщенной толщины и проницаемости для продуктивного пласта (рис. 1 и 2).

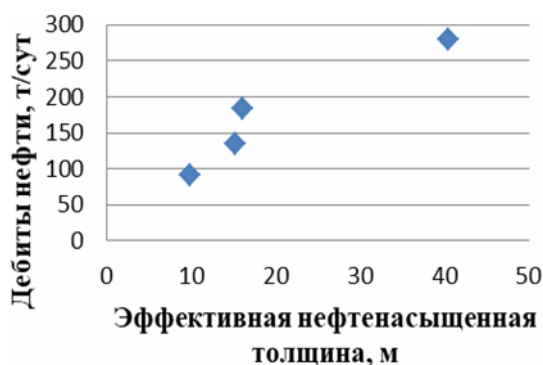


Рис. 1. Зависимость дебита нефти от эффективной нефтенасыщенной толщины

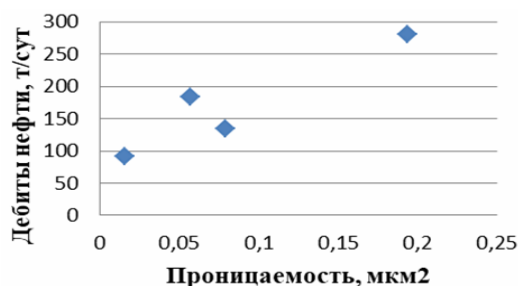


Рис. 2. Зависимость дебита нефти от проницаемости

Изменение дебитов нефти в широких пределах в среднекембрийских отложениях обусловлено геологической неоднородностью коллекторов, которая определяет специфику разработки залежей и ведет к неравномерной выработке запасов [5].

На основании проделанной работы по изучению и анализу геологического строения продуктивных отложений среднекембрийского возраста были сделаны следующие выводы:

1. В целом на всем участке изучаемой территории наблюдается широкий разброс значений пористости, проницаемости, нефтенасыщенности и нефтенасыщенных толщин, что указывает на высокую степень неоднородности данных пластов.

2. При анализе построенных зависимостей дебитов нефти от эффективной нефтенасыщенной толщины и проницаемости было установлено, что с ростом эффективных нефтенасыщенных толщин и показателей проницаемости происходит закономерный рост дебита нефти.

#### Литература

1. Теоретические основы поисков и разведки нефти и газа / А. А. Бакиров [и др.]. – М. : Недра, 2012. – 416 с.
2. Борисов, Ю. П. Влияние неоднородности пластов на разработку нефтяных месторождений / Ю. П. Борисов, В. В. Воинов, З. К. Рябинина. – М. : Недра, 1970. – 288 с.
3. Лобусев, А. В. Геолого-промысловые основы моделирования залежей нефти и газа / А. В. Лобусев. – М. : Недра, 2017. – 333 с.
4. Кесслер, Ю. А. Особенности геологического строения и освоения углеводородного потенциала шельфа Балтийского моря на примере Кравцовского (D6) нефтяного месторождения / Ю. А. Кесслер, О. И. Кузилов, В. М. Десятков // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – № 3. – 49 с.
5. Нефтегазопромысловая геология и гидрогеология залежей углеводородов : учеб. для вузов / И. П. Чоловский [и др.]. – М. : Нефть и газ, 2002. – 456 с.

УДК 66.087.7

### **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ ВОДЫ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ КОНЕЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗВЛЕЧЕНИЯ НЕФТИ**

**М. Л. Мельникова, Д. В. Сердюков**

*Нефтегазодобывающее управление «Речицанефть»,  
Республика Беларусь*

В настоящее время многие нефтяные месторождения находятся на поздней стадии разработки, которая характеризуется ухудшением структуры запасов и ростом обводненности добываемой продукции. В связи с этим проблемы целенаправленного воздействия на пластовые воды и эффективного их использования для увеличения нефтеотдачи представляют актуальную задачу.

В данной работе рассматривается закачка в пласт электрохимически активированной воды (ЭХВ), полученной путем электролиза в электролизных ячейках (электролизерах), как один из физико-химических методов воздействия. Электролизеры состоят из двух электродов: положительно заряженный – анод и отрицательно заряженный – катод. При пропускании тока через воду на аноде происходит процесс окисления, а на катоде – процесс восстановления. Электрохимически активированная вода обеспечивает протекание электрохимических реакций, способствующих изменению химического состава и физико-химических свойств воды. Сопутствующим процессом при этом является электролитический нагрев. Новые свойства пластовой воды, в том числе соотношения выхода окислителя (анолит) и восстановителя (католит), определяются величиной подаваемого на электроды напряжения, временем воздействия, материалами электродов, составом и минерализацией вод.

Достоинством электрохимической активации воды является то, что пластовая вода без внесения в нее химических реагентов преобразуется в активный водный раствор с кислотными или щелочными свойствами. Полученные растворы могут быть использованы для очистки призабойной зоны пласта и воздействия на пласт.

В рамках данной работы были проведены статические исследования на воде путем ее электролиза в специальном непромышленном электролизере «Мелеста». В процессе электролиза прибором «Мелеста» удалось достигнуть изменения рН католита с 7 до 10 за 11–14 минут, а рН анолита с 7 до 3 за 28 минут. Время работы и максимальное изменение рН было ограничено максимальной температурой (35 градусов), до которой может нагреваться прибор, и его мощностью.

Полученная после электрохимического воздействия в прикатодном и прианодном пространстве вода разливалась в открытые и закрытые емкости. Одна часть образцов помещалась в печь, где поддерживалась температура 50–60 градусов (аналог пластовых условий), а вторая часть находилась при комнатной температуре (аналог поверхностных условий).

Каждые два часа на протяжении двух недель производились замеры показателя рН и температуры всех образцов воды портативным прибором Combo.

По результатам проведенных экспериментальных исследований были построены зависимости изменения рН воды со временем в стандартных и пластовых условиях. Как видно на рис. 1, рН католита сохраняет стабильное значение, равное 9 первые 50 часов, затем начинает снижаться. Причем в пластовых условиях данное снижение происходит медленнее и менее существенно – рН не снижается ниже 8,5 (рис. 1). В поверхностных условиях рН католита возвращается к исходному за 200–250 часов. рН анолита сохраняет относительно стабильное значение после электролиза как в пластовых, так и в поверхностных условиях (рис. 1).

Таким образом, по результатам проведенных статических исследований можно сделать следующие выводы:

- Проведением электролиза воды возможно изменить рН воды как в большую (рН = 10–11 католит), так и в меньшую сторону (рН = 3–4 анолит).
- Закупленный прибор «Мелеста» не способен подготовить воду с рН выше 10 из-за малой мощности и ограничения по температуре и минерализации используемой воды.
- После ЭХВ при комнатной температуре католит сохраняет стабильность рН = 9–10 в течение 50 ч и снижается до исходного рН = 7 за 250 ч, анолит сохраняет стабильность рН = 3–4 на протяжении всего времени исследования – 350 ч.
- При пластовой температуре (50–60 °С) католит сохраняет стабильность рН = 9–10 в течение 50 ч и снижается за 250 ч до рН = 8,5, анолит сохраняет стабильность рН = 3–4 на протяжении всего времени исследования – 350 ч.



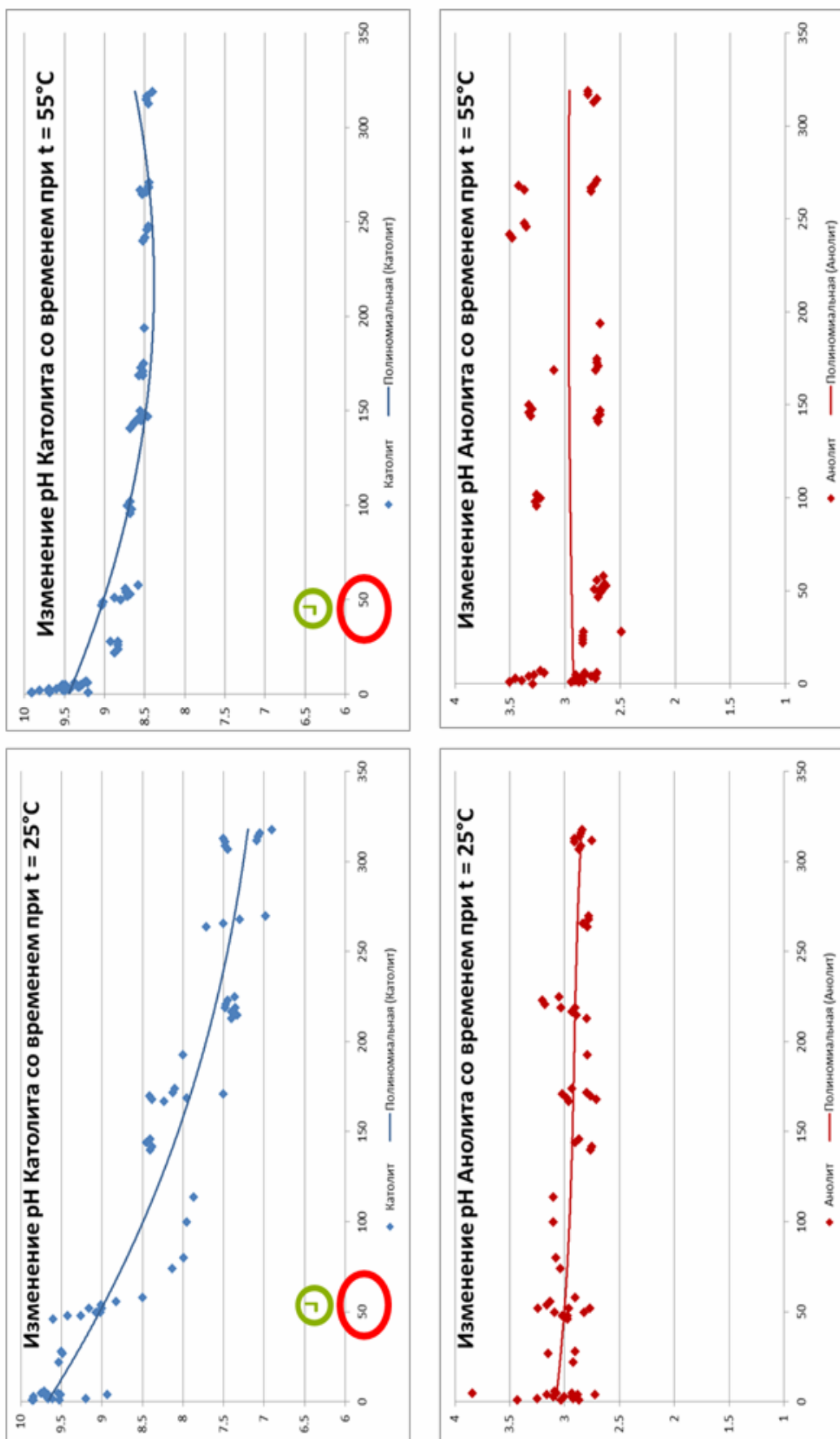


Рис. 1. Результаты статических исследований после электрохимической подготовки воды

В настоящее время НГДУ «Речицанефть» производит закупку более мощного оборудования для проведения дальнейших статических исследований по взаимодействию католита и анолита с пластовыми флюидами (керном) материалами НКТ и измерению величины поверхностного натяжения. В случае получения положительного эффекта в результате проведенных статических исследований будут проведены фильтрационные исследования на керне.

УДК 556.314:662.276(476)

## **ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ЗАСОЛОНЕННЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ**

**В. Д. Порошин, С. Л. Порошина**

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

Проблема разработки нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений является одной из наиболее сложных среди других в нефтегазовом деле. Поэтому вопросам изучения, моделирования, проектирования и регулирования их разработки посвящено огромное количество работ, в том числе ряд основательных учебников и крупных обобщающих монографий. Следует отметить, что в последние десятилетия все чаще такие обобщения стали проводиться раздельно для залежей с различным типом продуктивных пород-коллекторов: терригенных (поровых), карбонатных (преимущественно каверново-поровых и порово-каверновых), трещинных. Это и понятно, так как особенности строения пустотного пространства коллекторов зачастую оказывают решающее влияние на основные технологические показатели и эффективность разработки нефтяных месторождений. Активное формирование нового крупного центра нефтегазодобычи на юге Восточной Сибири, одной из основных особенностей которого является региональное развитие в нефтегазоносных комплексах засоленных коллекторов, наряду с наличием материалов по длительной истории эксплуатации нефтяных месторождений Беларуси, коллекторы которых также существенно осложнены засолением, ставят на очередь вопросы, связанные с работой геотехнологических основ эксплуатации таких залежей. В отличие от традиционных коллекторов нефти и газа, фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) которых практически не изменяются в процессе эксплуатации скважин, разработка залежей с заводнением засоленных коллекторов приводит к многократному изменению их пористости и проницаемости. Последнее связано с растворением галитовых выделений первичного пустотного пространства продуктивных пород закачиваемыми для вытеснения нефти маломинерализованными водами, что, несомненно, должно учитываться как при изучении рассматриваемых месторождений, так и при их освоении.

Решение проблемы повышения эффективности поисков, разведки и разработки залежей углеводородов (УВ) с засоленными коллекторами невозможно без выяснения причин и условий формирования галитовых выделений в пустотном пространстве продуктивных горизонтов и установления на этой основе закономерностей локализации засоленных пород в осадочных комплексах. Решение этой задачи в существенной мере будет затруднено также без достоверного знания гидрогеологических условий эксплуатируемых месторождений и особенностей их изменения в процессе эксплуатации нефтяных залежей, без изучения характера заполнения пус-

тотного пространства пород вторичным галитом и особенно без уточнения влияния вод различного химического состава на процесс рассоления коллекторов, изменение структуры порового пространства, фильтрационно-емкостных и других петрофизических свойств пород. Иначе говоря, для повышения эффективности поисков, разведки и разработки таких месторождений требуется целенаправленное изучение и усовершенствование геологических основ освоения скоплений углеводородов, связанных с осложненными засолением коллекторами.

Своеобразие строения засоленных коллекторов и особенности изменения их петрофизических свойств при взаимодействии с водами пониженной минерализации в процессе эксплуатации нагнетательных и добывающих скважин, в свою очередь, свидетельствуют о необходимости разработки и применения новых лабораторных технологий изучения образцов керна и исследования процесса рассоления пород. Наличие вторичного галита в нефтегазоносных комплексах обусловило целесообразность корректировки существующих технологий обработки и интерпретации результатов гидрогеохимических, полевых и промыслово-геофизических исследований. Новые технологические решения требуются также при проведении работ по моделированию, проектированию, анализу, контролю и регулированию разработки нефтяных, нефтегазовых и нефтегазоконденсатных месторождений, связанных с засоленными коллекторами. Таким образом, существуют все предпосылки говорить о целесообразности комплексного рассмотрения геологических и технологических (геотехнологических) основ изучения и разработки нефтяных и газонефтяных залежей, продуктивные породы-коллекторы которых в той или иной мере заполнены галитом.

Наиболее интенсивно рассмотрением поднимаемых в статье вопросов в последнее десятилетие занимаются специалисты ряда нефтегазовых компаний Российской Федерации, ведущих освоение углеводородных ресурсов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, с привлечением научного потенциала основных научных и учебных центров России. Немало интересных материалов по вопросам разработки нефтяных залежей с засоленными коллекторами накоплено белорусскими учеными и специалистами. Однако полученные в различных компаниях результаты нередко являются неоднозначными, иногда противоречивыми и требуют своевременного анализа, сопоставления и переосмысления с целью обоснования наиболее эффективных направлений дальнейших исследований и внедрения их результатов на практике. Поэтому обобщение опыта изучения и разработки месторождений углеводородов, связанных с осложненными засолением коллекторами, является в настоящее время весьма актуальным и впоследствии должно сказаться на улучшении технологических и экономических показателей нефтедобычи как в Беларуси, так и в России (Восточной-Сибири и Республике Саха (Якутия)).

Введенные в эксплуатацию нефтяные и нефтегазоконденсатные месторождения с засоленными коллекторами Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции в настоящее время находятся на начальных стадиях разработки. Непродолжительная история их освоения заметно затрудняет решение проблем среднесрочного и долгосрочного планирования основных показателей разработки новых залежей и не позволяет использовать ограниченный по времени опыт проведенных работ для уверенного проектирования, моделирования и регулирования введенных в эксплуатацию объектов. Тем не менее проведенные в этом направлении исследования специалистов ведущих нефтегазовых компаний РФ позволили заметно продвинуться в решении данных задач путем моделирования процесса рассоления коллекторов [1]–[3], что в определенной мере должно способствовать более эффективной эксплуатации месторождений на современном этапе. Для решения более долгосрочных прогно-

ных задач повышения эффективности освоения введенных в эксплуатацию залежей Восточной Сибири интересным может оказаться многолетний опыт изучения и разработки нефтяных месторождений Беларуси, которые, как уже отмечалось выше, также связаны с осложненными засолением коллекторами и находятся на завершающих стадиях освоения. Наиболее обстоятельно некоторые из этих вопросов рассмотрены при изучении геолого-гидродинамических и гидрохимических условий разработки отдельных белорусских залежей нефти [4], [5]. Эти исследования позволили впервые создать геолого-гидродинамические модели семилукских залежей нефти Золотухинского и Осташковичского месторождений, межсолевой залежи нефти Осташковичского месторождения, в которых реализовано изменение проницаемости пород-коллекторов за счет их рассоления в процессе разработки. Показано, что рост неоднородности пород по фильтрационно-емкостным свойствам за счет увеличения проницаемости засоленных продуктивных пород при закачке пресной и слабоминерализованной воды в залежь приводит к непрерывному перераспределению пространственной структуры фильтрационного потока, ускорению темпов обводнения продукции и снижению охвата залежей выработкой.

Низкая проницаемость засоленных пород ряда нефтяных залежей или их отдельных участков оказывает негативное влияние на эффективность разработки таких объектов. Проницаемость засоленного коллектора может быть значительно увеличена за счет частичного или полного растворения галитовых включений и выноса продуктов растворения из пласта вместе с попутной водой. Такого результата можно достичь путем закачки пресной или слабоминерализованной воды в засоленный нефтенасыщенный коллектор и последующего отбора жидкости из пласта через эту же скважину. Используя это положение, сотрудники БелНИПИнефть предложили и запатентовали технологию освоения глубоких скважин и регулирования разработки залежей нефти в засоленных коллекторах, внедрение которой проводится в настоящее время на скважинах 21, 17, 7 и 3 Березинского месторождения нефти. В результате реализации этого проекта ежегодно получают дополнительную добычу нефти, в том числе в пределах участков (блоков с самостоятельными залежами) с практически полным засолением коллекторов.

Обобщая вышеизложенное, следует констатировать, что комплекс проводимых исследований и применяемых технологий (геотехнологических основ) разработки нефтегазовых залежей с наличием в пустотном пространстве галитовых включений заметно отличается от такового для месторождений с незасоленными коллекторами. Многие из этих отличительных особенностей до настоящего времени изучены в недостаточной степени и требуют концентрации усилий специалистов ведущих нефтяных научных центров на решении данной проблемы. При разработке нефтяных месторождений с относительно небольшой по запасам УВ в Припятской нефтегазональной области данной проблеме до последнего времени должного внимания не уделялось. С началом активного освоения углеводородных ресурсов крупнейшей по запасам Лено-Тунгусской провинции, получением новых материалов по изучению засоленных коллекторов и их влиянию на освоение нефтегазовых ресурсов данного региона, заметно активизировались и целенаправленные исследования белорусских специалистов в этом направлении. В статье кратко рассмотрены основные результаты этих исследований, полученные российскими и белорусскими специалистами и предложены направления первоочередных работ по усовершенствованию геотехнологических основ разработки нефтегазовых месторождений с засоленными коллекторами. Учитывая важность решаемых задач для повышения эффективности освоения ресурсного потенциала нефтегазоносных регионов с широким развити-

ем засоленных коллекторов, авторами предлагается направить совместное усилие специалистов России и Беларуси на решение первоочередных из них. К таким задачам, прежде всего, следует отнести обобщение всех накопленных в этом направлении данных и полученных результатов и дальнейшее совершенствование геотехнологических основ освоения подобных нефтяных и газоконденсатных месторождений. Мы полагаем, что совместные творческие усилия специалистов различных нефтегазовых компаний и научных организаций позволят заметно продвинуться в решении многих из вышеперечисленных задач, что положительно скажется на эффективности освоения углеводородных ресурсов, сосредоточенных в засоленных коллекторах.

#### Л и т е р а т у р а

1. Гринченко, В. А. Повышение эффективности выработки запасов нефти в засоленных коллекторах : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Гринченко. – Тюмень : ТюмГНУ, 2013. – 24 с.
2. Теория и практика разработки сложнопостроенных коллекторов Восточной Сибири на примере Верхнечонского месторождения / А. Чиргун [и др.] // Докл. SPE-189301 – RU, 2017. – 42 с.
3. Особенности фильтрационного течения через нестационарные дисперсные среды, представленные засоленными терригенными породами-коллекторами / Б. А. Григорьев [и др.] // Вести газовой науки. – 2014. – № 2. – С. 90–97.
4. Жогло, В. Г. Геолого-гидродинамические условия разработки залежей нефти в засоленных карбонатных коллекторах (на примере Золотухинского и Осташковичского месторождений Припятского прогиба) / В. Г. Жогло, С. И. Гримус. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 170 с.
5. Зимин, С. В. Освоение углеводородов в засоленных коллекторах Припятского прогиба и юга Сибирской платформы / С. В. Зимин, В. Д. Порошин, С. И. Гримус // Нефтяное хоз-во, 2020. – № 2. – С. 22–27.

УДК 550.83.017-047.58

### **ПОСТРОЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕЖСОЛЕВЫХ И ВНУРИСОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ДОМАНОВИЧСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРВАЛОВ ГАЛИТИЗАЦИИ**

**А. В. Сошенко, И. В. Качура**

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

**В. А. Семенова**

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

Материалы геофизических исследований скважины (ГИС) составляют информационную основу для построения петрофизических, геологических и гидродинамических моделей, подсчета и пересчета запасов нефтяных и газовых залежей и определения степени их выработки. Достоверность решения перечисленных задач зависит от применяемого комплекса ГИС, полноты его выполнения и качества получаемых материалов. Комплекс геофизических исследований определяется в зависимости от поставленных геологических задач, геолого-геофизической характеристики изучаемого разреза, степени его изученности и условий скважинных измерений.

Так как породы внутрисолевых и межсолевых отложений Северо-Домановичского месторождения отличаются многокомпонентным составом скелета, для построения их объемной минералогической модели требуется использование расширенного комплекса методов геофизических исследований скважин с обязательным включением нейтронного, литоплотностного и акустического методов. При проведении работ на рассматриваемом месторождении обязательный комплекс включал в себя кавернометрию, резистивиметрию, боковой, радиоактивный, акустический, импульсный нейтрон-нейтронный и спектрометрический каротажи, а также гамма-гамма плотностной и литоплотностной каротажи.

В работе были рассмотрены аспекты первичной обработки данных ГИС, а также выполнения многоскважинной нормализации показаний методов ГИС и синтеза показаний метода ГГК-П в недостающих интервалах по данным остальных методов ГИС.

Объемное содержание минеральных компонентов горной породы оценивалось по данным комплекса ГИС с помощью инверсионного метода, в основе которого лежит решение системы линейных уравнений:

$$f_i = \sum e_{ij} V_{jmj} = 1, i = 1, n,$$

где  $f_i$  – показания  $i$ -го метода ГИС, линейно связанные с объемным содержанием каждой из слагающих его компонентов;  $e_{ij}$  – теоретическое значение параметра  $i$  для компоненты  $j$ ;  $V_j$  – объемное содержание компонента  $j$ ;  $m$  – количество объемных компонентов, слагающих породу.

Основной задачей работы являлось решение обратной задачи ГИС, с помощью метода оптимизационной инверсии, где каждому объемному компоненту породы задавались границы неопределенности значений геофизического параметра. Решение обратной задачи ГИС при определении объемного содержания компонентов породы сопровождается получением множества решений, которые удовлетворяют заданной системе уравнений. Выбор окончательного варианта осуществлялся при оптимальном соответствии с результатами лабораторных исследований на керне.

Скважины, в которых проводился полный комплекс ГИС и лабораторные исследования на образцах керна, были разбиты на две группы: опорная и тестовая. Поскольку количество выходных параметров превышает количество входных, возникает инвариантность решения системы уравнений. Для уменьшения неоднозначности решения настройка алгоритма моделирования выполнялась на данных опорной группы скважин итерационным методом в два этапа.

На первом этапе использовалась упрощенная объемная модель без учета галита, были заданы теоретические значения показаний методов в эталонных средах. На этом этапе производился расчет объемных долей и сопоставление с результатами лабораторных исследований, в результате чего были получены объемные содержания основополагающих минералов в породе со средней степенью достоверности. На втором этапе объемная модель усложнялась добавлением в нее объемного содержания галита, которое являлось выходным параметром.

В результате построения объемных моделей на группе опорных скважин было выполнено сопоставление полученных данных с результатами лабораторных исследований на керне в разрезе скважин. Дальнейшее опробование метода оптимизационной инверсии для контроля построения детальной объемной модели было выполнено в скважинах из тестовой группы. Анализ объемных моделей как в опорной, так и в тестовой группе скважин указывает на хорошую корреляцию с керновыми данными.

Немаловажной задачей являлось также построение объемной модели пород при отсутствии входной кривой ГГК-П. Для этого было выполнено синтезирование кривой объемной плотности породы по данным других методов. Контроль качества полученной модели в таких скважинах осуществлялся путем сопоставления с данными керна.

В данной работе также было выполнено моделирование показаний методов ГИС при различной степени галитизации породы.

Моделировались следующие условия:

- открытая пористость, заполненная галитом;
- объем, занятый галитом, насыщался флюидом;
- 20 % объема матрицы замещалась галитом;
- объем, занятый галитом, замещался минералами матрицы (кальцит, доломит).

В результате моделирования было выявлено, что для достоверного определения объемного содержания галита в породе, необходимо его присутствие более 5 %. Для построения достоверной объемной модели для данного типа отложений необходимо использовать расширенный комплекс ГИС, с обязательным применением метода ГГК-П.

Таким образом, в результате проведенной работы была уточнена петрофизическая модель для построения объемной модели породы и определения минералогического состава и коэффициента пористости пород с многокомпонентным составом скелета. Были определены коэффициенты объемного содержания галита в породе и смоделированы показания методов ГИС при различной степени галитизации породы, а также даны рекомендации по отбору кернового материала и комплексу ГИС для дальнейшего уточнения петрофизической модели пород многокомпонентного состава.

#### Литература

1. Заляев, Н. З. Методика автоматизированной интерпретации геофизических исследований скважин / Н. З. Заляев. – Минск : Университетское, 1990. – 142 с.
2. Стрельченко, В. В. Геофизические исследования скважин / В. В. Стрельченко. – М. : Недра, 2008. – 550 с.
3. Латышова, М. Г. Практическое руководство по интерпретации данных ГИС / М. Г. Латышова, В. Г. Мартынов, Т. Ф. Соколова. – М. : Недра, 2007. – 327 с.

УДК 655.5

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТДЕЛЕННОГО ЖИДКОГО КОНДЕНСАТА ОТ СОСТАВА ПРИРОДНОГО ГАЗА, ПРИМЕНЯЕМОГО В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ**

**Дж. Батманов, К. Атаев, Ш. Акмурадов**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Газотурбинные электростанции ПАЭС-2500 кВт (передвижная автоматизированная электрическая станция) мощностью  $N = 2500$  кВт предназначена для использования в качестве основного источника электропитания промышленных и бытовых потребителей при отсутствии магистральной электрической сети, а также для покрытия пиковых нагрузок в качестве аварийного источника электропитания при наличии магистральной сети.

Основным (главным) приводом для вращения генератора тока мощностью  $N = 2500$  кВт является газотурбина.

Для пуска и постоянной работы газотурбины топливом является природный газ.

Климатическое условие газотурбинной электростанции предусмотрено от  $-50$  до  $+55$  °С с частотой колебания  $\nu = 50$  Гц.

Перед подачей топлива (природного газа) в камеру сгорания требуется тщательная очистка от механических примесей, пыли и жидкого конденсата. Выполнение этих технических требований считается необходимым, чтобы избежать неприятных случаев. Изготовление форсунок и плунжеров камеры сгорания требует очень тонкого подхода.

Для тщательной очистки природного газа предусмотрена специальная установка (рис. 1) состоящая: из ПУ (пылеуловителя); ФС (фильтра сепаратора); V (резервуар) для сборки жидкого конденсата; ПАЭС (передвижная автоматизированная электрическая станция); запорной арматуры.

Давление топливного газа магистрального газопровода  $P_1$  требуется снизить до потребляемого давления камеры сгорания  $P_2$  газотурбины. Для этого в схеме предусмотрен регулирующий клапан.

Отрегулированный давлением природный газ дает возможность подачи его во входной патрубке ПУ для дальнейшей очистки его от механических примесей, пыли и жидкого конденсата.

Попадая во внутреннюю полость пылеуловителя, поток природного газа подвергается вихревому движению. В результате вихревого движения природного газа тяжелые частицы механических примесей попадают на дно сосуда. Попадание механических примесей на дно сосуда происходит из-за соприкосновения этих частиц со стенками сосуда, работающих под давлением.

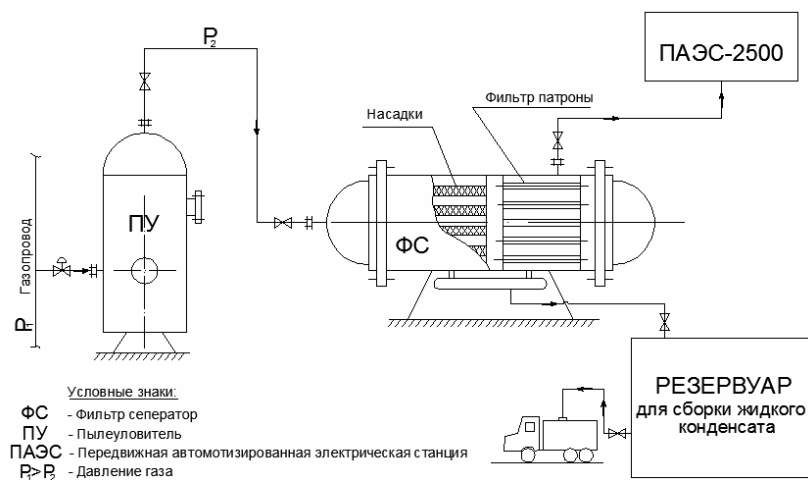


Рис. 1. Установка очистки природного газа от жидкого конденсата

Очистка сосудов производится после повышения перепада давлений  $\Delta = P(\text{вх}) - P(\text{вых})$ . При повышении перепада давлений  $\Delta P = 0,4 \div 0,5$  ата проводится техническое обслуживание. Пылеуловитель перед проведением технического обслуживания сосуда обесточивается от линии подачи природного газа со входа и выхода. Сосуд стравливается и опустошается, затем через специальные люки очищается от грязных механических примесей. Очищенный сосуд плотно закрывается люком и подвергается гидравлическому испытанию. Гидравлическое испытание проводится согласно техническим требованиям по эксплуатации оборудования. При проведении гидравлического испытания применяется коэффициент  $K = 1,25$ , т. е.  $P(\text{г. и}) = P(\text{раб}) \cdot 1,25$ .



Очищенный от механических примесей природный газ по потоку попадает в первый отсек фильтра сепаратора. Первичная очистка от жидкого конденсата происходит при соприкосновении потока газа с поверхностью насадок, которые расположены в первом отсеке, затем поток попадает во второй отсек сосуда, где происходит тонкая очистка, протекая через фильтр-патроны.

Происходит очень тонкая степень очистки фильтров-сепараторов. Конструкция фильтр-патронов изготовлена из ситы мелкого размера, что обуславливает глубокое отделение жидкого конденсата от состава природного газа.

Тонко очищенный природный газ соответствующий по всем показателям, попадает в камеру сгорания, что является стимулом для начало вращения ротора газотурбинной установки.

В этой установке образованная тепловая энергия превращается в механическую энергию  $E$  (тепловая)  $\rightarrow E$  (механическое), что создает вращение электрического генератора. Вращением генератора вырабатывается электрическая энергия.

При тонкой очистке через фильтр-патроны сепаратора набранная жидкость капливаются в дренажной емкости, расположенной в нижней части сосуда.

Отделенный жидкий конденсат собирается в специальных резервуарах. Затем собранный жидкий конденсат отправляется с помощью транспортных средств на нефтеперерабатывающие заводы, где осуществляется дальнейшая переработка во фракционирующих колоннах для получения нефтепродуктов по разным октановым числам.

Очищенные фракционированные по октановому числу нефтепродукты широко применяются во многих отраслях народного хозяйства нашей страны.

Гидравлическое испытание фильтра-сепаратора проводится аналогично, как и у пылеуловителя. При проведении гидравлического испытания повышение и снижение давления проводится поэтапно.

#### Л и т е р а т у р а

1. Новиков, В. А. Технология производства и монтажа паровых и газовых турбин / В. А. Новиков. – Екатеринбург, 2009.
2. GE Power. Учебное руководство. Курс обучения по эксплуатации газовых турбин.

УДК 622.276.6

### **УТОЧНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПАВ-ПОЛИМЕРНОМ ЗАВОДНЕНИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КЕРНОВЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**К. С. Карсеко**

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

В зависимости от того, за счет чего происходит восполнение энергии пласта и обеспечивается продвижение нефти к забоям добывающих скважин, выделяют три способа разработки нефтяных месторождений: первичный, вторичный и третичный. Первичный способ основан на извлечении нефти с использованием потенциала внутренней энергии пласта. Коэффициент извлечения нефти в таком случае не превышает 0,3. Вторичный способ осуществляется за счет внедрения в пласт воды или газа с целью поддержания пластового давления. Вторичный способ разработки является наиболее распространенным, коэффициент извлечения нефти может достигать 0,5.

К третичному способу относят методы увеличения нефтеотдачи. Эти методы основаны на извлечении нефти с использованием потенциала внутрипластовой энергии за счет закачки агентов, отличающихся от используемых при вторичном способе повышенным потенциалом вытеснения нефти: тепловые, газовые, химические, микробиологические. Другими словами, третичный способ – это способ, при котором не только искусственно поддерживается пластовое давление, но и изменяются свойства агентов вытеснения или свойства нефти, содержащейся в пласте, и таким образом обеспечивается повышение степени извлечения нефти из пласта.

Среди всех методов увеличения нефтеотдачи химические методы (закачка щелочей, поверхностно-активных веществ (ПАВ), полимеров – ASP flooding) являются наиболее успешными. Вместе с тем данные методы являются наиболее сложными и требуют детального изучения.

ASP представляет собой метод комплексного воздействия на пласт водными растворами щелочей, ПАВ и полимеров. Каждый из перечисленных химических агентов выполняет в этой технологии свои функции.

Водорастворимый полимер увеличивает вязкость нефтевытесняющей жидкости, приближая ее к вязкости вытесняемой нефти. В результате повышаются эффективность вытеснения и охват пласта воздействием.

Поверхностно-активное вещество выполняет функции нефтеотмывающего агента и снижает межфазное натяжение воды на границе с нефтью. Молекулы ПАВ адсорбируются на границе раздела двух фаз, за счет чего происходит уменьшение свободной энергии и межфазное натяжение уменьшается. В результате нефть становится более подвижной и увеличивается коэффициент извлечения нефти.

Щелочь, адсорбируясь на поверхности пор горной породы, уменьшает адсорбцию ПАВ. Кроме того, щелочь может взаимодействовать с кислотными компонентами нефти, вызывая образование естественных ПАВ, которые действуют так же, как синтетические и способствуют снижению межфазного натяжения.

Целью данной работы является воспроизведение результатов фильтрационного эксперимента по закачке ПАВ-полимерной композиции на составной модели песчаника месторождения Л. в гидродинамическом симуляторе с целью уточнения результатов лабораторных исследований основных параметров химических реагентов и их масштабирования на полномасштабную модель для моделирования пилотного участка.

Возможность довытеснения нефти растворами ПАВ в основном прогнозируется на основании их способности уменьшать капиллярные силы, повышая тем самым значения капиллярного числа  $N_c$ , характеризующего соотношение между вязкими и капиллярными силами:

$$N_c = \frac{\mu v}{\sigma},$$

где  $\mu$  – вязкость вытесняющей жидкости;  $v$  – линейная скорость фильтрации;  $\sigma$  – межфазное натяжение на границе «нефть – вытесняющая жидкость».

На эффективность нефтеотдачи, особенно для обводненного пласта, влияет отношение подвижности вытесняющего раствора ( $\lambda_w$ ) к подвижности вытесняемой нефти ( $\lambda_o$ ):

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o}.$$

Нефтеотдача продуктивных пластов определяется совокупностью целого ряда факторов, из которых отношение подвижностей воды и нефти является одним из наиболее важных. Для большинства залежей нефти отношение подвижностей оказывается неблагоприятным. Относительная подвижность больше 1 может способствовать образованию так называемых «языков вытеснения» и привести к прорыву воды к добывающим скважинам, поэтому оптимальной считается величина относительной подвижности равной или же меньше 1.

Методика проведения фильтрационного исследования состояла в следующем. В составной модели пласта, параметры которой представлены в таблице, создавалась начальная нефтенасыщенность методом вытеснения. Далее через модель пласта прокачивалась вода до полного прекращения выхода нефти и стабилизации фильтрационных процессов. По методике JBN, основанной на анализе экспериментальных данных по нестационарной фильтрации с постоянным объемным расходом вытесняющего флюида, определялись фазовые проницаемости с использованием метода материального баланса. По объему вытесненной из модели нефти рассчитывались коэффициенты остаточной нефте- и водонасыщенности, а также коэффициент вытеснения. После этого происходила закачка 0,5 PV оторочки ПАВ-полимерной композиции и 0,5 PV раствора полимера. После закачки химических композиций в модель пласта закачивалась вода в объеме не менее 2 PV до стабилизации фильтрационных процессов. При закачке фиксировался перепад давления, а на выходе из кернодержателя производился отбор проб флюидов в мерные пробирки. В отобранных пробах определялось содержание нефти и воды, а в водной фазе – вязкость, концентрация реагентов; определялись коэффициент вытеснения и остаточная нефтенасыщенность.

Таблица 1

**Характеристики образцов кернового материала, использованного при формировании модели пласта**

Номер образца	Длина, см	Диаметр, см	Площадь, см <sup>2</sup>	Проницаемость, мД	Пористость, %
1	3,838	2,974	6,943	272	26,2
2	3,837	2,97	6,924	249	26,6
3	3,841	2,973	6,938	288	26,4
4	3,845	2,973	6,938	300	26,5
<i>Итого</i>	<b>15,361</b>	<b>2,973</b>	<b>6,936</b>	<b>277,26</b>	<b>26,4</b>

На начальном этапе проекта проводился набор лабораторных испытаний для определения состава ПАВ-полимерной композиции, наиболее эффективно работающего в условиях месторождения. Эти данные послужили основой при воспроизведении фильтрационного эксперимента в гидродинамическом симуляторе.

Поведение полимерного раствора характеризуется следующими параметрами:

- адсорбция полимера;
- недоступный поровый объем;
- остаточный фактор сопротивления – коэффициент изменения проницаемости породы после прокачки полимерного раствора в результате его адсорбции;
- вязкость и ее изменение в зависимости от скорости сдвига;
- совместимость растворов с пластовой и закачиваемой водами;
- деструкция.

Важными свойствами ПАВ являются:

- изменение межфазного натяжения на границе «вода – нефть» в зависимости от концентрации реагента;
- адсорбция;
- растворимость и совместимость растворов с пластовой и закачиваемой водами.

В результате выполненной работы после достижения приемлемой сходимости результатов гидродинамического моделирования с результатами фильтрационных исследований были уточнены форма относительных фазовых проницаемостей и ключевые параметры ПАВ-полимерной композиции. Уточненные параметры будут использованы для моделирования пилотного участка на полномасштабной модели и выбора оптимальной стратегии работ по повышению нефтеотдачи пласта.

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАСШТАБНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ВОДОЙ НА ПОЛНОРАЗМЕРНОМ КЕРНОВОМ МАТЕРИАЛЕ**

**А. А. Цагельник, Е. Н. Ходьков, А. А. Ерошенко**

*РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»*

*БелНИПИнефть, г. Гомель*

Изучение фильтрационных процессов на моделях пласта имеет важное значение в области нефтедобычи. Основными направлениями исследований являются: определение коэффициента вытеснения нефти различными флюидами, тестирование водоизоляционных составов, технологий по повышению нефтеотдачи пластов и тестированию технологических жидкостей различного назначения. Основным критерием, определяющим качество проводимых работ, является соблюдение принципа подобия путем создания условий максимально приближенных к естественным условиям выбранного объекта исследования. Ключевым при этом является подбор и подготовка кернового материала с необходимыми литологическими характеристиками и фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС).

Традиционные подходы к проведению исследований на стандартных образцах керна (диаметр 30 мм) ограничиваются главным образом изучением порового типа коллектора, при этом практически не учитывается сложное строение и неоднородности. Поэтому образцы полноразмерного керна (диаметр 60 мм и более), имеющие больший геометрический размер и объем, являются наиболее представительными объектами изучения и позволяют значительно снизить влияние масштабного фактора. Исследования на таких образцах более корректно отражают структуру порового пространства и фильтрующихся каналов, чем на образцах керна стандартного размера (рис. 1).

Исследования по определению коэффициентов вытеснения нефти водой в пластовых условиях были выполнены на полноразмерных образцах керна: № 6 (скв. 7 Давыдовского месторождения (D<sub>3el</sub>)); № 3 и 4 (скв. 299 Речицкого месторождения (D<sub>3sm</sub>)); № 5А и 5Б (скв. 238 Речицкого месторождения (D<sub>3ln</sub>)). Характеристики полноразмерных образцов представлены в таблице.



*Рис. 1.* Фотографическое изображение полноразмерных образцов керна и выпиленных из них образцов стандартного размера:

1 – полноразмерный образец № 6 и выпиленные из него стандартные образцы № 6А и 6Б (скв. 7 Давыдовского месторождения ( $D_{3el}$ )); 2 – полноразмерные образцы № 4 и 3 и выпиленные из них стандартные образцы № 3\* и 4\* (скв. 299 Речицкого месторождения ( $D_{3sm}$ )); 3 – полноразмерные образцы № 5А и 5Б и выпиленные из них стандартные образцы № 5А\* и 5Б\* (скв. 238 Речицкого месторождения ( $D_{3ln}$ ))

Для изучения влияния масштабных эффектов были также выполнены фильтрационные исследования по определению коэффициентов вытеснения нефти на моделях пласта, состоящих из образцов керна стандартного размера (диаметр 30 мм) и выпиленных из образцов полноразмерного керна, охарактеризованных выше. Направление выпиливания стандартных образцов керна из полноразмерных соответствовало направлению фильтрации флюидов. Подготовка к исследованиям как полноразмерных, так и стандартных образцов керна заключалась в экстрагировании от углеводородов и солей, сушке, создании остаточной водонасыщенности с последующим моделированием начальной нефтенасыщенности. Как видно из результатов исследований (см. таблицу), размер образцов керна, выбранных для экспериментов, оказывает заметное влияние на фильтрационно-емкостные свойства.

Так, на моделях пласта представленных терригенными отложениями (скв. 238 Речицкого месторождения ( $D_{3ln}$ )) с поровым типом пустотного пространства, фильтрация пластовых флюидов как на полноразмерных, так и на стандартных образцах происходит по сходной системе каналов. Фильтрационно-емкостные свойства образцов, а также значения коэффициентов вытеснения нефти сопоставимы. Достоверность получаемых результатов в данном случае не зависит от геометрического размера образца.

Для карбонатных сложнопостроенных коллекторов (скв. 7 Давыдовского месторождения ( $D_{3el}$ ), скв. 299 Речицкого месторождения ( $D_{3sm}$ )), ситуация не столь однозначная. Структуру пустотного пространства карбонатного коллектора, в общем случае, можно рассматривать как систему крупных пустот (каверны, трещины, очаги крупных пор), сообщающихся за счет системы более мелких пустот (микротрещины, мелкие поры). Таким образом, коэффициенты вытеснения нефти водой для сложнопостроенных в значительной степени могут зависеть как от подбора кернового материала (наличие неоднородностей), так и от геометрических размеров исследуемого образца.

Таблица

**Основные показатели вытеснения нефти водой из линейных моделей пласта, представленных полноразмерными и выпиленными из них стандартными образцами керна**

Наименование (обозначение) параметров	Значения параметров для моделей					
	Полноразмерные модели пласта			Стандартные модели пласта		
Номер модели	1	2	3	4	5	6
Номер скважины/месторождение/залежь	Скв. № 7, Давыдовское месторождение, D3el	Скв. № 299, Речицкое месторождение, D3sm	Скв. № 23, Речицкое месторождение, D3st	Скв. № 7, Давыдовское месторождение, D3el	Скв. № 299, Речицкое месторождение, D3sm	Скв. № 238, Речицкое месторождение, D3st
Структура порового пространства	Порово-трещинная	Порово-кавернозно-трещинная	Поровая	Порово-трещинная	Порово-кавернозно-трещинная	Поровая
Длина $l$ , см	11,093	10,040	12,770	10,306	3,653	10,651
Диаметр $D$ , см	5,85	6,26	6,20	2,90	2,89	2,90
Пористость $m$ , %	8,8	9,8	20,3	8,4	7,8	19,3
Газопроницаемость, мД	7,102	2,354	68,412	3,527	0,429	62,993
Начальная нефтенасыщенность, %	69,2	81,6	77,1	68,2	66,8	77,6
Остаточная нефтенасыщенность, %	35,7	33,4	32,3	37,5	33,7	32,0
Коэффициент вытеснения нефти, %	48,45	56,66	59,11	44,94	49,62	58,78

В результате выполненных экспериментов на полноразмерных образцах керна, а также выпиленных из них стандартных образцов установлено, что при определении коэффициента вытеснения нефти водой на керновом материале, имеющем сложную структуру порового пространства, следует учитывать масштабные эффекты, так как стандартные образцы керна не отражают полную картину фильтрационных свойств породы со сложнопостроенным типом коллектора, что может приводить к недостоверным результатам.

Так, на породах, представленных карбонатами и имеющих порово-трещинный и порово-кавернозно-трещинный тип, значения коэффициентов вытеснения водой на полноразмерных образцах на 3–7 % выше, чем на выпиленных из этого же материала стандартных образцах керна. Это объясняется высокой пространственной неоднородностью, выраженной в полноразмерных образцах, в то время как стандартные образцы в основном представлены плотной матричной частью породы, вытеснение нефти из которой возможно только при создании значительного перепада давления. При этом на образцах керна, представленных песчаниками и имеющих поровый тип коллектора, значения коэффициентов вытеснения нефти водой, определенные на стандартных и полноразмерных образцах керна, отличаются не значительно (в пределах погрешности измерений).

## Литература

1. Особенности изучения фильтрационных характеристик ориентированного керна сложнопостроенных карбонатных коллекторов / И. П. Гурбатова [и др.] // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 9. – С. 79.
2. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях : ОСТ 39-195–86. – М., 1986.
3. Смахов, Е. М. Вторичная пористость горных пород-коллекторов нефти и газа / Е. М. Смахов, Т. В. Дорофеева. – Л. : Недра, 1987. – 96 с.
4. Ломизе, Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах / Г. М. Ломизе. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1951. – 127 с.
5. Барентблатт, Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г. И. Барентблатт, В. М. Ентов, В. М. Рижик. – М. : Недра, 1984. – 208 с.
6. Породы горные. Методы определения коллекторских свойств : ГОСТ 26450.0–85.
7. Юрьев, А. В. Методические рекомендации по моделированию остаточной водонасыщенности в лабораторных условиях на образцах полноразмерного керна / А. В. Юрьев, Д. Б. Чижов // Arctic Environmental Research. – 2015. – № 1. – Р. 50–55.
8. С. McPhee, «Core Analysis: A Best Practice Guide» / J. Reed, I. Zubizarreta – Developments in Petroleum Science, 2015. – Vol. 64.
9. API RP 40 “Recommended Practices for Core Analysis” Recommended Practice, Second Edition, 1998.
10. Torsæter, O., Abtahi, M. «Experimental Reservoir Engineering Laboratory Work Book» Norwegian University of Science and Technology, Department of Petroleum engineering and Applied Geophysics, 2003.

УДК 622.276.5:550.064.45(476)

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ КЕРНА. ОСОБЕННОСТИ  
СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИК ОТБОРА И ПОДГОТОВКИ КЕРНА  
К ЛАБОРАТОРНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ**

**Д. А. Шенец, А. А. Ерошенко, В. В. Даниленко**

*РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»*

*БелНИПИнефть, г. Гомель*

Керн – образец горной породы цилиндрической формы, извлеченный из скважины при бурении на стадии геологоразведочных работ. Важность изучения и исследования кернового материала заключается в получении первичной геологической информации – об особенностях строения нефтегазовых комплексов (залежей), литологического состава и генезиса, а также фильтрационно-емкостных и других свойствах пород-коллекторов. Комплексные лабораторные исследования, проводимые на керне, являются основой при интерпретации материалов геофизических исследований скважины (ГИС), сейсморазведки, а также открывают новые перспективные направления при поиске и разведке месторождений углеводородов.

Подготовка кернового материала к проведению лабораторных исследований должна соответствовать современным научным и производственным требованиям. Методики и схемы отбора образцов могут различаться в зависимости от степени изученности объекта, качества отобранного керна, а также планируемых видов лабораторных исследований.

На базе Центра обработки, исследования и хранения керна БелНИПИнефть РУП «ПО «Белоруснефть» при отборе образцов учитываются результаты комплексных работ, проводимых на этапе первичной обработки и изучения керна (рис. 1): измерение общей и спектральной гамма-активности керна; измерение объемной плот-

ности керна; привязка керна к данным ГИС; продольная распиловка керна на 1/3 и 2/3; фотодокументирование 2/3 распиленного керна в дневном (белом) и ультрафиолетовом свете с интерпретацией полученных результатов; макроскопическое описание керна.

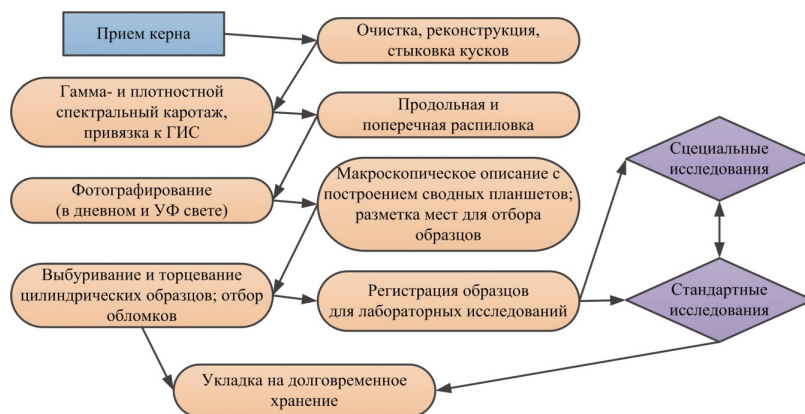


Рис. 1. Схема первичной обработки керна в Центре обработки, исследования и хранения керна БелНИПИнефть

Измерение общей и спектральной гамма-активности, а также объемной плотности керна проводится с помощью специализированной гамма-спектрометрической установки. Результатом таких измерений является получение гамма-каротажа с распределенными по всей длине керна значениями естественных радиоактивных элементов – содержания калия (K), урана (U), тория (Th), а также плотностного каротажа [1].

На основании полученных результатов проводится привязка керна к ГИС, которая заключается в сопоставлении гамма-каротажа, полученного на керне и каротажа, полученного в скважине, путем сравнения положения кривых относительно друг друга. Итогом привязки является корректировка интервала отбора керна по глубине.

После привязки керна к ГИС проводится его продольная распиловка на 1/3 и 2/3. С целью изучения структурно-текстурных особенностей пород, а также определения классов нефтегазобитумопроявлений проводится фотодокументирование 2/3 распиленного керна в дневном (белом) и УФ свете.

Заключительным подготовительным этапом является макроскопическое описание керна, основанное на определении основных литотипов пород, различающихся по минералогическому составу, структурно-текстурным особенностям, генезису, а также фильтрационно-емкостным свойствам с формированием сводных планшетов и выбором оптимальных мест отбора образцов на комплекс петрографических и лабораторных исследований.

Основные методики отбора образцов керна основаны на следующих подходах:

- с равномерным шагом по всей длине керна, применимым в разрезах с мощными выдержанными толщами (рис. 2, а);
- с неравномерным шагом по всей длине керна (рис. 2, б).

Наилучшие результаты получаются при комплексировании обоих подходов.



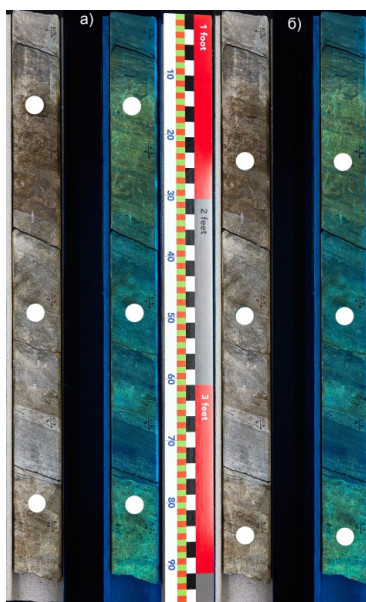


Рис. 2. Основные методические подходы отбора образцов из полноразмерного керна: *а* – равномерный отбор с фиксированным шагом; *б* – отбор, основанный на учете литотипов пород

При проведении работ по пробоподготовке керна в зависимости от планируемых видов лабораторных исследований (стандартные/специальные) изготавливаются следующие виды образцов:

- цилиндрический образец диаметром от 25 до 80 мм и длиной от 30 до 90 мм;
- образец полноразмерного керна диаметром до 100 мм;
- образцы неправильной геометрической формы (обломки) с пришлифованными гранями.

Количество и шаг отбора образцов керна регулируются техническим заданием.

Ниже представлена методика отбора образцов, используемая в Центре обработки, исследования и хранения керна БелНИПИнефть.

Образцы керна на стандартные исследования отбираются в среднем с шагом 0,25–0,33 м (3–4 образца на 1 метр).

В пластах-коллекторах, насыщенных нефтью, образцы отбираются с шагом 0,15–0,20 м (5–6 образцов на 1 метр).

В горных породах, не являющихся коллекторами (глина, аргиллит, ангидрит и др.), шаг отбора образцов увеличивается до 0,33–0,5 м (2–3 образца на 1 метр), иногда до 0,5–1,0 м (1–2 образца на 1 м).

Указанный выше шаг отбора образцов во всех случаях может уменьшаться и не быть постоянным. Это обуславливается тем, что в некоторых местах отсутствует возможность изготовления цилиндров, поэтому возможны смещения от планируемого места на расстояние до половины шага отбора.

Последовательность отбора и подготовки образцов керна следующая:

#### 1. Выбуривание цилиндров

Выбуривание цилиндров проводится на специальном станке перпендикулярно слоистости пород с помощью алмазной коронки диаметром 30 мм (стандартные образцы) или более (образцы для специальных исследований).

#### 2. Торцевание цилиндров

После выбуривания цилиндров выполняется их торцевание на отрезном станке. Процесс может выполняться с помощью одного либо двух алмазных дисков. Торцы цилиндров не должны иметь видимых сколов.

### 3. Отбор обломков

В интервалах хрупких пород, из которых не представляется возможным выбуривание цилиндров, отбираются небольшие по размеру (30–40 мм) обломки пород – образцы неправильной формы.

### 4. Пришлифовка обломков

С помощью шлифовального станка выполняется шлифовка острых граней обломков – образцов неправильной формы.

### 5. Оформление образцов

После торцевания цилиндров и шлифовки обломков на образцы черной несмываемой (водой и керосином) тушью наносится номер скважины и лабораторный номер образца. На цилиндры данная информация наносится на боковую и торцевую стороны.

### 6. Занесение информации в базу данных

После оформления образцов проводится занесение в базу данных информации о каждом образце: лабораторный номер образца, расстояние от верха отобранного керна, состояние образца (цилиндр, обломок), при необходимости комментарии.

### 7. Составление ведомостей и передача образцов в лаборатории

После занесения информации в базу данных составляется ведомость сдачи образцов в лаборатории в электронном виде и на бумажном носителе.

Используемые методические приемы и подходы отбора образцов в совокупности с результатами первичной обработки керна (привязка к ГИС, распиловка, фотографирование, макроскопическое описание) дают возможность на качественном уровне изучить особенности изменчивости свойств пород-коллекторов, а также наметить перспективные направления в области пробоподготовки и исследования керна.

### Литература

1. Отбор, прием, документирование, обработка, хранение, сокращение, ликвидация керна нефтяных и газовых скважин : СТП 09100.17015.230–2020.

УДК 622.02

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА В НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ В УСЛОВИЯХ РАСЧЛЕНЕННОГО ТЕРИГЕННОГО КОЛЛЕКТОРА

Р. Е. Гутман, А. В. Драбкин, В. Н. Шиленкова

РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»

БелНИПИнефть, г. Гомель

Комплексный подход к изучению резервуаров нефти и газа является основой для рациональной разработки месторождений углеводородов. Одним из важных направлений, которое помогает решить широкий комплекс задач, является геомеханика.

Целью данной работы является применение геомеханического моделирования для оптимизации процесса ГРП. Объектом исследований является ланско-старооскольский горизонт Речицкого месторождения. Пласт разделен на три блока: северный, восточный, западный. В данной работе рассматриваются результаты только по скважинам западного блока.

При проведении ГРП в западном блоке существует проблема возникновения давления STOP. Это видно из анализа успешности ГРП на скважинах в период с 2018–2020 гг. Было проанализировано 38 операций ГРП на скважинах западного блока ланско-старооскольского горизонта. Более трети из них были неудачными по причине получения давления STOP (рис. 1).

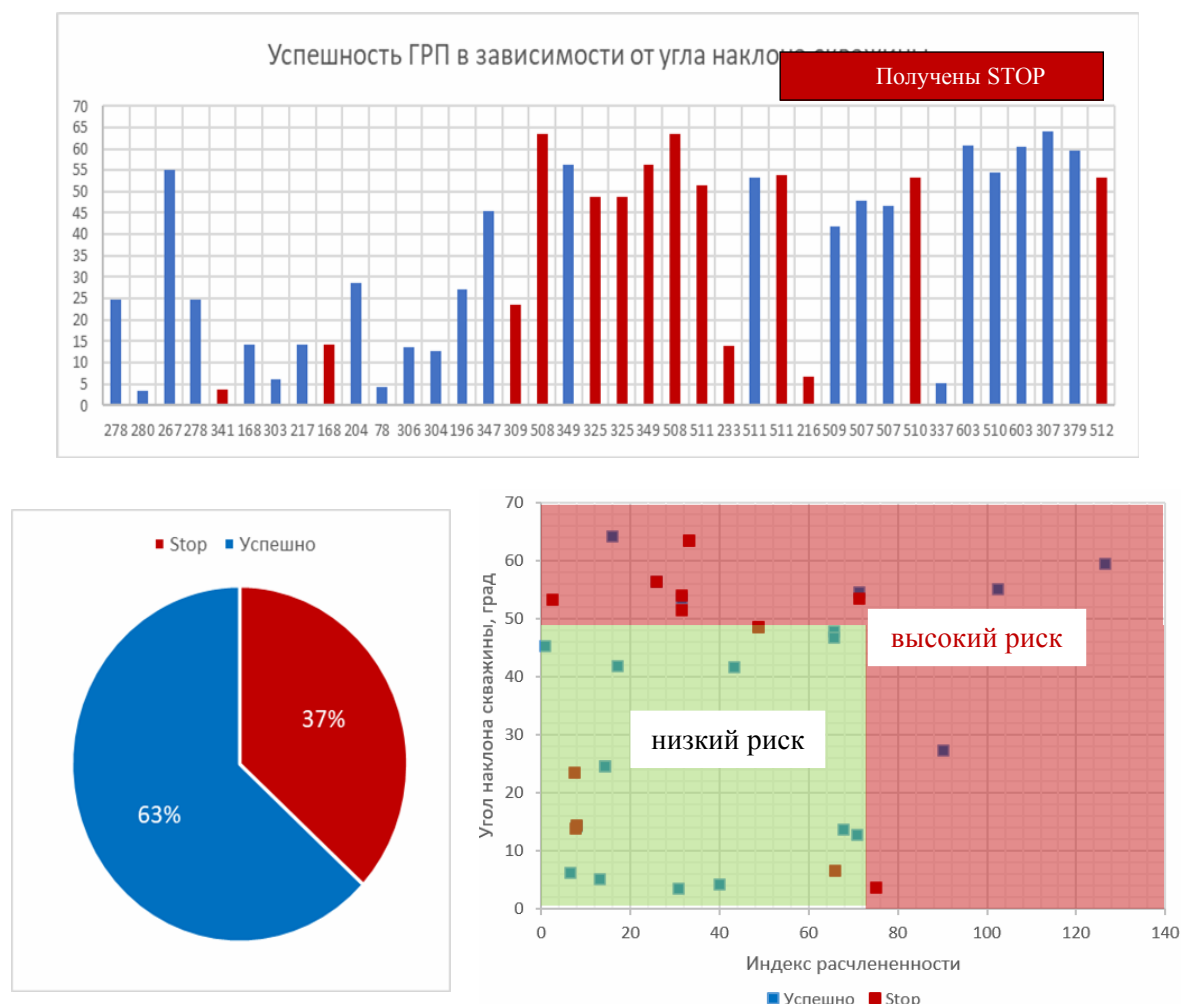


Рис. 1. Анализ результатов ГРП по скважинам западного блока ланско-старооскольского горизонта Речицкого месторождения

По результатам анализа ГРП установлено несколько закономерностей, присущих подавляющему большинству скважин, где было получено давление STOP:

- скважины расположены преимущественно в зоне с высокой расчлененностью коллектора глинистыми пропластками (рис. 2);
- большинство скважин имеют значительный зенитный угол наклона ствола в интервалах продуктивных отложений (45 и более градусов).

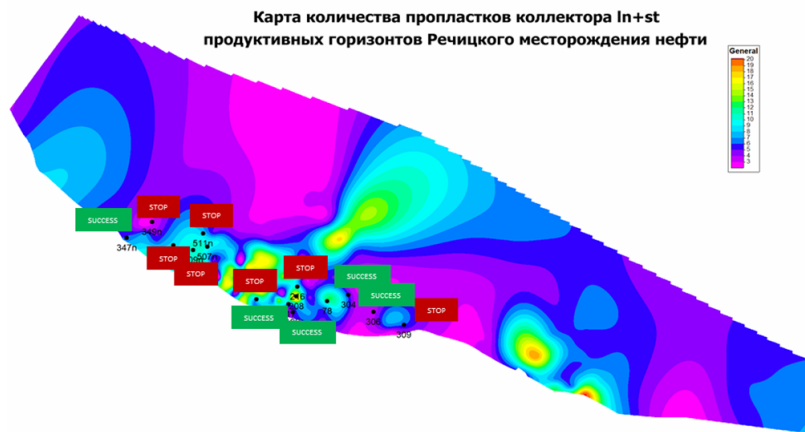


Рис. 2. Соотнесение результатов ГРП с картой расчлененности коллектора пропластками глин на основании интерпретации ГИС

Для уточнения модели механических свойств и напряжений был проведен комплексный расчет с применением геомеханического моделирования. В качестве моделируемых скважин были выбраны скважины 509 и 511, находящиеся в расчлененной зоне коллектора. Для построения механической модели свойств использовались результаты механических исследований керна в пластовых и поверхностных условиях, а также данные геофизических исследований кросс-дипольной широкополосной акустики и плотностного каротажа. По результатам построения геомеханической модели были рассчитаны профили упругих характеристик пластов, а также боковых напряжений. Рассчитанные модели упругих свойств и напряжений отличались от ранее принятых для построения дизайна ГРП, поэтому на примере скважины 509 Речицкого месторождения для оценки различий в параметрах трещины были построены и откалиброваны два дизайна ГРП: один – исходными данными по напряженно-деформированному состоянию пород и упругим свойствам, принятым на основании предыдущего опыта проведения ГРП на соседних скважинах, второй – на результатах построения геомеханической модели.

#### Сравнение параметров трещины ГРП на примере скважины 509

Параметр	Единица физической величины	Базовый	Геомеханика
Длина трещины	m	178	193,8
Закрепленная длина	m	149,7	143,4
Высота трещины	m	87,2	67,5
Закрепленная высота	m	73,3	49,9
Глубина верха трещины (TVD)	m	2656,5	2676.2
Глубина низа трещины (TVD)	m	2743,7	2745,7
Средняя раскрытость	sm	0,534	0,194
Средняя концентрация проппанта в трещине	kg/m <sup>2</sup>	2,23	2,40
Эквивалентное число трещин	–	1	1

Из таблицы можно заметить, что параметры закрепленной длины трещины практически не изменились, в то время как сама длина трещины выросла на 16 м. Значительно изменилась высота трещины с 87,2 до 67,5 м, а закрепленная высота снизилась почти вдвое с 73,3 до 49,9. Это свидетельствует о гораздо большей изменчивости напряжений и упруго-прочностных свойств по разрезу скважины, а также влиянию переслаиваний глины и песчаника. Однако самые большие изменения наблюдаются в раскрытости трещины. Этот параметр изменился почти в три раза по сравнению с базовым дизайном.

Затрудненный транспорт проппанта при проведении ГРП на данной скважине, как и на соседних скважинах, вызванный бриджеманием в трещине косвенно подтверждает факт низкой раскрытости трещины в интервале ГРП, которая в должной степени не прослеживалась в базовом дизайне ГРП. Также стоит учитывать тот факт, что большинство скважин на западном блоке Речицкого месторождения в интервалах ланско-старооскольских отложений бурятся наклонно-направленными. В классическом случае в условиях режима сброса или сдвига трещины разрыва формируются вертикальными в направлении максимального горизонтального стресса  $S_{Hmax}$ . В этом случае может возникнуть ситуация, при которой пятно контакта трещины со стволом наклонной скважины может оказаться очень маленьким. Незначительное пятно контакта, к тому же если раскрытость трещины маленькая, в свою очередь будет являться негативным фактором для транспортировки проппанта по вертикали.

Совершенно другая ситуация в условиях вертикальной скважины, где пятно контакта трещины со стволом скважины наблюдается практически по всему интервалу, что способствует большей площади контакта, более эффективному транспорту проппанта по всему разрезу трещины, особенно в условиях сильной расчлененности коллектора глинистыми интервалами.

Для уменьшения рисков, связанных с малой величиной контакта трещины со стволом скважины, а также влиянием повышенных напряжений (особенно в глинах) можно рекомендовать: снизить расход проппанта на закачку в трещину; уделять больше внимание подбору фракций проппанта по размеру в соответствии с уменьшенным раскрытием трещины; проводить изолированные стадии ГРП при большом интервале перфорации в высоконаклонных скважинах.

Рекомендуется бурить вертикальные скважины в сильно расчлененных зонах коллектора, чтобы свести к минимуму риск осложнений при ГРП, а также возможные риски обрушения при бурении нестабильных интервалов. Такой подход может быть оправдан, так как при качественном воздействии на пласт накопленный объем добычи значительно превысит объем скважины с наклоном, что подтверждается результатами гидродинамического моделирования.

#### Литература

1. Zoback M. D. Reservoir Geomechanics. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 505 p.
2. Economides M. J., Nolte K. G. Reservoir Stimulation / third edition / Willey & Sons. – 2011. – 192 p.
3. Fjær E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., Risnes R. Petroleum Related Rock Mechanics, second ed. Elsevier, Amsterdam. – 2008. – 515 p.

УДК 620.172.242

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ШЛАМА

**П. В. Асвинова, И. Н. Степанкин, В. М. Ткачѳв**

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

**Р. Е. Гутман, А. В. Халецкий, Р. В. Асвинов**

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

Исследовательская работа посвящена изучению физико-механических свойств горных пород, их напряженного состояния, процессов деформирования и разрушения, происходящих под влиянием природных и технологических факторов. Все перечисленные аспекты, изучаемые в специализированном разделе механики материалов – геомеханике, играют важную роль при бурении скважин, планировании стратегии гидравлического разрыва пласта (ГРП) и разработке месторождений природных ископаемых. Объектами геомеханики являются горные массивы со всеми элементами геологического строения и нарушенности в недрах Земли на различных масштабных уровнях и собственно горные породы, составляющие эти массивы. Горная порода рассматривается как геологическое образование твердой деформируемой среды минерального состава с присущей ей плотностью, трещиноватостью и прочностью.

В практике горного дела используются в основном эмпирические и полумэмпирические методы расчета. И в обоих случаях в качестве граничных условий используются данные о прочностных характеристиках горной породы. Она по своей морфологической сущности довольно часто представляет собой композиционный материал, состоящий из мелких частиц, скрепленных природным цементом. Классическим примером такого материала является песчаник.

Для получения достоверных данных при постановке задачи моделирования важно в оперативном порядке получать информацию о свойствах породы на определенном горизонте ее разработки. Одним из наиболее современных направлений диагностики свойств горных пород, позволяющих определять такие параметры, как прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона является индентирование. Первые эксперименты в этом направлении были апробированы Л. А. Шрейнером [1]. Главным недостатком указанного способа определения прочностных характеристик горных пород является неравномерное распределение давления под индентором – плоским штампом. В результате испытываемый слой материала находится в условиях неравномерного сжатия с высоким градиентом сжимающих напряжений в окрестности рабочей поверхности индентора. В настоящее время достаточно результативными являются методики на основе вдавливания индентора переменного сечения, применяемые для оценки свойств отдельных компонентов горных пород [2]. Применение индентора переменного сечения дает возможность для создания равномерного фронта распределения напряжений в испытываемом материале. Анализ напряженного состояния, проведенный с помощью компьютерного моделирования, показывает, что внедрение пирамидального индентора позволяет получить близкий к сферическому фронт распределения главных напряжений.

Для практической реализации описанного взаимодействия между индентором и испытываемым материалом использована новая методика, разработанная для микродюрометрического воздействия на образец горной породы с помощью пирамиды

Виккерса. Как видно из рис. 1, применение непрерывного вдавливания индентора обеспечивает вовлечение в процесс деструктуризации – разрушения определенного объема материала, который на некотором этапе испытаний начинает взаимодействовать с практически всей поверхностью пирамиды. Учитывая, что размеры отдельных составляющих композиционного материала – горная порода – достаточно малы, можно достичь такого уровня взаимодействия, при котором упругая и пластическая (разрушение связей) реакции испытуемого материала будут находиться в постоянном балансе между собой.

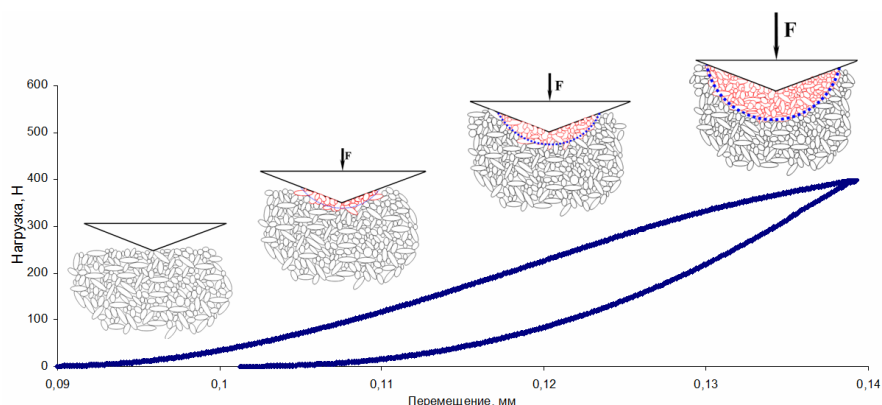


Рис. 1. Изменение морфологии материала горная порода при непрерывном вдавливании индентора переменного сечения

Одним из основных преимуществ разработанной методики является возможность испытаний весьма малых частиц материала, который в процессе бурения в виде шлама выносится из скважины с буровым раствором. Для практической реализации описанной методики в отношении небольших частиц шлама их размещали в цилиндрическом образце из эпоксидной смолы и после стандартной пробоподготовки подвергали индентированию (рис. 2).

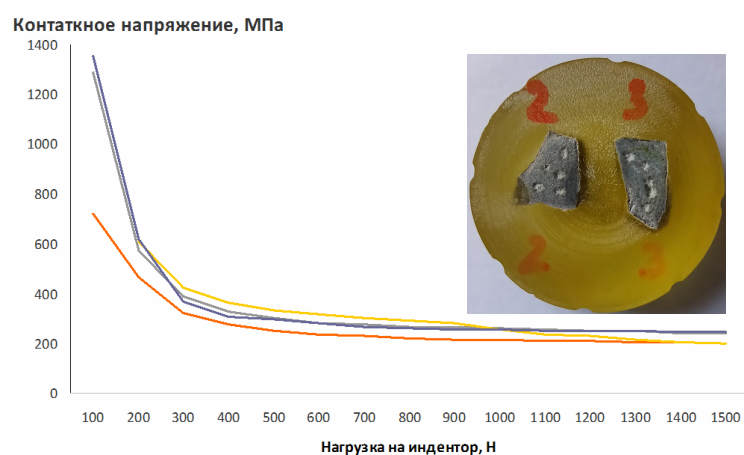


Рис. 2. Зависимости, отражающие изменение контактного напряжения между индентором и испытуемым материалом при увеличении нагрузки на индентор, внедряющийся во фрагменты шлама, полученного при бурении нефтяной скважины

По результатам экспериментов проводили анализ ветвей нагружения и разгрузки диаграммы индентирования для каждого отдельного цикла. Это позволило выделить ту компоненту приложенной к индентору нагрузки, которая была ответственна за пластическую деформацию породы под рабочей поверхностью индентора. По сути, в области, непосредственно примыкающей к рабочей поверхности индентора, формировалась сферическая зона, внутри которой цементные связи между отдельными частицами разрушались и на стадии упругого отторжения тонкая разрушенная область материала уже не воспроизводила упругую реакцию, регистрируемую телеметрической аппаратурой. Последовательное циклическое нагружение материала ступенчато возрастающей нагрузкой позволило получить серию диаграмм индентирования. По результатам их математической обработки строилась итоговая кривая, отражающая изменение контактного напряжения в области рабочей части индентора, контактировавшего с отдельными частицами шлама, закрепленными в образце эпоксидной смолой (рис. 2).

Как видно из рис. 2, при увеличении нагрузки на индентор возрастает площадь контактной поверхности между ним и испытуемым материалом за счет более глубокого внедрения рабочей части в испытуемый материал. Это приводит к снижению контактного напряжения, ответственного за локальное разрушение породы под индентором. При возрастании нагрузки до значений более 1000 Н полученные кривые имеют пологие участки, отражающие постоянную составляющую внешней нагрузки, ответственную за разрушение породы под индентором. Полученные значения находятся в диапазоне 198–244 МПа, что коррелирует с прочностными характеристиками испытуемого материала в условиях его трехосного сжатия.

#### Л и т е р а т у р а

1. Шрейнер, Л. А. Методы оценки твердости и абразивности горных пород / Л. А. Шрейнер. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 189 с.
2. Оценка прочностных и деформационных характеристик минеральных компонентов горных пород методом микро- и наноиндентирования / С. Д. Викторов [и др.]. // Нанотехнологии и наноматериалы. – 2014. – № 4. – С. 47–55.
3. Способ определения прочности материала: пат. 2721089С1 Рос. Федерация : МПК G01N 3/32 (2020.01) ; МПК G01N 3/40 (2020.01) / И. Н. Степанкин, А. В. Халецкий, В. М. Ткачев, Р. Е. Гутман. – Оpubл. 15.05.2020.

УДК 622.24:622.276(476)

### **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭМУЛЬСИОННЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ВСКРЫТИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД, СКЛОННЫХ К ОСЫПАНИЮ**

**И. В. Добродеева, Н. В. Шемлей, Д. С. Матвеевко**

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

В последние годы разработка нефтяных месторождений в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» ведется преимущественно путем бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин. При этом в условиях низких пластовых давлений эффективность бурения ствола скважины, первичного и вторичного вскрытия продуктивных пластов существенно зависят от параметров и компонентного состава буровых растворов.



С целью определения эффективности применения буровых растворов на скважинах РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» были выполнены лабораторные испытания по сравнению реологических, триботехнических характеристик и выносящих свойств эмульсионных растворов, а также сопоставление с применяемым стандартным раствором. В работе проанализированы: эмульсионный биополимерный раствор (содерж. УВ фазы 40 % об.) ; инвертная эмульсия (содерж. УВ фазы 70 % об.) – раствор на углеводородной основе, эмульсия II рода, модельная рецептура, пресный облепченный ОМС КРК (содерж. УВ фазы 27,8 % об.). Технологические параметры эмульсионных растворов приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Технологические параметры эмульсионных растворов

Тип раствора	Параметры раствора						
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Phi$ , см <sup>3</sup> / 30 мин	PV, мПа · с	ДНС, дПа	$K^*$ <sub>дин. структ</sub>	Электро- стабиль- ность, В	От- стой, %
Эмульсионный биополимерный раствор	970–980	0–0,5	12	81	6,75		
РУО (модельная рецептура)	955	2,0–2,2	24	120	5	911, 901, 891	1
Пресный облепченный сапропелевый раствор с КРК	1040	0,2–0,5	27	105	3,8		

*Примечание.*  $K^*$ <sub>дин.структ</sub> (ДНС/PV) – коэффициент динамического структурообразования, чем выше значение  $K^*$ <sub>дин.структ</sub>, тем выше выносящие способности раствора. Следует учитывать, что повышение значения  $K^*$ <sub>дин.структ</sub> рекомендуется получать за счет снижения пластической вязкости.

Как видно из табл. 1, реологические параметры биополимерного эмульсионного раствора имеют наиболее оптимальные значения – при невысоком значении ДНС и пластической вязкости коэффициент динамического структурообразования самый высокий. В РУО значение  $K^*$ <sub>дин.структ</sub> ниже, чем в биополимерном эмульсионном при более высоком значении ДНС и пластической вязкости. Значение электростабильности РУО – 901 В, соответствует требуемым значениям. Пресный облепченный сапропелевый с КРК имеет неудовлетворительные параметры реологии: при низком значении  $K^*$ <sub>дин.структ</sub> – самое высокое значение пластической вязкости. При высоком значении PV увеличиваются гидравлические сопротивления, ухудшается очистка забоя и самого раствора от шлама.

Изменение реологических характеристик эмульсионных растворов в зависимости от температуры представлены на рис. 1–3.

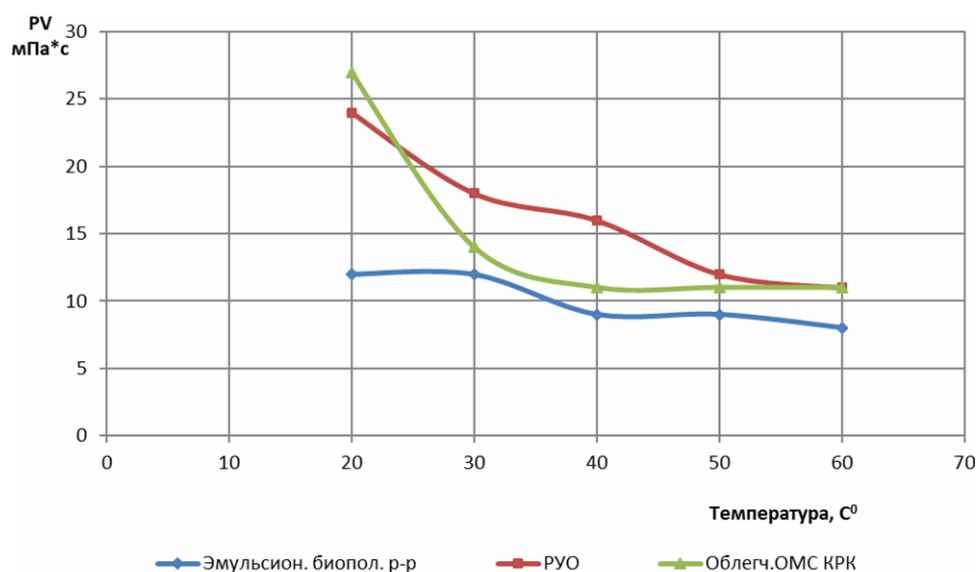


Рис. 1. Зависимость пластической вязкости эмульсионных растворов от температуры

На рис. 1 видна сильная зависимость пластической вязкости от температуры в облегченном ОМС КРК и РУО. В облегченном ОМС КРК при увеличении температуры до 30 °С наблюдается резкое снижение PV, при 60 °С PV снижается в 2,5 раза в сравнении с исходным значением. В РУО снижение PV более плавное, при 60 °С значение PV снижается в 2 раза. В эмульсионном биополимерном растворе PV не проявляет сильную зависимость, график снижения PV более пологий, при 60 °С значение PV в растворе снижается в 1,5 раза.

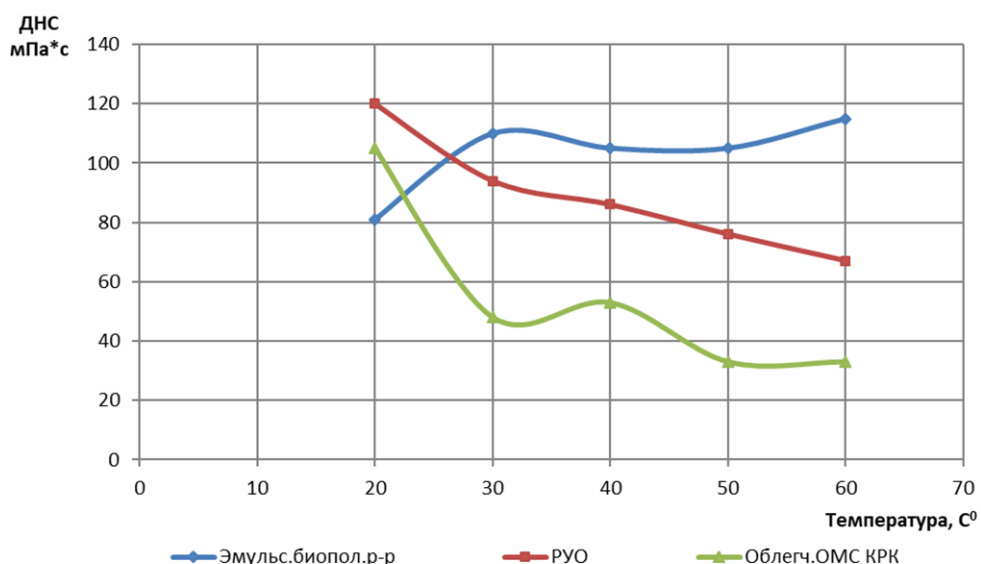


Рис. 2. Зависимость динамического напряжения сдвига эмульсионных растворов от температуры

На рис. 2 ДНС от температуры подтверждает большую зависимость от температуры у облегченного ОМС КРК и РУО. При увеличении температуры значения ДНС этих растворов снижаются. В облегченном ОМС КРК при 60 °С наблюдается снижение в 3 раза, в РУО – снижение 1,8 раза. Для эмульсионного биополимерного раствора динамика изменения ДНС с ростом температуры носит противоположный характер, при увеличении температуры ДНС возрастает в 1,4 раза.

Анализируя графики  $K_{\text{дин.структ}}$  на рис. 3, видно, что с ростом  $K_{\text{дин.структ}}$  в растворе увеличивается транспортирующая способность потока, а также гидродинамическое давление струй бурового раствора, выходящих из насадок долота, что обеспечивает увеличение механической скорости проходки. С ростом температуры наблюдается увеличение  $K_{\text{дин.структ}}$  в эмульсионном биополимерном растворе в 2 раза, в РУО – в 1,2 раза. В облегченном ОМС КРК при 40 °С  $K_{\text{дин.структ}}$  незначительно возрастает, при повышении температуры более 40 °С происходит снижение  $K_{\text{дин.структ}}$  ниже исходных значений раствора.

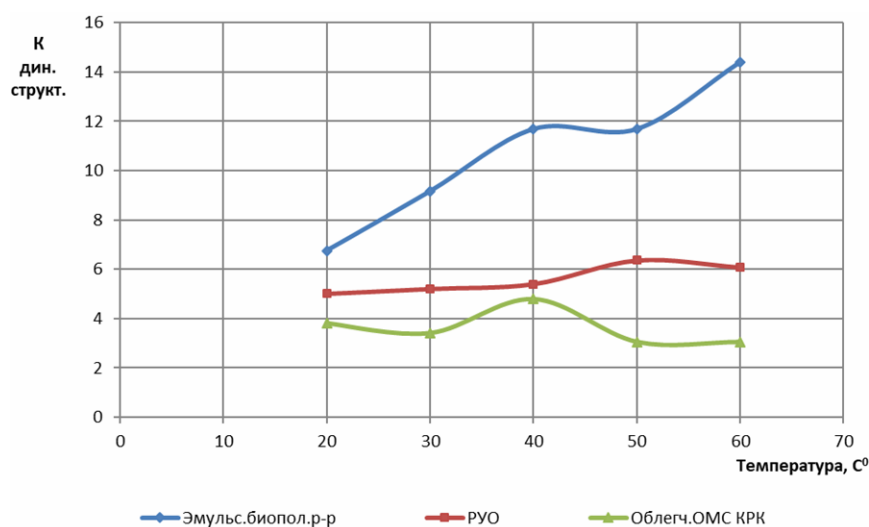


Рис. 3. Зависимость коэффициента динамического структурообразования эмульсионных растворов от температуры

Параметры, характеризующие триботехнические свойства ( $K_{\text{тр.корки}}$ ,  $K_{\text{тр}}$ ,  $K_{\text{прихват}}$ ), приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Триботехнические параметры эмульсионных растворов

Тип раствора	Параметры раствора		
	$K_{\text{тр.корки}}$	$K_{\text{тр}}$	$K_{\text{прихват}}$
Эмульсионный биополимерный раствор	0,19	0,145	0
РУО	0,034	0,09	0
Пресный облегченный сапропелевый раствор с КРК	0,158	0,2	0

Из табл. 2 видно, что по триботехническим характеристикам растворов самые низкие значения  $K_{\text{тр.корки}}$  и  $K_{\text{тр}}$  имеет РУО. Раствор пресный облегченный ОМС КРК имеет самое высокие значения  $K_{\text{тр}}$ , проходящее по верхней границе требований дей-

ствующих ТНПА. Коэффициент прихватоопасности у всех эмульсионных растворов равен нулю.

Определение коэффициента выноса шлама эмульсионных растворов проводилось путем моделирования с помощью ПО Sysdrill. Данные по  $K_{\text{вын.шлама}}$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

### Результаты расчета коэффициента выноса шлама в ПО Sysdrill

Тип раствора	Производительность насоса, л/с	Коэффициент выноса шлама
Эмульсионный биополимерный раствор	28	0,89
	30	0,90
	35	0,91
	40	0,91
РУО	28	0,88
	30	0,89
	35	0,9
	40	0,91
Пресный облегченный сапропелевый раствор с КРК	28	0,87
	30	Превышение критической скорости
	35	Превышение критической скорости
	40	Превышение критической скорости

Анализируя данные табл. 3, следует отметить, что производительность насосов является одним из факторов, влияющих на повышение механической скорости бурения, а эффективное удаление породы с забоя положительно влияет на среду работы долота и влечет за собой снижение сальникообразования и, как следствие, также повышает механическую скорость. При бурении в одинаковых условиях на эмульсионных растворах – эмульсионный биополимерный раствор и РУО позволяют увеличить производительность насосов до максимального значения и  $K_{\text{вын.шлама}}$  у данных растворов более высокий. Пресный облегченный сапропелевый раствор с КРК позволяет бурить с производительностью не более 28 л/с, при этом значение  $K_{\text{вын.шлама}}$  в данном растворе ниже.

УДК 622.24

### ОПЫТ СПУСКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОБСАДНЫХ КОЛОНН С ЧАСТИЧНЫМ ОПОРОЖНЕНИЕМ В РУП «ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «БЕЛОРУСНЕФТЬ»

Д. С. Матвеевко, Д. В. Порошин, В. В. Пологеевко  
 РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»  
 БелНИПИнефть, г. Гомель

Согласно существующей практике в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» в процессе проектирования строительства скважины грузоподъемность буровой установки выбирается исходя из номинального веса спускаемой обсадной колонны в воздухе.

Восстановление скважин методом бурения боковых стволов осуществляется с применением мобильных буровых установок с грузоподъемностью до 140 т, что соответствует глубине спуска обсадной колонны до 4000 м. С целью снижения затрат была выполнена инженерная оценка возможности применения мобильной буровой установки при восстановлении скважины методом бурения бокового ствола на объектах с глубиной спуска обсадной колонны 140 x 146 мм свыше 4000 м.

В качестве обязательного условия было принято, что грузоподъемность буровой установки должна быть на 11 % выше, чем максимальный вес при подъеме обсадной колонны в жидкости. Тогда задача применения мобильных буровых установок могла быть решена за счет снижения веса обсадной колонны при спуске путем ее неполного заполнения буровым раствором.

**Частичное опорожнение обсадной колонны.** Непосредственно сама процедура спуска с опорожнением является простой. Обсадная колонна спускается в скважину с заполнением на устье буровым раствором до заданной глубины с проведением необходимых промежуточных промывок. Дальнейший спуск осуществляется без долива, а промывка выполняется только при достижении забоя. Вес жидкости в нижней части обсадной колонны способствует спуску, а плавучий корпус в верхней части снижает сопротивление спуску из-за снижения веса и более низких боковых сил.

Спуск обсадной колонны глубиной более 4000 м является сложной задачей и требует детальных расчетов. Для моделирования спуска обсадной колонны в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» могут использоваться два программных комплекса Sysdrill компании Paradigm и CEMPRO+ компании Pegasus Vertex Inc.

На примере скважины 9s2 С-Новинская (рис. 1) был выполнен расчет спуска обсадной колонны 140 x 146 мм до забоя 4360 м с применением мобильной буровой установки с грузоподъемностью 140 т по стандартной технологии.

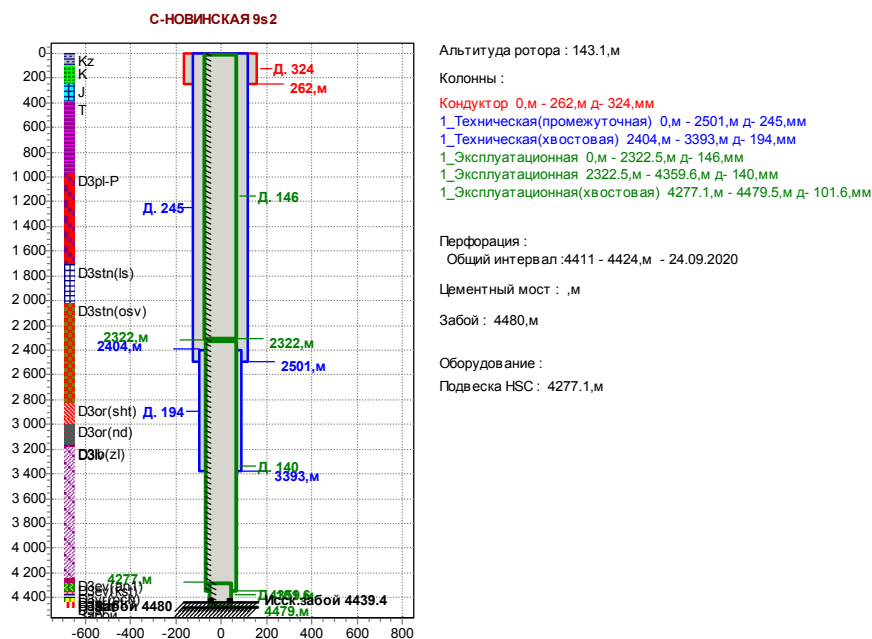


Рис. 1. Конструкция скважины 9s2 С-Новинская

По опыту РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» коэффициенты трения при спуске обсадных труб в скважину составляют 0,2–0,4.

Расчет показал, что 90 % от грузоподъемности мобильной буровой установки достигается на глубине 3750 м при подъеме с коэффициентом трения 0,4 и дальнейший спуск становится невозможен (рис. 2).

Далее требовалось выполнить расчет спуска обсадной колонны до забоя 4360 м с частичным опорожнением. В процессе спуска величина опорожнения постоянно изменяется. Расчет спуска обсадной колонны с переменной величиной опорожнения является нестандартной задачей для имеющегося программного обеспечения.

Несмотря на это, изменение опорожнения удалось смоделировать в программном комплексе Sysdrill путем многократных (с шагом 200 м) расчетов весов при спуске с соответствующими значениями опорожнения, после чего расчетные данные были сведены в итоговую карту весов спуска обсадной колонны (рис. 3). Из-за опорожнения нагрузка на крюке после глубины 3300 м начинает падать и при коэффициенте трения более 0,4 наблюдается потеря устойчивости обсадных труб (спиральный и синусоидальный изгиб).

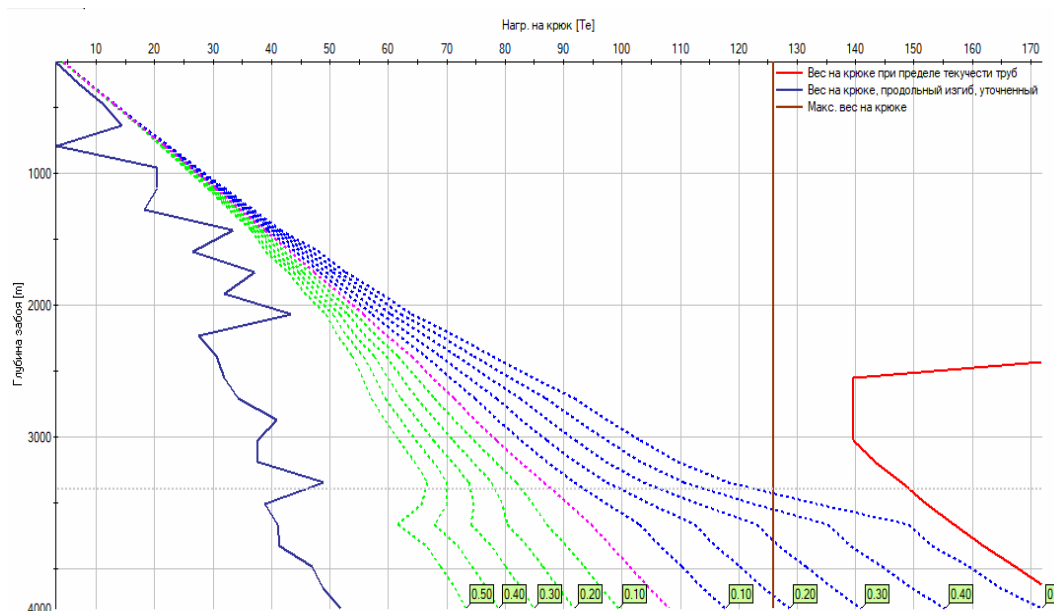


Рис. 2. Карта спуска обсадной колонны по стандартной технологии

Для предотвращения потери устойчивости обсадных труб необходимо обеспечить коэффициент трения менее 0,4, для чего может потребоваться снижение извилистости ствола скважины, ввода смазочных добавок, сокращения количества центрирующих элементов обсадной колонны.

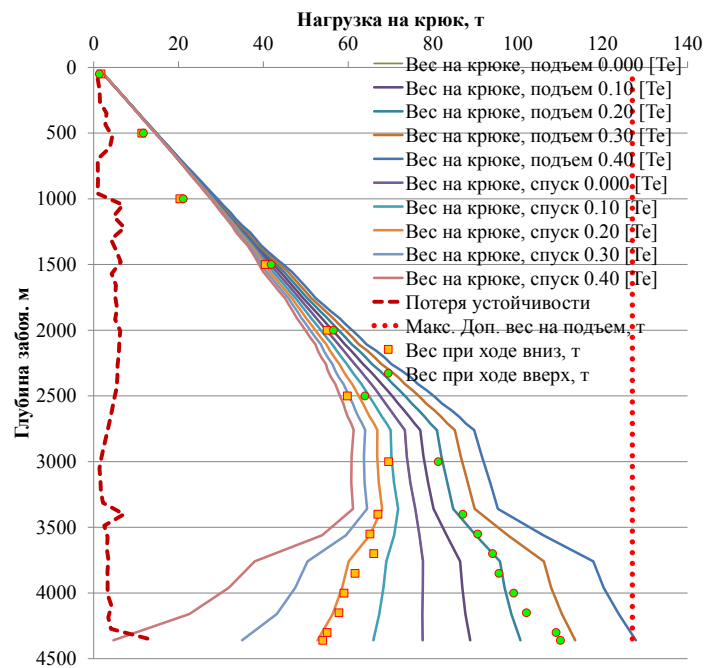


Рис. 3. Карта спуска обсадной колонны с опорожнением в ПО Sysdrill с учетом изменяющейся величины опорожнения

Также изменение опорожнения удалось смоделировать и в программном комплексе SEMPRO+ путем уменьшения в исходных данных в интервале опорожнения веса обсадных труб на величину веса бурового раствора (рис. 4).

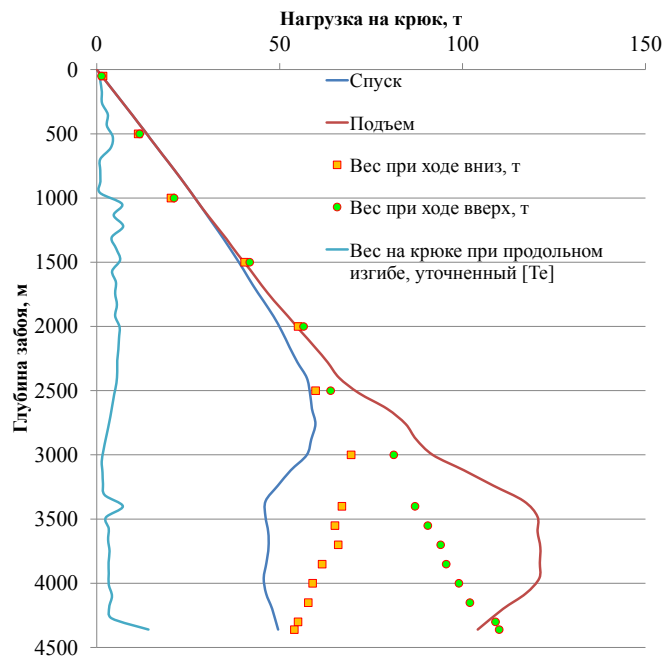


Рис. 4. Карта спуска обсадной колонны с опорожнением в ПО SEMPRO+ с учетом изменяющейся величины опорожнения

Результаты расчетов в разных программных комплексах отличаются, так как СЕМПРО+ позволяет учесть дополнительный эффект от пружинных центраторов обсадной колонны, создающих сопротивление при вводе и протягивании центратора в стволе скважины.

**Промысловые испытания.** Для проведения работ на опытной скважине 9s2 С-Новинская был разработан тщательный план и выполнен комплекс мероприятий. Для качественного выполнения поставленной задачи особое внимание уделялось подготовке ствола скважины перед спуском обсадной колонны. Выполнена шаблонировка ствола скважины для снижения извилистости компоновкой с повышенной жесткостью: Д-165,1; КЛС-165,1; УБТ-121-9 м; КЛС-165,1; УБТС-121-36 м; б. тр.

Во время подъема компоновки для шаблонировки осуществлялся замер веса инструмента при движении вниз и вверх без циркуляции в интервале открытого ствола и обсадной колонны. В интервалах аномального отклонения фактического веса от расчетного веса движения бурильной колонны осуществлялась проработка до достижения расчетных показаний веса.

Были установлены фактические коэффициенты трения в скважине при движении бурильной колонны (рис. 5), по которым был выполнен перерасчет спуска и уточнена величина опорожнения, которая составила 1600 м.

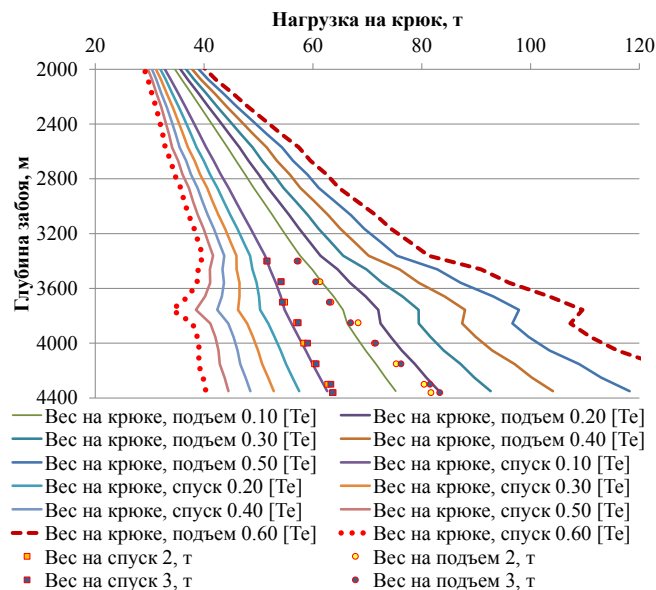


Рис. 5. Карта весов при шаблонировке скважины 9s2 С-Новинская

В процессе спуска обсадной колонны выполнялся контроль веса на крюке путем сравнения с расчетными данными. Спуск обсадной колонны на глубину 4360 м в скважине 9s2 С-Новинская с применением мобильной буровой установки выполнен успешно.

Фактический вес при спуске обсадной колонны подтвердил расчеты в программном комплексе Sysdrill, а расчеты в программном комплексе СЕМПРО+ оказались некорректными.

Данная технология была также успешно применена на скважинах 1s2 3-Москвичевская (опорожнение 600 м) и 93s2 Озерщинская (опорожнение 1600 м), что позволило сократить эксплуатационные затраты и сроки восстановления скважины.



Таким образом, была решена инженерная задача по спуску обсадной колонны 140 x 146 мм до забоя 4360 м с применением мобильной буровой установки с грузоподъемностью 140 т за счет частичного опорожнения.

Установлена удовлетворительная сходимостъ расчетных величин с фактическими значениями.

УДК 665.613

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМА ТЕМПЕРАТУРЫ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ В РЕЗЕРВУАРАХ В УСЛОВИЯХ ТУРКМЕНИСТАНА

А. Байрамов

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Величина потерь нефтепродуктов, вызванных испарением их из резервуара, во многом зависит от температурного режима резервуара, т. е. от диапазона (амплитуды) температуры паров воздуха и температуры нефтепродукта. При равенстве ряда условий температурный режим водоема формируется в результате метеорологических величин, т. е. под влиянием солнечной радиации и температуры окружающего воздуха.

Рассмотрим некоторые особенности разработанной математической модели. Количество тепла, воздействующего на нефтедобывающие резервуары, зависит от количества солнечного излучения, которое они получают в течение дня, и температуры воздуха. Напротив, потери нефтепродуктов происходят в жаркое время года. В это время парциальное (личное) давление жидкости является высоким из-за высокой температуры нефтепродукта в резервуарах и паровоздушного газа в верхнем слое жидкости. Поэтому в жаркие месяцы потери в водохранилище крайне высоки.

Солнечную радиацию и изменение температуры воздуха в течение дня можно математически описать как двухчленную (членную) гармоническую функцию:

$$I = I_1 + I_2 e^{j\omega\tau}; \quad (1)$$

$$t_0 = t_{01} + t_{02} e^{i\left(\omega\tau - \frac{\pi}{4}\right)}. \quad (2)$$

Огромная масса резервуара с нефтепродуктами влияет на увеличение его тепловой инерции. Следовательно, температура нефтепродуктов тоже периодически меняется днем и ночью по гармоническому закону, но немного запаздывает по своей фазе, т. е. максимальная и минимальная температура нефтепродукта не совпадает с температурой наружного воздуха.

С учетом вышеизложенного рассчитывается тепловой баланс резервуара с нефтепродуктами:

$$CM \frac{dt}{d\tau} = Q_{kr} + Q_q + Q_{yx}, \quad (3)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость нефтепродукта;  $M, t$  – масса и температура продукта,  $\tau$  – время;  $Q_{kr}$  – тепло резервуара, идущее от кровли;  $Q_q$  – тепло резервуара, идущее от боковых частей;  $Q_{yx}$  – потеря тепла в результате испарения нефтепродуктов.

Формула (3) используется для обозначения тепла, равномерно распределяющегося в резервуаре

$$Q_{kr} = \frac{\lambda \varepsilon kl}{\delta} S_{kr} (t_{kr} - t) + kr S_{kr} (t_{kr} - t). \quad (4)$$

Температуру кровли резервуара можно определить из теплового баланса кровли:

$$AIS_{kr} - (a_{1+k} + a_{1+q}) S_{kr} (t_{kr} - t_0) - S_{kr} (a_{b+1} - a_{b2}) (t_{kr} - t_0) = 0. \quad (5)$$

Количество тепла, поступающего с боковых сторон резервуара, можно определить по следующей формуле:

$$Q_q = a_q S_q (t_q - t). \quad (6)$$

Температуру боковой поверхности резервуара можно определить из следующего теплового баланса  $t_q$ :

$$\sum AI = {}_{kr}S_r + AI_{qq}S_{qp} = (\alpha_{1+k} + \alpha_{1+p}) (t_q - t_0) S_q + \alpha_h (t_q - t_0) S_q. \quad (7)$$

Потеря количества тепла, выделяемого при испарении, связано с повышением температуры газового пара в газоздушном пространстве резервуара. Повышение температуры, в свою очередь, увеличивает давление в газоздушном пространстве, что приводит к открытию «дыхательного» клапана и потере части паров продукта.

Согласно результатам расчетов и экспериментов (2), теплота, необходимая для испарения нефтепродуктов, очень мала по сравнению с общим теплом, поэтому это тепло не может быть учтено при оценке температуры нефтепродукта (для испарения 1 кг бензина требуется 65,4 кДж, а для испарения 1 кг воды –  $539 \cdot 4,2$  кДж), т. е. удельная теплота испарения бензина меньше, чем у воды (в 100 °С) (5) и (7). Используя формулы, получаем дифференциальное уравнение, вычитая  $t_{kr}$  и  $t_q$  из формул (4) и (6), а также подставляя значения  $Q_{kr}$  и  $Q_q$ , затем получаем окончательное уравнение, подставляя в него значения  $I$  и  $t_0$  из формул (1) и (2):

$$\frac{dt}{d\tau} = M_1 e^{j\omega\tau} + M_2 t + M_3. \quad (8)$$

В уравнении (8) постоянные величины  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  равны:

$$M_1 = \frac{1}{CM} K_1 \left( \frac{\lambda \varepsilon k\omega}{\delta} S_{kr} + \alpha S_{kr} \right) I_2 + \left[ K_2 \left( \frac{\lambda \varepsilon k\omega}{\delta} S_{kr} + \alpha S_{kr} \right) + \alpha_q S_q \cdot K_q \right] t_{2B} I_4 + 4\alpha_q \cdot SK;$$

$$M_2 = \frac{1}{CM} \left[ K_3 \left( \frac{\lambda \varepsilon k\omega}{\delta} S_{kr} + \alpha S_{kr} \right) \right] + \alpha_q S_q \cdot K_7 - \alpha_q S_q;$$

$$M_3 = \frac{1}{CM} \left\{ \alpha_q S_q K_4 + K_1 \left( \frac{\lambda \varepsilon k\omega}{\delta} S_{kr} + \alpha S_{kr} \right) I_1 + \left[ K_2 \left( \frac{\lambda \varepsilon k\omega}{\delta} S_{kr} + \alpha S_{kr} \right) + \alpha_q S_q \cdot K \right] t_{01}; \right.$$

$$K_2 = \frac{D_1}{D_1 + D_2}; \quad K_5 = \frac{D_2}{D_1 + D_2};$$

$$K_3 = \frac{B_1}{D_3 + D_4}; \quad K_1 = \frac{AS_{kr}}{D_1 + D_2}; \quad K_4 = \frac{B_0}{D_3 + D_4};$$

$$K_6 = \frac{D_2}{D_3 + D_4}; \quad K_7 = \frac{D_3}{D_3 + D_4};$$

$$D_1 = (\alpha_{1-\alpha} + \alpha_{1-\alpha})S_{kr}; \quad D_2 = (\alpha + \alpha_x)S_{kr};$$

$$D_3 = (\alpha_{1-\alpha} + \alpha_{1-\alpha})S_q;$$

$$D_4 = \alpha_q S_q;$$

$$B_0 = I_q \cdot S_q A + I_q S_q A + I_q S_q A + IC_1 S_q \cdot A;$$

$$B_1 = \frac{S_{yq}}{4} BA;$$

$$B_1 = I_{q2} e^{-i\varphi q} + I_{qb} e^{\varphi q h} + I_{dq2} e^{-i\varphi q}.$$

В этом уравнении  $I_{q2}$ ,  $I_{qb}$ ,  $I_{dq}$  и  $I_{q0}$  – интенсивности солнечного излучения, падающего на разные стороны водоема. Дифференциальное уравнение (8) можно решить только при начальных условиях  $\tau = 0$  и  $t = t_1$ . Такой расчет более точен при условии хранения нефтепродуктов в резервуаре длительное время.

В результате уравнение для температуры нефтепродуктов можно записать следующим образом:

$$t = \left[ \frac{M_1}{(i\omega - M_2)} e^{(i\omega - M_2)\tau} - \frac{M_3}{M_2} e^{-M\tau} + t_{bx} \frac{M_1}{(i\omega - M_2)} + \frac{M_3}{M_2} \right] e^{M_2\tau}. \quad (9)$$

При длительном хранении нефтепродуктов в резервуарах их температура приобретает свойство периодически изменяться.

Рассмотрим ниже решение этого уравнения (9):

$$t = B_1 + B_2 e^{j\omega}. \quad (10)$$

Подставляя значение  $t$  в уравнения (8), (10) и находя сумму его коэффициентов и свободных членов справа и слева от полученного уравнения по нулю (0), находим величины  $B_1$  и  $B_2$ :

$$B_1 = \frac{M_3}{M_2}; \quad B_2 = \frac{M_1}{i\omega \left( i - \frac{M_2}{i\omega} \right)}.$$

Таким образом, уравнения (9) и (10) позволяют построить график, в котором температура нефтепродуктов изменяется с течением времени для соответствующих условий.

#### Литература

1. Нормы естественной убыли нефтепродуктов при приеме, транспортировании, хранении и отпуске на объектах магистральных нефтепродуктопроводов : РД 153-39.4-033-98. – Режим досупа: <http://www.nge.ru/info/norm.htm>.
2. Буслаева, И. И. Оценка несущей способности резервуаров при неравномерных осадках основания в условиях Севера : дис. ... канд. техн. наук / И. И. Буслаева. – Якутск, 2004. – 135 с.

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

УДК 531.8

### АНАЛИЗ ТЕОРИИ РАСЧЕТА МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА

А. В. Локтионов, А. А. Сидорович

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

Анализом работ по составлению дифференциальных уравнений гармонических колебаний эллиптического маятника, состоящего из ползуна, шарика и стержня, установлено, что не произведены исследования по расчету малых колебаний маятника с заданной начальной угловой скоростью его движения. При этом преимущественно используется координатный способ задания движения ползуна и шарика [1]. Методология проведения работы заключается в сравнительной оценке аналитических методов расчета уравнения движения малых колебаний маятника.

В работе [2] получены уравнения свободных колебаний маятника и закон движения ползуна в зависимости от времени и заданной начальной угловой скорости движения маятника. При кинестатическом методе расчета уравнения движения малых колебаний маятника в работе [3] принцип Даламбера используется применительно только к маятнику. Для расчета динамической реакции направляющих ползуна использована теорема о движении центра масс системы. В работе [4] предложен квазистатический метод расчета уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника, который не требует расчета динамической реакции ползуна с использованием дифференциального уравнения движения центра масс системы относительно вертикальной оси. Для упрощения расчета реакции составлено условие равновесия в виде суммы проекций приложенных к ползуну сил на ось, перпендикулярную стержню маятника. Получены уравнение свободных колебаний маятника и закон движения ползуна в зависимости от времени и заданной начальной угловой скорости вращения маятника. Предложено использовать принцип Даламбера–Лагранжа при подсчете уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника и закона движения ползуна в зависимости от времени и заданной начальной угловой скорости вращения маятника.

В качестве прогнозных предположений следует получить дифференциальное уравнение гармонических колебаний эллиптического маятника с использованием аналитического метода расчета относительного движения шарика для рассматриваемой механической системы.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики : учеб. для вузов / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – СПб. : Лань, 2006. – 736 с.
2. Локтионов, А. В. Расчет уравнения малых колебаний с учетом сил тяжести и заданной начальной угловой скорости движения маятника / А. В. Локтионов // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 1. – С. 65–70.
3. Локтионов, А. В. Кинестатический метод расчета уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника / А. В. Локтионов // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. – Минск. – 2015. – № 30. – С. 226–229.

4. Локтионов, А. В. Квазистатический метод расчета уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника / А. В. Локтионов // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 47–51.

УДК 531.8

## РАСЧЕТ СКОРОСТИ ЦЕНТРА СХВАТА РОБОТА В СФЕРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

А. В. Локтионов, И. А. Векша, А. А. Сидорович

Учреждение образования «Витебский государственный  
технологический университет», Республика Беларусь

По рис. 1 механизм робота-манипулятора имеет три степени свободы. За обобщенные координаты принимаем угол поворота  $\varphi$  вертикальной колонны  $I$ , угол поворота  $\theta$  руки со схватом и перемещение  $r$  руки со схватом. Для расчета кинетической энергии механизма определим скорость центра схвата робота двумя способами: координатным способом задания движения центра схвата и матричным методом.

При координатном способе задания движения декартовы координаты центра схвата будут определяться уравнениями:

$$x = -r \cos\theta \sin\varphi; \quad y = r \cos\theta \cos\varphi; \quad z = r \sin\theta.$$

Тогда проекции скорости центра схвата на оси  $x, y, z$  (рис. 1):

$$V_x = \dot{x} = -\dot{r} \cos\theta \sin\varphi + r\dot{\theta} \sin\theta \sin\varphi - r\dot{\varphi} \cos\theta \cos\varphi;$$

$$V_y = \dot{y} = \dot{r} \cos\theta \cos\varphi - r\dot{\theta} \sin\theta \cos\varphi - r\dot{\varphi} \cos\theta \sin\varphi;$$

$$V_z = \dot{z} = \dot{r} \sin\theta + r\dot{\theta} \cos\theta.$$

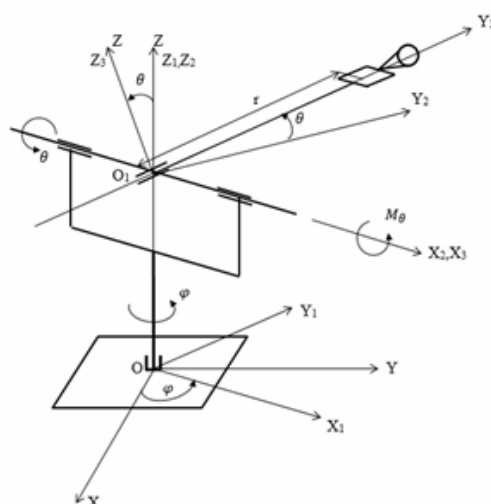


Рис. 1. Расчетная схема робота в сферической системе координат

Следовательно,

$$V_4^2 = \dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2 + r^2\dot{\phi}^2\cos^2\theta.$$

Определим скорость центра схвата матричным методом.

Координаты центра схвата 4 в неподвижной системе  $x, y, z$  выражаются через координаты центра схвата в системе  $x_3, y_3, z_3$  следующим образом (рис. 1):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A_\phi \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{pmatrix} + A_\phi A_\theta \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{pmatrix} + A_\phi A_\theta \begin{pmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{pmatrix},$$

где  $00_1 = a = \text{const}$ .

Дифференцированием текущих координат определим вектор скорости  $\bar{V}_4$  в системе  $xuz$ :

$$\bar{V}_4 = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \dot{A}_\phi \dot{\phi} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{pmatrix} + \dot{A}_\phi \dot{\phi} A_\theta \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{pmatrix} + \dot{A}_\phi \dot{\phi} A_\theta \begin{pmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{pmatrix} + A_\phi \dot{A}_\theta \dot{\theta} \begin{pmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{pmatrix} + A_\phi A_\theta \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{r} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Проекции скорости  $\bar{V}_4$  центра схвата на оси  $x, y, z$  определим из выражений:

$$\dot{x} = -r\dot{\phi}\cos\phi\cos\theta + r\dot{\theta}\sin\phi\sin\theta - \dot{r}\sin\phi\cos\theta;$$

$$\dot{y} = -r\dot{\phi}\sin\phi\cos\theta - r\dot{\theta}\cos\phi\sin\theta + \dot{r}\cos\phi\cos\theta; \quad \dot{z} = r\dot{\theta}\cos\theta + \dot{r}\sin\theta.$$

Тогда

$$V_4^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 = \dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2 + r^2\dot{\phi}^2\cos^2\theta.$$

Кинетическую энергию груза центра схвата вычислим по формуле

$$T_4 = \frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2 + r^2\dot{\phi}^2\cos^2\theta).$$

УДК 537.2:620.3

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОТОБРАЖЕНИЙ В СФЕРЕ

Д. В. Комнатный

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

Метод электрических отображений в сфере восходит к классическим работам И. Ньютона и У. Томпсона (лорда Кельвина). Тем не менее в научных журналах до последних лет появляются публикации, в которых рассматривается решение той или иной задачи методом электрических отображений в сфере. Результаты расчетов, как правило, выражаются в виде рядов по полиномам Лежандра по образцу известного

курса Н. С. Кошлякова, Э. Б. Глинера и М. М. Смирнова. Рассмотрение имеющихся публикаций и собственный опыт работы показывают, что возможны различные подходы к расчету электростатического поля элементарных источников в присутствии проводящей сферы. Поэтому целью доклада является систематизация и сравнительный анализ этих подходов, выявление их особенностей и путей наилучшего применения.

В статье рассматривается в качестве примера задача о расчете электростатической индукции на изолированной проводящей сфере, возбуждаемой элементарным источником поля в виде отрезка прямой равномерно заряженной нити. Предполагается, что при изображении в сфере нить-изображение целиком помещается внутри сферы.

Метод решения задачи заключается в выполнении изображения нити в сфере по известному правилу. Далее расчет характеристик электростатического поля может осуществляться по принципу суперпозиции полей исходной нити, нити-изображения и точечного заряда в центре сферы. Для характеристик поля указанных источников известны замкнутые выражения. Такой способ аналогичен методу эквивалентных зарядов. Его достоинство в том, что он не использует специальных функций, не требует математических преобразований. В нем применяются только известные замкнутые формулы. Значительный недостаток его состоит в том, что результаты расчета можно проанализировать только визуальными методами компьютерной графики. Расчетные соотношения усложняет необходимость рассматривать формулы для характеристик электростатического поля в трех локальных системах координат.

Второй способ формулировки результатов решения заключается в переразложении потенциала источника электростатического поля и электрического отображения этого источника в сферической системе координат, связанной с центром сферы, по известным теоремам сложения (формулам переразложения). Этим методом показано, что источник в виде отрезка равномерно заряженной нити создает на изолированной проводящей сфере потенциал:

$$\varphi \Big|_{r=R_0} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{z_2}{z_1}, \quad (1)$$

где где  $\varphi$  – потенциал, В;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $R_0$  – радиус сферы, м;  $\tau$  – линейная плотность электрического заряда нити, Кл/м;  $z_1$  и  $z_2$  – координаты нити, м.

При этом поверхностная плотность заряда, индуцированного на сфере:

$$\sigma = -\epsilon_0 \left( \sum_{n=0}^{\infty} \tau a_n R_0^{n-1} (2n+1) P_n(\cos \Theta) - \frac{\tau}{R_0} a_0 \right); \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{z_2}{z_1}; \quad a_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{z_1^n} - \frac{1}{z_2^n} \right) \text{ при } n \geq 1,$$

где  $n$  – счетная переменная;  $a_n$  – коэффициент разложения, м/Ф;  $P_n$  – полином Лежандра порядка  $n$ ;  $\Theta$  – угловая сферическая координата, рад.

Этот способ обладает весьма большой общностью, так как им можно решать задачи не только для сфер и не только для электростатических, но и для квазистатических полей. Полученный результат может быть использован для проверки задач об электростатической индукции на эллипсоиде и для построения теории электростати-



ческого поля «от простого к сложному». Но недостаток способа – расчетные соотношения получаются в форме рядов по полиномам Лежандра, что усложняет решение практических задач.

Третий возможный способ представления расчетных соотношений – использование физических соображений и известного выражения для расстояния в сферической системе координат (предложен анонимным рецензентом статьи автора доклада).

Известно, что для элементарного заряда нити  $dq = \tau da$  индуцированный потенциал сферы равен потенциалу, созданному размещенным в центре шара точечным зарядом, который равен элементарному. Тогда потенциал сферы, созданный отрезком нити:

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \int_{z_1}^{z_2} \frac{da}{a} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{z_2}{z_1}. \quad (3)$$

Это выражение совпадает с (1).

Для расчета наведенного на сфере заряда выражение для потенциала сферы, созданного элементарным зарядом нити, записывается в сферической системе координат с использованием формулы для расстояния в сферической системе координат. Полученное выражение дифференцируется по сферической координате  $R$  и умножается на  $-\epsilon_0$ . Затем результат интегрируется по координате элементарного заряда нити. В результате формула для поверхностной плотности заряда сферы имеет вид

$$\sigma = \frac{\tau}{4\pi R_0} \ln \frac{z_2}{z_1} + \frac{\tau}{4\pi R_0} \left[ \frac{t}{\sqrt{1+t^2-2t\cos\Theta}} - \ln\left(t + \sqrt{1+t^2-2t\cos\Theta}\right) + 4 \frac{t}{4-8t\cos\Theta\sqrt{1+t^2-2t\cos\Theta}} \right]_{\frac{z_1}{R_0}}^{\frac{z_2}{R_0}}, \quad (4)$$

где  $t$  – безразмерная расчетная переменная.

Хотя полученное выражение аналитическое и замкнутое, но этот способ представления решения имеет недостатки. Во-первых, он применим только к сферам. Во-вторых, получение решения требует нетривиальных преобразований. Чем сложнее форма источника электростатического поля, тем сложнее преобразования. В то же время при использовании теорем сложения преобразования кажутся более громоздкими, но математически они проще, так как не требуется работать с иррациональностями.

Поэтому следует заключить, что ни один из рассмотренных способов представления решения задачи об электростатической индукции на изолированной проводящей сфере не имеет решающего преимущества перед остальными. В такой ситуации выбор способа представления решения диктуется тем, как будет это решение использовано. Поэтому, в частности, все описанные способы представления решения должны быть известны и отражены в литературе независимо от личных предпочтений. Тем самым достигается необходимая систематизация изложения теории электростатического поля, что значительно облегчает выбор методов для решения прикладных задач электрофизики и электротехники.

УДК 621.01

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАМЕНЯЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ ПРИ ПРОЧНОСТНОМ РАСЧЕТЕ КУЛАЧКОВОГО МЕХАНИЗМА

А. Т. Бельский, В. С. Акулич

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

Широкое применение кулачковых механизмов в технике объясняется возможностями этих механизмов. Они применяются в станках для подачи заготовок, в конвейерах и транспортерах, управляют механизмами дозаторов или концевых выключателей, в двигателях внутреннего сгорания они перемещают выпускные и впускные клапаны. К существенному недостатку кулачкового механизма относится наличие значительного удельного давления на поверхностях соприкасающихся звеньев, что приводит к повышенному износу трущихся поверхностей и уменьшению долговечности механизма.

Расчет кулачковых механизмов предусматривает определение контактных напряжений в зоне соприкосновения толкателя и кулачка. Для дисковых кулачковых механизмов при определении контактного напряжения применяют формулу Герца в случае контакта двух цилиндров или цилиндра и плоскости.

Условие прочности кулачкового механизма в этом случае имеет вид

$$\sigma_H = 0,418 \sqrt{\frac{E_{np} N}{b\rho}} \leq [\sigma_H],$$

где  $E_{np}$  – приведенный модуль упругости;  $N$  – нормальное давление в месте контакта;  $b$  – ширина кулачка;  $\rho$  – радиус кривизны профиля в точке соприкосновения;  $[\sigma_H]$  – допускаемое контактное напряжение.

Для выполнения условия прочности необходимая ширина кулачка должна быть:

$$b \geq 0,175 \frac{E_{np} N}{\rho [\sigma_H]^2}.$$

Для кулачкового механизма с плоским толкателем (рис. 1) нормальное давление в точке  $B$  контакта можно определить по зависимости

$$N = \frac{\Sigma M_c}{l},$$

где  $\Sigma M_c$  – сумма моментов всех сил, действующих на коромысло, за исключением нормальной силы  $N$  относительно шарнира  $C$ ;  $l$  – длина коромысла до точки контакта.

С учетом значения нормального давления  $N$  зависимость для определения требуемой ширины дискового кулачка принимает вид

$$b \geq 0,175 \frac{E_{np} \Sigma M_c}{\rho l [\sigma_H]^2}.$$

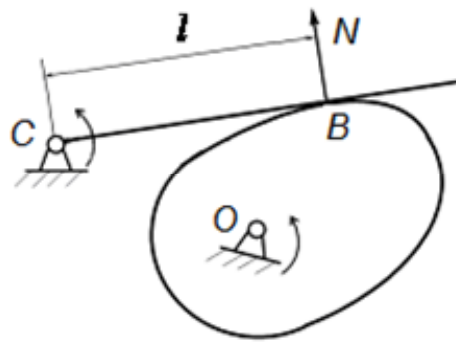


Рис. 1. Кулачковый механизм с плоским толкателем

Анализируя данную зависимость, видим, что требуемая ширина кулачка может быть определена только при известных значениях  $\rho$  и  $l$  в точке контакта. Для установления этих величин воспользуемся заменяющим механизмом (рис. 2).

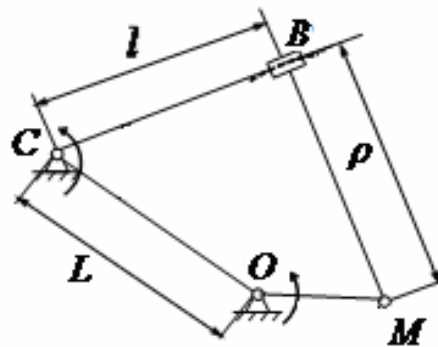


Рис. 2. Заменяющий механизм

Для определения величины  $l$  совместим точку коромысла  $N$  с точкой  $M$  и построим повернутым на  $90^\circ$  план скоростей заменяющего механизма в масштабе  $\mu_v = \omega_1$  (рис. 3).

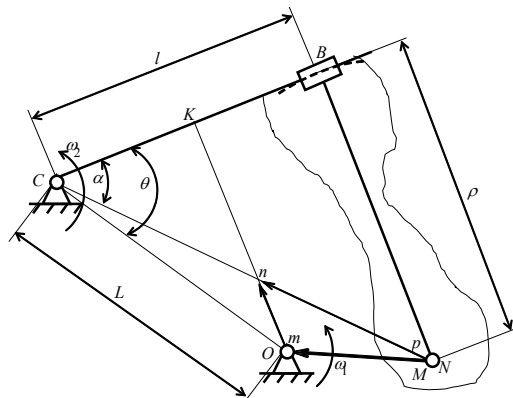


Рис. 3. Заменяющий механизм с повернутым планом скоростей

Абсолютная скорость точки  $N$ , равная  $V_N = CN\omega_2$ , будет изображаться отрезком  $pn$  и может быть установлена из плана скоростей как  $V_N = pn\omega_1$ . Приравнивая правые части и используя теорему подобия, получаем зависимость, определяющую длины коромысла от угла поворота кулачка:

$$l = L \frac{\cos \theta}{1 - \frac{d\psi}{d\varphi}}.$$

Для определения радиуса кривизны кулачка построим план ускорений заменяющего механизма в масштабе  $\omega_1^2$  (рис. 4).

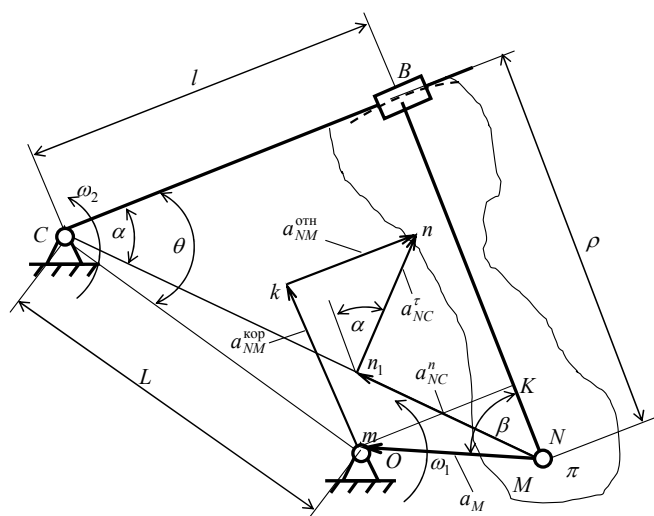


Рис. 4. Заменяющий механизм с планом ускорений

Ускорение точки  $N$  коромысла определяется векторным уравнением:

$$\vec{a}_N = \vec{a}_M + \vec{a}_{NM}^{\text{кор}} + \vec{a}_{NM}^{\text{отн}} = \vec{a}_N^n + \vec{a}_{NM}^\tau.$$

Учитывая, что  $a_M = OM\omega_1^2$ ;  $a_{NM}^{\text{кор}} = 2V_{NM}\omega_2$ ;  $a_N^n = CN\omega_2^2$ ; и  $a_N^\tau = CN\varepsilon_2$ , после преобразований получили зависимость для определения радиуса кривизны  $\rho$ :

$$\rho = L \frac{\frac{d^2\psi}{d\varphi^2} \cos \theta + \left(1 - \frac{d\psi}{d\varphi}\right) \left(1 - 2 \frac{d\psi}{d\varphi}\right) \sin \theta}{\left(1 - \frac{d\psi}{d\varphi}\right)^3}.$$

Использование заменяющего механизма позволило установить искомые величины, необходимые для нахождения требуемой ширины кулачка.

#### Литература

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин : учеб. для вузов / И. И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1988. – 640 с.

УДК 530.1:51-72

**ФУНКЦИЯ ГРИНА УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА****В. Ю. Гавриш, П. В. Асвинова***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Задача столкновения двух частиц в классической механике с учетом прицельного расстояния и скорости частиц решается известными методами. В квантовой механике меняется сама постановка вопроса, поскольку понятие траектории, а с нею и прицельного расстояния теряет смысл.

В работе продемонстрирована процедура получения дифференциального сечения с последующим переходом расчета функции Грина. В работе авторы, используя методы функции комплексного переменного, получают выражения для амплитуды рассеяния плоской волны.

**Связь дифференциального сечения с амплитудой рассеяния.** Известно [1], [2], что свободная частица массы  $m$  описывается плоской волной. Применяя нормировку, при которой плотность потока в волне равна скорости частицы  $\bar{v}$ , получаем:

$$\Psi_{\vec{k}}^0(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}}. \quad (1)$$

Рассеянные частицы будут описываться расходящейся сферической волной:

$$\Psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}} + f(\vec{k}', \vec{k}) \frac{e^{i\vec{k}'\vec{r}}}{r} \quad (2)$$

с функцией  $f(\vec{k}', \vec{k})$ , которую называют амплитудой рассеяния.

Элемент дифференциального сечения рассеяния  $d\sigma$ , соответствующий элементу телесного угла  $d\Omega$ , определяется выражением

$$d\sigma = \frac{dn}{j_{in}}. \quad (3)$$

Число частиц  $dn$  пропорционально плотности потока рассеянных частиц  $j_{out}$ :

$$dn = j_{out} r^2 d\Omega, \quad (4)$$

используя выражение для плотности тока вероятности:

$$j(\vec{r}) = -\frac{i\hbar}{2m} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) \quad (5)$$

после некоторых вычислений для падающей (1) и рассеянной волны (2) из общего выражения (3) следует выражение для дифференциального сечения:

$$d\sigma = \left| f(\vec{k}', \vec{k}) \right|^2 d\Omega. \quad (6)$$

Из соотношения (6) следует, что задача о вычислении сечения рассеяния сводится к поиску амплитуды рассеяния  $f(\vec{k}', \vec{k})$ .

**Функция Грина свободной частицы.** Свободная частица описывается уравнением Шредингера:

$$\widehat{H}_0 \psi_{\vec{k}}^0(\vec{r}) = E \psi_{\vec{k}}^0(\vec{r}), \quad (7)$$

где  $\widehat{H}_0$  – гамильтониан. Для свободной частицы гамильтониан представлен оператором кинетической энергии:

$$\widehat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta. \quad (8)$$

Волновая функция, соответствующая выражению (8), определяется формулой (1).

В случае наличия оператора взаимодействия  $\widehat{V} = V(\vec{r})$  уравнение Шредингера принимает вид

$$(\widehat{H}_0 + \widehat{V})\psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r}). \quad (9)$$

Для простоты будем полагать, что взаимодействие исчезает на больших расстояниях от силового центра, т. е.  $V(\vec{r} \rightarrow \infty) = 0$ . Перепишем (9) в виде

$$(\widehat{H}_0 - E)\psi(\vec{r}) = -\widehat{V} \psi(\vec{r}), \quad (10)$$

решение которого будем проводить методом функции Грина. Для этого перейдем от дифференциального уравнения Шредингера (10) к эквивалентному интегральному уравнению:

$$\psi(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}} + \int G_0(E, \vec{r}, \vec{r}') V(\vec{r}')\psi(\vec{r}')d\vec{r}', \quad (11)$$

где  $G_0(E, \vec{r}, \vec{r}')$  – функция Грина, соответствующая оператору  $\widehat{H}_0$  и удовлетворяющая уравнению

$$(E - \widehat{H}_0)G_0(E, \vec{r}, \vec{r}') = \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (12)$$

с дельта-функцией Дирака  $\delta(\vec{r} - \vec{r}')$  [3]. Легко убедиться, что, если  $G_0(E, \vec{r}, \vec{r}')$  является функцией Грина, соответствующей оператору  $\widehat{H}_0$ , то справедливо так называемое спектральное разложение или спектральное представление функции Грина [2]:

$$G_0(E, \vec{r}, \vec{r}') = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n^0(\vec{r})\psi_n^{*0}(\vec{r}')}{E_0 - E_n}, \quad (13)$$

которое в случае непрерывного спектра оператора  $\widehat{H}_0$  определяется интегралом вида

$$G_0(E, \vec{r}, \vec{r}') = \int \frac{\psi_{\chi}^0(\vec{r})\psi_{\chi}^{*0}(\vec{r}')}{E_0 - E_{\chi}} \frac{d\vec{\chi}}{(2\pi)^3}. \quad (14)$$

Выполняя несложные преобразования, связанные, в частности, с интегрированием по направлениям вектора  $\vec{\chi}$ , приходим к выражению

$$G_0(E, \vec{r}, \vec{r}') = \frac{m}{2\pi^2 \hbar^2} \frac{1}{i|\vec{r} - \vec{r}'|} \int \frac{e^{i\vec{\chi}|\vec{r} - \vec{r}'|}}{\frac{2mE_0}{\hbar^2} - |\vec{\chi}|^2} \frac{d\vec{\chi}}{(2\pi)^3}, \quad (15)$$

где было учтено, что  $|\vec{k}| = \sqrt{\frac{2mE_0}{\hbar^2}}$ .

Выражение (15) не определяет функции Грина однозначно. Рассмотрим два способа обхода полюсов: добавим к положительной вещественной величине  $E_0$  малую добавку  $\pm i\varepsilon$ . Соответствующие выражения для функции Грина обозначим индексами (+) или (-):

$$G_0^{(\pm)}(E, \vec{r}, \vec{r}') = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} G_0(E \pm i\varepsilon, \vec{r}, \vec{r}'), \quad (16)$$

которое с помощью техники вычетов [4] приводит к

$$G_0^{(+)}(E, \vec{r}, \vec{r}') = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \frac{e^{i\vec{k}|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|}; \quad (17)$$

$$G_0^{(-)}(E, \vec{r}, \vec{r}') = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \frac{e^{-i\vec{k}|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|}.$$

Случай расходящейся волны соответствует  $G_0^{(+)}(E, \vec{r}, \vec{r}')$ ; с учетом (11) приходим к

$$\psi(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}} - \int \frac{m}{2\pi\hbar^2} \frac{e^{i\vec{k}|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} V(\vec{r}')\psi(\vec{r}')d\vec{r}', \quad (18)$$

откуда путем сравнения с общим выражением (2) получаем, что амплитуда рассеяния определяется функцией Грина (17) и явным видом оператора взаимодействия  $\hat{V} = V(\vec{r})$ .

Решение интегрального уравнения (18) даже в случае простейшего оператора решают приближенно методом итераций, поэтому указанные расчеты в силу громоздких выражений здесь приводиться не будут.

Таким образом, в работе получен явный вид функции Грина уравнения Шредингера. Полученные выражения могут быть использованы для решения задач рассеяния на кулоновском потенциале, а также для других часто используемых потенциалов в физических приложениях.

#### Литература

1. Ландау, Л. Д. Курс теоретической физики : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Физматлит, 2008. – Т. 3. Квантовая механика. – 800 с.
2. Савельев, И. В. Основы теоретической физики / И. В. Савельев. – СПб. : Лань, 2005. – Т. 2. Квантовая механика. – 432 с.
3. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики / В. С. Владимиров. – М. : Наука, 1967. – 436 с.
4. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М. : Наука, 1973. – 749 с.

**ФУНКЦИЯ ГРИНА УРАВНЕНИЯ ДИРАКА****В. Ю. Гавриш, В. Ю. Златина***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Вычисление процессов стандартной модели тесно связано с методами математической физики и теорией специальных функций. Это обусловлено тем, что уравнения скалярных, векторных и спинорных частиц являются дифференциальными уравнениями различных порядков [1]–[5].

В работе проведем вычисление функции Грина [5] для частицы полуцелого  $\hbar/2$  спина. Указанные выражения используются не только для описания движения частиц во внешних полях, но и при вычислении квантово-полевых амплитуд в теории рассеяния.

**Метод функции Грина.** В разделе кратко изложим метод функции Грина, который представляет собой один из универсальных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных [5].

Пусть дифференциальное уравнение имеет вид

$$\hat{Q}f(x) = f_0(x), \quad (1)$$

где  $\hat{Q}$  – линейный дифференциальный оператор;  $f(x)$  – искомая функция;  $f_0(x)$  – некоторая заданная функция. Каждой функции  $g(x)$  соответствует свое решение. Такое соответствие можно представить в виде операторного соотношения:

$$f(x) = \hat{L}f_0(x), \quad (2)$$

в котором  $\hat{L}$  есть некоторый оператор, определяемый видом оператора  $\hat{Q}$ . Для решения поставленной задачи введем функцию  $G(x, x')$ , являющуюся решением уравнения

$$\hat{Q}G(x, x') = \delta(x - x'), \quad (3)$$

где  $\delta(x - x')$  – дельта-функция Дирака [6]. Функцию  $G(x, x')$  называют функцией Грина, отвечающей рассматриваемой задаче. С помощью  $G(x, x')$  решение уравнения может быть представлено в виде

$$f(x) = \int G(x, x')f_0(x') dx'. \quad (4)$$

Действительно, подействуем на соотношение (4) оператором  $\hat{Q}$ . Учтя (3), получаем, что

$$\hat{Q}f(x) = \int \hat{Q}G(x, x')f_0(x') dx' = \int \delta(x - x')f_0(x') dx' = f_0(x). \quad (5)$$

**Функция Грина для уравнения Дирака.** Решим методом функции Грина уравнение Дирака для электрона в электромагнитном поле:



$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi(x) = -e \gamma^\mu A_\mu(x) \psi(x), \quad (6)$$

где  $\gamma^\mu = \{\gamma^0, \gamma^1, \gamma^2, \gamma^3\}$  – матрицы Дирака;  $e$  – заряд частицы полуцелого спина. Следуя методу, изложенному выше, решим вспомогательную задачу вида

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)G_F(x, x') = \delta^{(4)}(x - x'). \quad (7)$$

Найдя функцию Грина  $G_F(x, x')$ , решение уравнения (6) можно записать в виде

$$\psi(x) = -e \int G_F(x, x') \gamma^\mu A_\mu(x') \psi(x') dx'. \quad (8)$$

Чтобы решить уравнение (6), запишем функцию Грина  $G_F(x, x')$  в импульсном пространстве:

$$G_F(x, x') = \frac{1}{(2\pi)^4} \int S_F(p) e^{-ip(x-x')} d^4 p, \quad (9)$$

где  $S_F(p)$  – Фурье-образ функции. Представляя дельта-функцию Дирака в импульсном пространстве:

$$\delta^{(4)}(x - x') = \frac{1}{(2\pi)^4} \int e^{-ip(x-x')} d^4 p, \quad (10)$$

из (9) получаем:

$$\frac{1}{(2\pi)^4} \int S_F(p) (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) e^{-ip(x-x')} d^4 p = \frac{1}{(2\pi)^4} \int e^{-ip(x-x')} d^4 p. \quad (11)$$

Проводя нетрудные вычисления:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) e^{-ip(x-x')} = (\gamma^\mu p_\mu - m) e^{-ip(x-x')} \quad (12)$$

и вводя обозначение  $\gamma^\mu p_\mu = \hat{p}$ , получаем выражение для  $S_F(p)$ :

$$(\hat{p} - m)S_F(p) = 1. \quad (13)$$

Используя перестановочные соотношения для матриц Дирака:

$$\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}, \quad (14)$$

где  $g^{\mu\nu}$  – метрический тензор [4], [5], из (13) получаем:

$$S_F(p) = \frac{1}{(\hat{p} - m)} = \frac{\hat{p} + m}{p^2 - m^2}. \quad (15)$$

С учетом (14) и определения скалярного произведения четырех векторов [1], [2] нетрудно показать:

$$\hat{p}\hat{p} = p_\mu p_\nu \gamma^\mu \gamma^\nu = p_\mu p_\nu (2g^{\mu\nu} - \gamma^\nu \gamma^\mu), \quad (16)$$

или окончательно  $\hat{p}\hat{p} = p^2$ .

Чтобы завершить вычисление  $S_F(p)$ , определим, как обращаться с сингулярностями при

$$p^2 - m^2 = p_0^2 - (\vec{p}^2 + m^2) = 0. \quad (17)$$

Верное правило интегрирования вблизи полюсов при  $p_0 = \pm E$  получается при наложении подходящих граничных условий. Для этого воспользуемся методом «сдвига» полюсов с оси, оставляя при этом контур интегрирования без изменений. Чтобы сделать это, запишем  $S_F(p)$  в виде

$$S_F(p) = \frac{\hat{p} + m}{p^2 - m^2 + i\varepsilon}. \quad (18)$$

Введение  $i\varepsilon$  с бесконечно малым положительным  $\varepsilon$  приводит к сдвигу полюсов при  $p_0 = \pm E$  соответственно немного вниз и вверх от оси. Процедура связана с использованием теоремы Коши о вычетах с последующим выбором контура интегрирования, однако подробные вычисления достаточно громоздки (см. [2], [3]).

Использование выражений (9) и (18) приводит к явному виду искомой функции Грина [2]:

$$G_F(x, x') = \frac{1}{(2\pi)^4} \int \frac{\hat{p} + m}{p^2 - m^2 + i\varepsilon} e^{-ip(x-x')} d^4 p. \quad (19)$$

Полученное выражение и явный вид  $A_\mu(x)$  могут быть использованы для решения уравнения (6) движения частиц полужелтого спина во внешних полях.

Таким образом, в работе получен явный вид функции Грина уравнения Дирака. В ходе исследования были использованы Фурье-преобразования и методы теории функции комплексного переменного. Полученные выражения могут быть применены для решения задач теории рассеяния, а также расчета квантово-полевых амплитуд переходов спинорных частиц.

#### Л и т е р а т у р а

1. Пескин, М. Е. Введение в квантовую теорию поля / М. Е. Пескин, Д. В. Шредер. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2001. – 784 с.
2. Биленький, С. М. Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия / С. М. Биленький. – М. : Энерго-атомиздат, 1990. – 327 с.
3. Хелзен, Ф. Лептоны и кварки: введение в физику частиц / Ф. Хелзен, А. Мартин. – М. : Мир, 1987. – 456 с.
4. Borodulin, V. I. CORE: COmpendium of RElations: Version 3.1 / V. I. Borodulin, R. N. Rogalyov, S. R. Slabospitsky // CORE. – Mode of access: <http://arxiv.org/pdf/hep-ph/9507456>. – Date of access: 10.08.2020.
5. Савельев, И. В. Основы теоретической физики / И. В. Савельев. – СПб. : Лань, 2005. – Т. 2. Квантовая механика. – 432 с.
6. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики / В. С. Владимиров. – М. : Наука, 1967. – 436 с.

УДК 621.762

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОКРЫТИЯ НА ДЛИННОМЕРНОЕ ИЗДЕЛИЕ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ

Н. В. Иноземцева, А. Т. Бельский

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

Формирование покрытия на длинномерное изделие может осуществляться различными методами: шликерный метод, метод погружения в расплав, метод натирания и др.

В последнее время большое внимание уделяется разработке процессов нанесения покрытия с формированием слоя из порошка металла методами обработки металлов давлением [1]. Процесс формирования порошкового покрытия с помощью указанных методов заключается в совместной пластической деформации основы и металлического порошка деформирующим инструментом. Совместная пластическая деформация позволяет не только сформировать порошковое покрытие, но и закрепить его на длинномерном изделии.

В настоящее время наиболее полно исследовано напряженное состояние при формировании порошкового покрытия на длинномерном изделии в процессе прокатки [2]. Для теоретического определения контактных напряжений по данному методу очаг уплотнения деформации порошка условно был разделен на два участка. На первом участке происходит уплотнение и деформация порошка без пластической деформации подложки, а на втором – порошковый слой деформируется на пластически деформируемой подложке.

Данная работа посвящена определению действующих напряжений в очаге деформации при формировании покрытия в процессе волочения. Необходимым условием формирования порошкового покрытия в процессе волочения является достижение состояния плотности утряски у входа в рабочий конус волоки.

Исследуя напряженное состояние при формировании покрытия из металлического порошка на длинномерное изделие в процессе волочения, очаг уплотнения (рабочий конус волоки) условно разделяется на три участка (рис. 1).

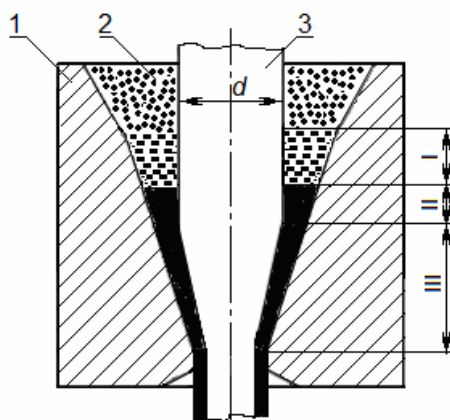


Рис. 1. Схема формирования покрытия из порошка металла при волочении:  
1 – волока; 2 – порошок; 3 – проволока

На первом участке рабочего конуса волокна происходит увеличение плотности порошка металла от состояния утряски до состояния компактного металла. Уплотнение металлического порошка на первом участке осуществляется в основном за счет пластической деформации его частиц, что приводит к схватыванию отдельных частиц друг с другом.

При рассмотрении напряженного состояния на этом участке [3] были сделаны допущения, что пористость равномерно распределена по объему порошка металла, плотность по ширине деформируемого покрытия одинаковая и уплотняемый материал является средой с однородной структурой. Такие допущения позволили применить к порошку металла общие законы механики деформируемого тела.

На втором участке происходит деформация формируемого покрытия. В конце второго участка напряжение в сердечнике достигает предела текучести. Определенное напряженное состояние в покрытии и сердечнике и исследуется в этой работе.

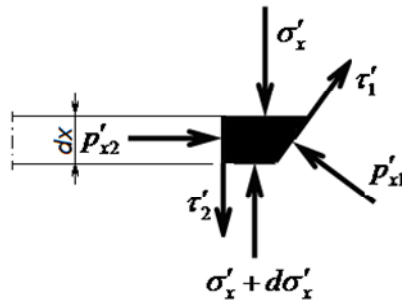


Рис. 2. Кольцевой элемент второго участка

Уравнение равновесия всех сил, действующих на кольцевой элемент покрытия толщиной  $dx$  на втором участке (рис. 2), можно получить в следующем виде:

$$\sigma'_x dA_x - d\sigma'_x A_x + \tau'_2 dx \pi d - \tau'_1 \pi D_x dx - p'_{x1} \pi D_x dx \operatorname{tg} \alpha = 0.$$

Фактическое сопротивление пластической деформации порошка на этом участке формирования покрытия при волочении представим в виде

$$\sigma'_\phi = n_t n_v \left( \sigma_{\text{тк}} + m_1 \frac{A_k}{A_x} - m_1 \right),$$

где  $d$  – диаметр сердечника;  $D_x$  – диаметр рабочего конуса волокна в сечении  $x$ ;  $\alpha$  – рабочий угол волокна;  $A_x$  – площадь покрытия в сечении  $x$ ;  $A_k$  – площадь покрытия в конце второго участка;  $n_t$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры;  $n_v$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости волочения;  $\sigma_{\text{тк}}$  – предел текучести материала покрытия в начале второго участка;  $m_1$  – модуль упрочнения на втором участке.

Принимая  $\tau'_1 = f_1 p'_{x1}$  и  $\tau'_2 = 0,5 \sigma'_\phi$ , а также условие пластичности течения осесимметричных тел в виде

$$p'_x = n_\beta \sigma'_\phi + \sigma'_x,$$

получим дифференциальное уравнение в следующем виде:

$$\frac{dp'_x}{dD_x} - A_2 p'_x \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2} = -B_2 \frac{2D_x}{(D_x^2 - d^2)^2} - B_3 \frac{2D_x}{D_x^2 - d^2},$$

где  $n_\beta$  – коэффициент Лодэ;  $A_2, B_2, B_3$  – коэффициенты.

Постоянные коэффициенты, входящие в данное дифференциальное уравнение, определяют по выражениям:

$$A_2 = 1 + \frac{f_1 + \operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\alpha(1 - f_1 \operatorname{tg}\alpha)}; B_2 = 8n_\tau n_\nu n_\beta m_1 \frac{A_k}{\pi} + \frac{M_2}{2D_{cp}}; B_3 = n_\tau n_\nu n_\beta (\sigma_{\text{тк}} - m_1) + \frac{M_1}{2D_{cp}}.$$

Данное дифференциальное уравнение представляет собой линейное неоднородное уравнение первого порядка и относится к виду

$$\frac{dy}{dx} + \Phi_x y = Q_x,$$

и имеет интегрирующий множитель:

$$z = e^{\int \Phi_x dx}.$$

Общий интеграл дифференциального уравнения представляет собой следующее выражение:

$$y = e^{\pm \int \Phi_x dx} \left( C + \int Q_x e^{\mp \int \Phi_x dx} dx \right).$$

После интегрирование получим зависимость распределения нормального контактного давления вдоль очага деформации на втором участке формирования покрытия в следующем виде:

$$p'_x = \left[ p_1 - \frac{B_3}{A_2} - \frac{B_2}{(A_2 + 1)(D_x^2 - d^2)} \right] \frac{(D_x^2 - d^2)^{A_2}}{(D_x^2 - d^2)^{A_2}} + \frac{B_2}{(A_2 + 1)(D_x^2 - d^2)} + \frac{B_3}{A_2}.$$

На основании теоретических исследований были получены зависимости для определения нормального напряжения  $p_x$  в слое покрытия в сердечнике на втором участке формирования покрытия в процессе волочения.

#### Литература

1. Бобарикин, Ю. Л. Технологическое условие образования соединения между металлической основой и порошковым покрытием на стадии их совместной пластической деформации в технологиях плакирования / Ю. Л. Бобарикин, Н. В. Иноземцева // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3. – С. 15–21.
2. Бобарикин, Ю. Л. Теоретическое определение контактных напряжений при плакировании полос порошковыми материалами / Ю. Л. Бобарикин, Н. И. Стрикель, А. М. Урбанович // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2000. – № 2. – С. 15–24.
3. Бельский, А.Т. Теоретическое исследование напряженного состояния в очаге деформации при формировании покрытия в процессе волочения / А. Т. Бельский, Н. В. Иноземцева // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 1. – С. 23–31.

УДК 621.778.073

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАПОРНОЙ ВОЛОКИ ПРИ МОКРОМ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ

С. И. Прач, В. А. Петрусевич

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

Волочение проволоки – это процесс обработки металла давлением, при котором последний постепенно однократно или многократно протягивается через специальный волочильный инструмент – волоку, предназначенную для поэтапного уменьшения поперечного сечения исходной заготовки.

Одной из значимых проблем при волочении проволоки является ее обрывность. Основная причина обрыва проволоки при тонком волочении – снижение пластичности вследствие высокой температуры на ее поверхности в результате деформационного старения [1].

В данной работе в целях решения причин обрыва проволоки исследуем применение напорных волок, которые обеспечивают принудительную подачу смазки в зону деформации волоки и снижение трения и усилия деформации при протягивании проволоки через эту волоку.

Напорные волоки получили распространение в процессах сухого волочения, где используются сухие порошкообразные смазки [2]. Принцип работы напорной волоки состоит в нагнетании смазки в зоне деформации в результате избыточного давления смазки в напорной зоне перед рабочей волокой. Напорная зона представляет собой узкий канал между проволокой и напорной вставкой. Избыточное давление создается за счет увлечения смазки проволокой в зону деформации. Геометрия узкого канала волоки и степень вязкости смазки определяют величину избыточного давления.

В исследовании [3] рассматривается процесс волочения в режиме гидростатического трения, где представлены влияние размера зазора между проволокой и волокой, длины напорных трубок и скорости волочения на развиваемое давление.

Для волочения в режиме гидродинамического трения применяются напорные трубки-насадки. Смазка увлекается движущимся изделием в зазор между поверхностью изделия и насадки, нагнетается в зону деформации, и при определенном давлении смазки трущиеся поверхности в зоне деформации разделяются. Для получения высоких давлений применяемые величины зазоров незначительны, поэтому можно считать течение плоским.

При использовании напорных волок в процессах мокрого волочения рассмотрим разработанный инструмент для волочения проволоки [4], особенностью которого является достижение равномерного смазочного слоя с пониженной вязкостью на поверхности проволоки.

Инструмент для волочения проволоки, представленный на рис. 1, состоит из корпуса 1, деформирующей волоки 2, напорной волоки 3, содержащей кольцо 4, и эластичный кольцевого уплотнителя 5, установленного между напорной волокой и корпусом для создания нежесткого закрепления напорной волоки, которое обеспечивает повышение вибростойкости устройства и сбалансированное состояние между волокой и проволокой 6, снижающее величину контактного трения между ними. Эластичный кольцевой уплотнитель понижает вибрацию проволоки, что также позволяет уменьшить количество ее обрывов во время волочения. Кроме того, уста-

новлена определенная величина зазора между проволокой и внутренним каналом напорной волоки, гарантирующая непрерывное обеспечение эффективного экранирующего слоя волоочильной смазки за счет ее стабильной подачи в очаг деформации. Это обеспечивает повышение давления между напорной и деформирующей волоками, что приводит к принудительной подаче эмульсии к деформирующей волоке и снижению усилия при волочении, повышению стойкости деформирующих волок.

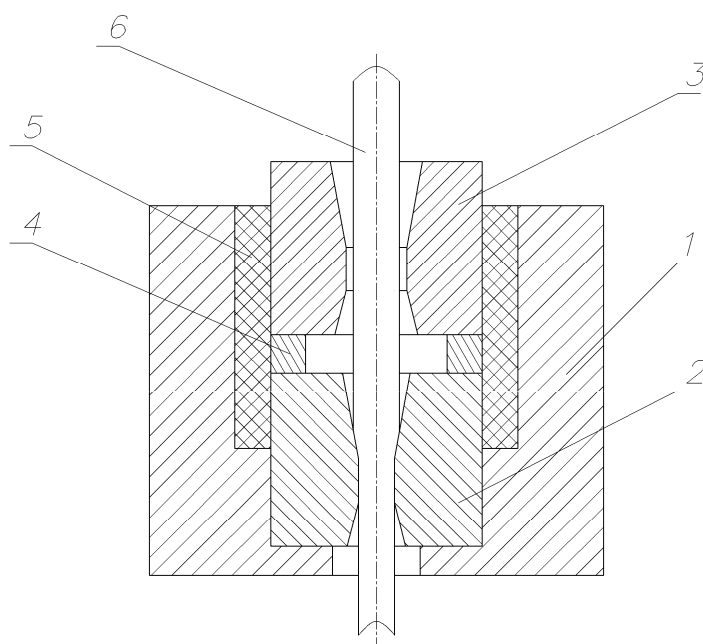


Рис. 1. Схема узла установки напорной волоки в волокодержатель промышленного волоочильного стана:  
1 – корпус; 2 – деформирующая волока;  
3 – напорная волока; 4 – кольцо; 5 – уплотнение; 6 – проволока

Устройство работает следующим образом: при волочении проволока проходит через канал напорной волоки. Эластичный кольцевой уплотнитель напорной волоки снижает трение между проволокой и волокой, зазор между которыми обеспечивает захват подаваемой водозмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости (ВСОЖ) поверхностью проволоки и ее движение по направлению волочения. В результате в пространстве между напорной и деформирующей волокой создается избыточное давление ВСОЖ. Это давление способствует принудительной подаче ВСОЖ в зону деформации проволоки в деформирующей волоке. Принудительная подача ВСОЖ обеспечивает рост толщины смазочного слоя в зоне деформации в деформирующей волоке. Повышение толщины смазочного слоя способствует снижению усилия волочения, износа рабочей волоки.

Были проведены эксперименты по определению усилия и температуры поверхности проволоки при мокром волочении с применением напорных волок с использованием водозмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости VSV77 R с концентрацией 10 %, нагреваемой перед заливкой в волокодержатель до температуры 45 °С, результаты которых представлены в таблице.

## Результаты эксперимента по исследованию применения напорных волок

Характеристика режимов волочения	Усилие волочения со скоростью 0,26 м/с для перехода диаметров проволоки с 2,01 на 1,821 мм, диаметр напорной волоки 2,23 мм, Н	Температура поверхности проволоки, °С
Без напорной волоки	1510	240,7
С напорной волокой	1382	203,6

Анализ таблицы показывает наличие эффекта снижения усилия и температуры поверхности проволоки при применении напорной волоки. Снижение усилия волочения и температуры поверхности проволоки обосновано устойчивой подачей водозмульсионной смазки к деформирующей волоке и снижением коэффициента трения за счет достижения равномерного смазочного слоя с пониженной вязкостью на поверхности проволоки.

В результате проведенных исследований можно сделать следующий вывод: применение напорных волок при мокром волочении проволоки приводит к устойчивой подаче водозмульсионной смазки к деформирующей волоке и созданию равномерного смазочного слоя с пониженной вязкостью на поверхности проволоки, что, в свою очередь, не снижает ее пластичности и не приводит к обрыву проволоки.

## Литература

1. Колмогоров, В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушения / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 162 с.
2. Битков, В. В. Технология и машины для производства проволоки / В. В. Битков. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 346 с.
3. Колмогоров, В. Л. Гидродинамическая подача смазки / В. Л. Колмогоров, С. И. Орлов, Г. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1975. – 256 с.
4. Инструмент для волочения проволоки : пат. на полез. модель № 7793 Респ. Беларусь, МПК В 21 С 3/00 / М. Н. Верещагин, Ю. Л. Бобарикин, С. И. Прач, С. В. Авсейков ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № и 20110337 ; заявл. 28.04.2011.

УДК 621.792

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ  
НАПРЯЖЕНИЙ И ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ПРИ НАНЕСЕНИИ  
ПОРШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОКАТКОЙ**

**Н. В. Иноземцева, О. В. Солодкин**

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

Среди большого многообразия способов нанесения покрытий из порошковых материалов одним из самых производительных и неэнергоёмких способов является совместная прокатка в валках металлической основы в виде полосы и порошкового материала, наносимого на основу покрытия [1], [2]. Для получения надежного соединения покрытия с основой между валками пропускают импульсный электроток, разогревающий межвалковое пространство. Качество получаемого покрытия зависит от величины контактных напряжений и величины температуры в зоне совместной деформации порошка и основы. Поэтому определение этих параметров является достаточно актуальной задачей.



В результате исследований получены зависимости, позволяющие оценивать величину контактных напряжений со стороны порошкового слоя [3]. Дуга контакта вала с порошком условно разделена на три зоны: на первой зоне происходит уплотнение порошка на пластически не деформируемой полосе, где действуют контактные напряжения  $P_1$ ; на второй зоне осуществляется совместная пластическая деформация прокаткой спрессованного порошка и полосы при отстаивании скорости полосы от валков с контактными напряжениями  $P_2$ ; на третьей зоне присутствует состояние, аналогичное второй зоне, но при опережении, этой зоне соответствуют контактные напряжения  $P_3$ . Зависимости имеют вид:

$$P_1 = \beta \left( \frac{h_g \rho_g}{h} \right)^m \left[ \left( \sigma_s + \sigma_c \frac{m-1}{S-m} \right) \left( \frac{h}{h_\phi} \right)^\delta - \sigma_{Tn} \frac{m-1}{\delta-m} \left( \frac{h}{h_\phi} \right)^m \right];$$

$$P_2 = \beta \sigma_{sk} \left( \frac{h_\phi}{h_g} \right)^{\delta_1} + \beta \sigma_n \rho_n^m \frac{m}{m+\delta_1} \left[ \left( \frac{h_n}{h_\phi} \right)^m - \left( \frac{h_n}{h_g} \right)^m \left( \frac{h_\phi}{h_g} \right)^{\delta_1} \right];$$

$$P_3 = \beta \sigma_n \left[ \frac{m}{m-\delta^1} \left( \frac{h_n}{h_\phi} \right)^m - \frac{\delta^1}{m-\delta^1} \left( \frac{h_n}{h_\phi} \right)^{\delta_1} \right];$$

$$\delta = \frac{f + f_1}{2 \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_p - \alpha_g}{2} \right)}; \quad \delta^1 = \frac{R(f + f^1)}{(h_g - h_n)};$$

$$\sigma_{TC} = \sigma_s + \frac{\rho_g a_m (h - h_g)^n}{2h^n};$$

$$\sigma_{Tn} = \sigma_s + \frac{\rho_n a_m (h_g - h_n)^n}{h^n},$$

где  $h$  – высота насыпки слоя порошка на полосу на входе в валки;  $h_g$  и  $\rho_g$  – высота слоя и плотность порошка в момент начала пластической деформации подложки;  $h_n$  – высота слоя порошкового покрытия;  $\rho_n$  – плотность покрытия;  $\sigma_s$  – предел текучести материала порошка;  $\sigma_{TC}$  – сопротивление деформации порошка после прокатки;  $\sigma_{sk}$  – предел текучести материала полосы;  $m$  – показатель интенсивности уплотнения порошка;  $h_\phi$  – изменяемый параметр, определяющий текущее значение высоты слоя;  $a_m$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты для определения сопротивления материала, упрочняемого при наклепе;  $f$  и  $f_1$  – коэффициенты внешнего трения порошка о поверхности вала и полосы;  $\beta$  – коэффициент Луде;  $\alpha_p$  и  $\alpha_g$  – углы, определяющие положение в очаге деформации сечений порошка, высотой  $h$  и  $h_g$  соответственно.

Зависимости для  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  проверены экспериментально путем измерения

усилия прокатки и пересчета этой величины через  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ . Погрешность не превышает 11 %.

Для определения температуры в зоне деформации от действия пропускаемого электротока получена зависимость:

$$T = \frac{I^2 t (\rho_0 (\sqrt{\sigma_m / p} - 1) (1 - T / T_{\text{пл}}) + 2\rho_{\text{ср}} l / s)}{4m\gamma c s \sqrt{at}},$$

где  $I$  – сила тока;  $t$  – время взаимодействия;  $\rho_0$  – удельное электросопротивление материала;  $p$  – давление в очаге деформации;  $\sigma_m$  – предел текучести материала;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала;  $l$  – длина дуги контакта с валком;  $S$  – площадь контакта материала с валком;  $\gamma c$  – энтальпия материала;  $\rho_{\text{ср}}$  – среднее удельное электросопротивление материала;  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Полученные зависимости позволяют проектировать и интенсифицировать процесс нанесения износостойких защитных и других порошковых покрытий с помощью прокатки порошка и металлической основы.

#### Литература

1. Бобарикин, Ю. Л. Технология нанесения порошковых покрытий на стальную полосу / Ю. Л. Бобарикин и [др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 2003. – № 16. – С. 30–33.
2. Селивончик, Н. В. Анализ условия достижения адгезии между слоями биметалла при плакировании прокаткой / Н. В. Селивончик, Ю. Л. Бобарикин // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 29–38.
3. Бобарикин, Ю. Л. Теоретическое определение контактных напряжений при плакировании полос порошковыми материалами / Ю. Л. Бобарикин, Н. И. Стрикель, А. М. Урбанович // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого – 2000. – № 2. – С. 15–24.

УДК 519.87(075.32)

### СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ДИСКРЕТНЫМ И НЕПРЕРЫВНЫМ В ЭВОЛЮЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Л. Л. Великович

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

Со времен Галилея описание физического явления считается достоверным, если его факторы выражены числовыми величинами.

*Академик А. А. Самарский*

#### Общие понятия. Примеры

С самого начала существования человечества каждый конкретный индивид пытался построить в своей голове правильную картину окружающей действительности, используя для этого необходимые схематизации происходящего. Этот процесс теперь принято называть моделированием. И, конечно, математика при этом всегда играла не последнюю роль. Так, по-видимому, и возник натуральный ряд чисел –

главный фундамент всей математики.

Сам процесс моделирования можно представить в виде следующей схемы (из авторского опыта): УСМ – универсальная схема моделирования (рис. 1) (на примере процесса познания в физике) [1], [2].

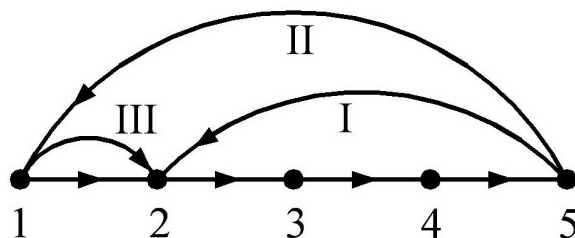


Рис. 1. Универсальная система моделирования:

- 1 – реальная физическая ситуация; 2 – модельная физическая ситуация;
- 3 – математическая модель; 4 – математическая информация; 5 – физическая интерпретация (информация); I – проверка на модельную адекватность;
- II – проверка на реальную адекватность; III – преобразование модели (в случае необходимости)

Для дальнейшего исследования нам потребуются следующие понятия.

**Определение 1.** Под **системой** понимается совокупность компонентов, взаимодействие которых порождает новые (интегративные, системные) качества, не присущие образующим. Существенными характеристиками системы являются ее системные качества, состав (структура), т. е. набор специфических частей, динамическая структура и характер взаимодействия с внешними условиями. Система и ее среда показаны на рис. 2.



Рис. 2. Неразлучная пара: система и ее среда

**Примечание.** Система – первый шаг на пути моделирования. Действительно, если в некотором объекте (явлении, процессе) нам удастся вычлениить составляющие системы, то дальнейшее исследование будет легче формализовать.

**Определение 2. Модель** – система со своей структурой и функцией, отражающая структуру и функцию оригинала (академик Н. М. Амосов).

Возможные подходы к моделированию:

1. Метод подобия – исторически первый и до сих пор достаточно востребованный способ моделирования (см., например, [3]). Но существует опасность: уменьшение масштаба может исказить явление («эффект карлика»).

2. Метод аналогий основан на том, что разные физические явления могут характеризоваться одними и теми же количественными взаимосвязями.

**Пример 1.** Аналогия между характеристиками флюидов и понятиями, принятыми в электротехнике приведена в [4, с.13].

В таблице представлены наименования величин и их размерности.

Таблица

**Величины и их размерности**

Наименование величины	Размерность	Наименование величины	Размерность
Давление $p$	кгс/см <sup>2</sup>	Напряжение $E$	В
Добыча/закачка $q$	см <sup>3</sup> /с	Сила тока	А
Объем флюидов (запасы) $V_c$	см <sup>3</sup>	Емкость электрическая $C_E$	мкФ
Проводимость	$\frac{Д \cdot см}{сП}$	Электрическая проводимость	Ом
Истинное время процесса $t$	с	Время моделирования $t$	с

### Диалектика дискретного и непрерывного в моделировании

Начнем с примеров.

**Пример 2.** Множество натуральных чисел  $N = \{1, 2, 3, \dots\}$  – это яркий пример дискретного объекта, ибо возле каждого из его элементов можно описать круг, внутри которого не будет других элементов из  $N$ .

**Пример 3.** Множество точек отрезка  $[0; 1]$  является непрерывным объектом.

*Примечание.* В теории вероятности (ТВ) случайную величину (СВ)  $X$  называют *дискретной* (ДСВ), если ее возможные значения являются изолированными точками числовой прямой, и *непрерывной*, если ее значения сплошь (без выколотых точек) заполняют некоторый интервал  $(a; b)$  числовой прямой.

Теперь совершим путешествие во времени. В определенный момент своего развития человеку потребовалось научиться перемещаться в пространстве быстрее (и дальше), чем позволяли физические возможности отдельного индивида. Сначала он начал использовать мускульную силу различных животных. Но и здесь были очевидные ограничения по скорости. Пришлось изобретать... колесо, и помчалось, покатилося: телега, велосипед, мотоцикл, машина, самолет, ракета..., а на воде – лодка, парусник, пароход и т. д. И на каждом из этих этапов использовались свои математическое обеспечение и способы моделирования.

Кратко перечислим участвующие математические дисциплины:

- а) арифметика и алгебра (дискретные объекты);
- б) теория чисел (дискретные объекты);
- в) геометрия: элементарная, аналитическая, дифференциальная, интегральная, начертательная, проективная, топология и т. д. (комбинации дискретных и непрерывных объектов);
- г) исчисление конечных разностей (дискретные объекты);
- д) дифференциальное и интегральное исчисление (непрерывные объекты);
- е) обыкновенные дифференциальные уравнения (непрерывные объекты);

- ж) уравнения математической физики (непрерывные объекты);
- з) вариационное исчисление (непрерывные объекты).

И все это уже было сделано к началу XIX в.

Не пытаясь объять необъятное, достаточно вспомнить, сколько нового появилось в математическом моделировании благодаря научно-технической революции XX в. и компьютерам. И в итоге дискретное взяло верх над непрерывным (например, современное стремление к оцифровке всего существующего). Сбылось пророчество великого Пифагора: «Число управляет миром!».

Как уже было отмечено, дискретное превалирует над непрерывным, но их взаимодействие, диалектика не может не восхищать. Приведем два поучительных примера.

**Пример 4.** В интегральном признаке сходимости числовых рядов с положительными членами  $n$ -й член ряда заменяют на функцию  $f(x)$ , где  $x$  – непрерывная переменная, принимающая свои значения на луче  $[1; +\infty)$  числовой прямой, а сам ряд – на несобственный интеграл  $\int_1^{\infty} f(x)dx$ .

**Пример 5.** При вычислении массы отрезка  $[a; b]$  с плотностью  $\rho = \rho(x)$ , где  $x \in [a; b]$ , данный отрезок разбивается на конечное число частей  $n$ :  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_{k-1} < x_k < \dots < x_{n-1} < x_n = b$  (т. е. нарушается непрерывность исходного объекта). В каждом из отрезков  $[x_{k-1}; x_k]$  выбирается произвольная точка  $p_k$ , вычисляются значения  $\rho(p_k)$  в выбранных точках. Находятся массы элементарных отрезков  $\rho(p_k)\Delta x_k = \Delta m_k$ . Затем эти массы суммируются, чтобы получить соответствующую интегральную сумму  $\sum_{k=1}^n \rho(p_k)\Delta x_k$ . И все рассмотренные операции, очевидно, носят дискретный характер. Чтобы получить точное выражение для массы отрезка, приходится от дискретного объекта (интегральной суммы) переходить к непрерывному объекту – определенному интегралу  $\int_a^b \rho(x)dx = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{k=1}^n \rho(p_k) \cdot \Delta x_k$  ( $\lambda = \max_{1 \leq k \leq n} \Delta x_k$ ), при этом  $n \rightarrow +\infty$ .

*Примечание* (интересная диалектика). Отрезок  $[a; b]$  – непрерывный объект; его дробление на элементарные части  $[x_{k-1}; x_k]$  позволяет приближенно выразить массу  $[a; b]$  через дискретный объект под названием «интегральная сумма», а от нее с помощью операции предельного перехода мы опять возвращаемся к непрерывному объекту: интегралу  $\int_a^b \rho(x)dx$ .

### Заключительные замечания

Таким образом, сформулируем следующие выводы:

1. Системный подход в математике – это аксиоматическое построение теории. Чтобы охарактеризовать понятие «вектор», сначала даем определение векторного (линейного) пространства, а затем формируем, что каждый элемент этого пространства и есть вектор. Аналогично поступаем, если хотим дать корректное определение комплексного числа, а именно: с помощью системы аксиом определяем множество объектов и операций над ними, а потом выводим, что каждый элемент этого множества и есть комплексное число.
2. Этапы математического моделирования приведены в [2, с. 342–343].
3. Численные методы дают огромное количество ситуаций перехода от непрерывных объектов к дискретным (метод сеток, метод конечных элементов и т. д.).

4. Любая техническая система – ответ на некоторую человеческую потребность (см. историю колеса).

5. Прорывом в теории изобретения технических систем был ТРИЗ (автор Г. С. Альтшуллер, 1948 г. и др.). Его современное ответвление представил Д. Бойд в [5].

#### Литература

1. Великович, Л. Л. Физика и математика в техническом университете: проблемы взаимодействия и применения в процессе преподавания // Физическое образование: современное состояние и перспективы : материалы Республ. науч.-метод. семинара, посвящ. 65-летию физ.-мат. фак. МГУ им. А. А. Кулешова, Могилев, 16 окт. 2014 г. – С. 9–12.
2. Великович, Л. Л. О некоторых аспектах математического моделирования сложных систем / Л. Л. Великович // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 341–343.
3. Иванов, И. Е. Методы подобия физических процессов : учеб. пособие / И. Е. Иванов, В. Е. Ерещенко. – М. : МАДИ, 2015. – 144 с.
4. Кричлоу, Генри Б. Современная разработка нефтяных месторождений – проблемы моделирования : пер. с англ. / Генри Б. Кричлоу. – М. : Недра, 1979. – 303 с.
5. Бойд, Д. Творчество в рамках / Д. Бойд, Д. Голденберг : пер. с англ. И. В. Гродель. – Минск : Попурри, 2014. – 336 с. : ил.

УДК 539.12

### ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ИНТЕГРАЛОВ МЕЛЛИНА–БАРНСА НА ОСНОВЕ КОНТУРОВ СТАЦИОНАРНОЙ ФАЗЫ

**В. И. Лашкевич, О. П. Соловцова**

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

Интегралы Меллина–Барнса (МБ) [1] – семейство интегралов в комплексной плоскости, подынтегральное выражение которых определяется произведением гамма-функций, широко используются в физике и технике (см., например, работу [2]), и в последние годы достигнут значительный прогресс в численных оценках этих интегралов [3], [4]. Отметим, что в литературе обсуждается расчет интегралов МБ с точностью до  $10^{-12}$  и выше и высокая точность востребована также в математической физике и экспериментальной математике. На первый взгляд, наилучшая эффективность при численной оценке интегралов МБ достигается на контуре стационарной фазы, где осцилляции подынтегральной функции отсутствуют. Однако решение соответствующего дифференциального уравнения для контура стационарной фазы и его последующее применение при численном интегрировании могут потребовать больших компьютерных затрат и даже вообще быть невыполнены. Первая попытка построить эффективную аппроксимацию для контура стационарной фазы с использованием разложения подынтегральной функции в ряд в окрестности седловой точки была сделана Косовером [5] применительно к вычислениям партонных функций распределений (соответствующий контур далее обозначается как  $C_K$ ).

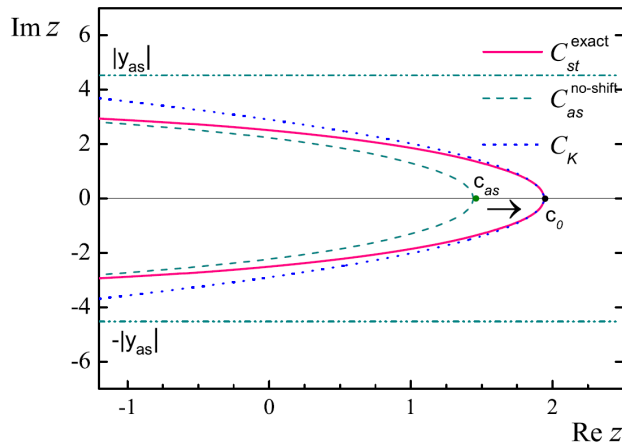


Рис. 1. Эффективные контуры для интеграла (1): сплошная линия – контур стационарной фазы, пунктирная линия – асимптотический контур без сдвижки; линия из точек – контур Косовера, штрих-пунктирные горизонтальные прямые – асимптотический предел контура стационарной фазы на бесконечности

В настоящей работе представлены теоретические основы построения асимптотического контура стационарной фазы  $C_{as}$ , который позволяет эффективно и с высокой точностью вычислять интегралы МБ в случае ограниченного асимптотического поведения контура стационарной фазы на бесконечности. Идея построения  $C_{as}$  демонстрируется на точно решаемом примере, в случае, если функция имеет  $F(s) = s^a$ , тогда ее мелиновские моменты равны:

$$M(z) = \int_0^1 ds s^{z-1} F(s) = \frac{\Gamma(a+z)}{\Gamma(a+1+z)}. \quad (1)$$

На рис. 1 демонстрируется форма рассматриваемых эффективных контуров. Из этого рисунка видно, что  $C_{as}$  после сдвига в седловую точку  $c_0$  совпадает с точным контуром стационарной фазы.

Следует отметить, что восстановление с помощью обратного преобразования Меллина структурной функции  $F_3$ , записанной в обычно используемом виде

$$x_B F_3(x_B, Q_0^2) = A x_B^a (1 - x_B)^\beta (1 + \gamma x_B),$$

полностью аналогично рассмотренному выше простейшему примеру. Численные оценки при восстановлении структурной функции  $F_3$ , включая с учетом  $Q^2$  – эволюции мелиновских моментов, можно найти в работе [4]. Предложенный метод интегрирования по контуру  $C_{as}$  позволит в существенно ускорить обработку экспериментальных данных по ГНР и достигать высоких точностей расчетов.

Следующий рассмотренный пример демонстрирует возможности применения контура  $C_{as}$  для интегралов МБ, возникающих в массивных диаграммах Фейнмана в квантовой теории поля. Для этого рассмотрим интеграл в евклидовой области  $-s > 0$ :

$$I_l(s) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\delta-i\infty}^{\delta+i\infty} dz (-s)^{-z} \frac{\Gamma^3(-z)\Gamma(1+z)}{\Gamma(-2z)\Gamma(1-z)\Gamma(2+z)}. \quad (2)$$

Следуя предлагаемому нами методу построения контура  $C_{as}$ , получаем:

$$z_{as}^{(l)} = \text{yctg} \left\{ \frac{2}{5} \left( [-\ln(-s) + \ln 4]y + \frac{3}{2} \pi \text{sign}(y) \right) \right\} + c_0 + iy.$$

Отметим, что в зависимости от величины параметра  $-s$  контур  $C_{as}$  замыкается в левой или правой полуплоскости и асимптотика контура стационарной фазы ограничена двумя параллельными оси абсцисс прямыми, определяемыми выражениями:

$$y_{as}^{(l)} = \pm \frac{\pi}{-\ln(-s) + \ln 4}; \quad 0 < -s < 4; \quad \text{Re } z \rightarrow -\infty;$$

$$y_{as}^{(l)} = \pm \frac{3}{2} \frac{\pi}{|-\ln(-s) + \ln 4|}; \quad -s > 4; \quad \text{Re } z \rightarrow \infty.$$

Расчеты показали, что если число  $N$  слагаемых в квадратурной формуле невелико, то контур  $C_K$  оказывается эффективнее, чем контур  $C_{as}$ . Однако, начиная примерно с  $N > 16$ , результат использования асимптотического контура оказывается более точным, как в области  $0 < -s < 4$ , так и в области  $-s > 4$ . Этот результат согласуется с тем, что с увеличением требуемой точности интегрирования увеличивается область интегрирования и контур  $C_{as}$  приближается к точному контуру  $C_{st}$ , тогда как контур  $C_K$  удаляется.

Следующий пример демонстрирует, что на практике могут встретиться интегралы МБ, для которых структура контуров стационарной фазы может оказаться чрезвычайно сложной, затрудняющей интегрирование по точным контурам. Рассмотрим такого типа интеграл:

$$I_{II}(s) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\delta-i\infty}^{\delta+i\infty} dz (-s)^z \frac{\Gamma^4(-z)\Gamma(1+2z)}{\Gamma^2(-2z)\Gamma^2(1+z)}. \quad (3)$$

Структура контуров стационарной фазы для интеграла  $I_{II}(s)$  как в области  $0 < -s < 4^3$  (рис. 2, а), так и в области  $-s > 4^3$  показана на рисунке (рис. 2, б). Асимптотики контура стационарной фазы изображены в виде горизонтальных прямых. Как видно из рис. 2, контур  $C_K$  не воспроизводит асимптотическое поведение контура стационарной фазы, а в случае  $-s > 4^3$  этот контур направлен в сторону, противоположную направлению асимптотического контура, что не позволяет провести интегрирование по  $C_K$  с высокой точностью.



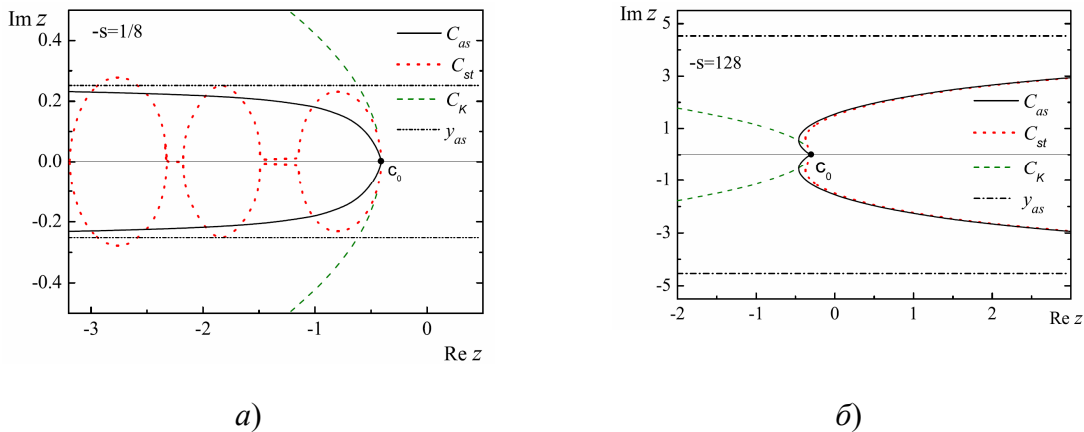


Рис. 2. Эффективные контура для интеграла (3):  
 а – в области  $0 < -s < 4^3$ ; б – в области  $-s > 4^3$ . Сплошной линии соответствует асимптотический контур, пунктирной линии – контур Косовера; точками обозначен контур стационарной фазы; горизонтальные прямые – асимптотический предел контура стационарной фазы на бесконечности

Таким образом, в результате исследований был найден новый метод построения эффективного контура интегрирования при проведении расчетов одномерных интегралов Меллина–Барнса. Новый контур строится как приближение контура стационарной фазы в случае его ограниченного асимптотического поведения в пределе  $\text{Re}(z)$ , стремящемся к бесконечности. Основываясь на рассмотренных примерах, установлено, что сдвиг асимптотического контура параллельно реальной оси в седловую точку улучшает точность интегрирования. Построение асимптотического контура намного проще, чем построение других эффективных контуров, в частности, не требуется вычислять производные высших порядков, как например, для контура Косовера, кроме того, для достижения высокой точности достаточно небольшого числа полиномов в квадратурной формуле. Несомненно, что применение асимптотического контура при проведении интенсивных вычислений, связанных с обработкой экспериментальных данных, например, при нахождении параметров формы структурных функций, функций фрагментаций и распределений кварков и глюонов в нуклоне, окажется намного эффективнее, чем использование обычных прямолинейных контуров интегрирования. Показано, что асимптотический контур позволяет эффективно вычислять интегралы МБ даже при сложной форме контуров стационарной фазы.

Литература

1. Bateman, H. Higher transcendental functions / H. Bateman, A. Erdelyi. – New York : McGraw-Hill, 1953. – Vol. 1. – 345 p.
2. Fikiori, G. Integral evaluation using the Mellin transform and generalized hypergeometric functions: Tutorial and applications to antenna problems / G. Fikiori // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2006. – Vol. 54. – P. 3895–3907.
3. Gluza, J. Efficient evaluation of massive Mellin-Barnes integrals / J. Gluza, T. Jelinski, D. A. Kosower // Phys. Rev. D. – 2017. – Vol. 95. – Article ID: 076016.
4. Sidorov, A.V. Asymptotics of the contour of the stationary phase and efficient evaluation of the Mellin-Barnes integral for the  $F_3$  structure function / A. V. Sidorov, V. I. Lashkevich, O. P. Solovtsova // Phys. Rev. D. – 2018. – Vol. 97. – Article ID: 076009.
5. Kosower, D. A. Evolution of parton distributions / D. A. Kosower // Nucl. Phys. B. – 1997. – Vol. 506. – P. 439–467.

УДК 548.232.4

## ГРАДИЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО РАСПЛАВА НИКЕЛЯ

И. А. Концевой, В. А. Климович

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

Процессы высокоскоростной кристаллизации глубоко переохлажденного расплава служат основой перспективных способов получения материалов с новыми функциональными свойствами. В настоящее время в экспериментальных условиях достигнуты скорости роста 20–70 м/с при глубине переохлаждения расплава до 300 К. В данной работе рассматривается рост кристалла из однокомпонентного переохлажденного расплава с позиций теории локально-неравновесного теплопереноса. В общей постановке трехмерная нестационарная задача очень сложна. Здесь мы применяем более простой (полуобратный) подход к проблеме, позволяющий выяснить многие существенные детали процесса формирования теплового поля на поверхности роста кристалла, а именно: рассматриваем фазовую границу стационарной геометрической формы, перемещающуюся с постоянной скоростью. Этот случай характерен для стадии установившегося во времени режима роста. Данная работа продолжает исследования [1]–[2] и имеет целью изучение градиентных свойств теплового поля на линии роста при кристаллизации переохлажденного расплава никеля.

Релаксационная модель Максвелла переноса тепла в неподвижной среде состоит из уравнения для теплового потока и уравнения баланса энергии:

$$\mathbf{q} + \gamma \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = -\lambda \text{grad} T, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div} \mathbf{q} = q_v, \quad du(T)/dT = c,$$

где  $T$  – температура;  $\mathbf{q}(q_1, q_2, q_3)$  – вектор удельного теплового потока;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – объемная теплоемкость;  $\gamma$  – время релаксации теплового потока;  $q_v$  – мощность внутренних источников энергии;  $u$  – плотность энергии. В трехмерном пространстве  $(x, y, z)$  фазовую границу (ФГ) кристаллизации моделируем поверхностью сильного разрыва теплового поля. На поверхности сильного разрыва  $f(x, y, z, t) = 0$  условия динамической совместности получаем обычным образом:

$$N(u_j - u_*) - Q = (\mathbf{q} \cdot \mathbf{n})_j - (\mathbf{q} \cdot \mathbf{n})_*, \quad (\mathbf{q} \cdot \mathbf{s})_j = (\mathbf{q} \cdot \mathbf{s})_*, \quad (\mathbf{q} \cdot \mathbf{b})_j = (\mathbf{q} \cdot \mathbf{b})_*; \quad (1)$$

$$N = -\frac{\partial f / \partial t}{|\text{grad} f|}, \quad Q = L \left( N + \gamma_j \frac{dN}{dt} \right),$$

где (1) – баланс энергии на ФГ и условия непрерывности касательных и бинормальных к ФГ компонент вектора теплового потока;  $L$  – теплота фазового перехода единицы объема вещества;  $\mathbf{N} = N\mathbf{n}$  – скорость перемещения ФГ. Звездочкой отмечены параметры расплава; индекс  $j$  указывает, что значение функции определено на правой стороне разрыва, в твердой фазе. Подробности вывода и обсуждение соотноше-

ний (1) даны в [1]. Отметим, что при записи формул (1) используется ортогональный базис  $s$ ,  $n$ ,  $b$ , соответствующий касательной, главной нормали и бинормали к поверхности ФГ. В работах [1], [2] получены в явном виде выражения нормальных производных  $\partial T / \partial n$ ,  $\partial q_n / \partial n$ ,  $\partial q_s / \partial n$ . Здесь эти формулы не приводятся.

Обсудим результаты расчетов кристаллизации никеля (рис. 1).

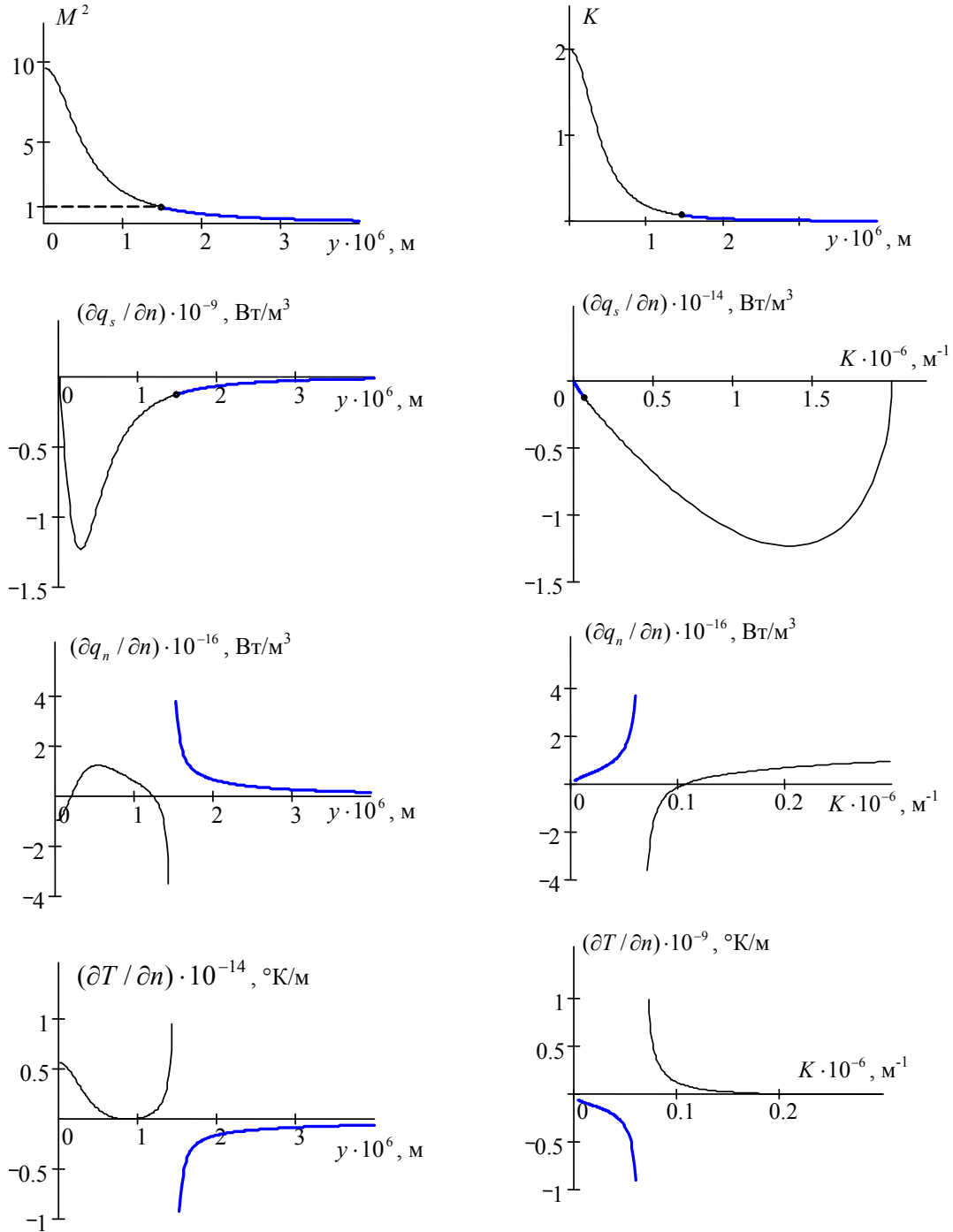


Рис. 1. Структура пространственной неоднородности теплового потока в конечной окрестности вершины дендрита

Были приняты следующие значения теплофизических параметров:

$$T_c = 1728 \text{ К}; T_* = 1562 \text{ К}; L = 2,14 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3; U = 1,81 \text{ Дж/м}^2;$$

$$c = 5,62 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}; \lambda = 69 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \gamma = 1,38 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

Построены зависимости от  $y$  следующих величин: квадрат теплового числа Маха  $M^2 = N^2 / w_j^2$ ,  $w_j^2 = \lambda_j / (c_j \gamma_j)$ ; кривизна  $K$ . Градиентные свойства температуры и теплового потока представлены зависимостями от координаты  $y$  нормальных производных от температуры  $\partial T / \partial n$ , нормальной  $\partial q_n / \partial n$  и касательной  $\partial q_s / \partial n$  компонент теплового потока. Важное значение имеет характер зависимости перенесенных функций от кривизны  $K$ .

В ходе расчетов обнаружено существование «звуковой точки»  $M^2 = 1$  (рис. 1), т. е. для кристаллизации переохлажденного расплава никеля характерны дозвуковой и сверхзвуковой процессы. Анализируя рис. 1, видим, что при переходе через «звуковую точку» наблюдается разрыв нормальных производных от нормальной составляющей вектора теплового потока и от температуры. Части графиков, выделенные жирными линиями, соответствуют дозвуковому режиму, а тонкими линиями – сверхзвуковому режиму.

*Работа выполнена в рамках государственной программы «Энергетические системы, процессы и технологии 2.84». Научный руководитель проекта профессор О. Н. Шабловский.*

#### Литература

1. Шабловский, О. Н. Тепловая градиентная катастрофа и рост двумерного свободного дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2007. – № 3. – С. 29–37.
2. Шабловский, О. Н. Локально-неравновесные свойства фазовой границы высокоскоростной кристаллизации переохлажденного расплава. Ч. 1. Трансзвуковой переход на линии роста / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль, И. А. Концевой // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2017. – № 2. – С. 71–79.

УДК 532.516

## ПРОИЗВОДСТВО ЭНТРОПИИ В ПОТОКЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Д. Г. Кроль, С. В. Стельмашонок

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

В плоском случае стационарные течения несжимаемой сплошной среды определяются уравнениями [1]:

$$\rho v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} + \rho F_i, \quad \frac{\partial v_k}{\partial x_k} = 0; \quad (1)$$

$$\rho c_p v_k \frac{\partial T}{\partial x_k} = -\frac{\partial q_k}{\partial x_k} + \Phi + q_v, \quad q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}; \quad (2)$$

$$v = \mu / \rho \quad i, k = 1, 2; \quad \rho, c_p, \lambda, \mu - \text{const.}$$

Реологическое уравнение состояния вязкоупругой жидкости Максвелла возьмем в следующей форме записи:

$$\tau_{ij} + \gamma \left[ v_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + m(\tau_{ik} \omega_{kj} - \omega_{ik} \tau_{kj}) \right] = 2\mu e_{ij}; \quad (3)$$

$$2e_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}, \quad 2\omega_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i},$$

где  $x_1 = x, x_2 = y$  – декартовы прямоугольные координаты;  $\mathbf{v}(v_1, v_2)$  – вектор скорости;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $\mathbf{q}(q_1, q_2)$  – вектор удельного теплового потока;  $c_p$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $q_v$  – объемная мощность внутренних источников энергии;  $\tau_{ij}$  – компоненты девиатора тензора напряжений;  $e_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформации;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\gamma$  – время релаксации вязких напряжений;  $\Phi$  – диссипативная функция. Дважды повторяющийся индекс  $k$  означает суммирование. При  $\gamma = 0$  формула (3) описывает свойства вязкой ньютоновской жидкости.

Производство энтропии подсчитываем по формулам [1], [3]:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_i, \quad \sigma_e = q_v / T, \quad \sigma_i = \mathbf{q}^2 / (\lambda T^2),$$

где  $\sigma_e$  – производство энтропии за счет энергообмена с внешней средой;  $\sigma_i$  – производство энтропии за счет внутренних необратимых процессов.

Внешняя сила трения Релея  $\mathbf{F}(F_1, F_2) = -\zeta \mathbf{v}$  дает возможность моделировать широкий круг термогидродинамических явлений, представляющих практический интерес: периодические течения – в тонких слоях жидкости, вихревые структуры – в задачах промышленной экологии и прикладной геофизики – вектор массовой силы. Для диссипативной функции  $\Phi$  принимаем оценку  $\Phi \ll |q_v|$ , т. е. рассматриваем процессы, для которых можно пренебречь выделением тепла за счет вязкой диссипации энергии.

Полагаем, что коэффициент сопротивления зависит от температуры  $T$ , монотонно растет при увеличении  $|\mathbf{v}|$  и является четной функцией скорости:

$$\zeta = \zeta(\mathbf{v}^2, T), \quad \partial \zeta / \partial (\mathbf{v}^2) > 0.$$

Цель данной работы – изучить неизотермические свойства производства энтропии в потоке вязкой жидкости.

Изучается течение вида

$$v_1 \equiv u = u(y), \quad v_2 \equiv 0, \quad p = p(y), \quad T = T(y). \quad (4)$$

Вихрь скорости  $\omega = (1/2) \text{rot } \mathbf{v}$  имеет одну нетривиальную составляющую  $\omega_z \equiv \omega = (-1/2)(du/dy)$ , направленную перпендикулярно плоскости  $(x, y)$ . Обозна-

чим  $\tau = (c_1/u_1)(T - T_0)$ ,  $T_0 \equiv \text{const}$ . Здесь  $T_0$  – отсчетное значение температуры;  $c_1$  – произвольная положительная постоянная, имеющая размерность удельной теплоемкости, Дж/(кг · град);  $y_1, u_1$  – положительные константы, имеющие размерности длины и скорости соответственно; линейный масштаб релаксации равен  $L_1 = \gamma u_1$ . Безразмерные величины будем отмечать чертой сверху. Для коэффициента сопротивления и для объемного источника энергии возьмем следующие физически содержательные зависимости:

$$\bar{\zeta} \equiv \zeta y_1^2 / \nu = D_1 D_2, \quad D_1 = (1 - 4\Gamma)/(1 + 4\Gamma)^2; \quad (5)$$

$$\bar{q}_v \equiv q_v c_1 y_1^2 / (\lambda u_1^2) = 2\bar{\tau}(\bar{\tau}^2 - 3\bar{u}^2 - 1) = 4\bar{\tau}(-3\bar{\tau}_1 \bar{\tau} + 2\bar{\tau}^2 + 1), \quad \Gamma = (\bar{\gamma} m \bar{\omega})^2; \quad (6)$$

$$\bar{\gamma} = \gamma u_1 / y_1, \quad \bar{\omega} = \omega y_1 / u_1, \quad d\bar{u} / d\bar{y} = -2\bar{\omega}.$$

Функция  $\Gamma(\bar{y})$  характеризует неравновесные свойства вихревого поля. В классе движений (4)–(6) имеют согласно [2], [3] точное решение:

$$\bar{u} \equiv u/u_1 = 2\varepsilon[\sin(2\bar{y})]/\delta, \quad \bar{\tau} \equiv \tau/u_1 = (1 - \varepsilon^2)/\delta; \quad (9)$$

$$\delta = 1 + \varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos(2\bar{y}), \quad \bar{y} = y/y_1, \quad y_1 > 0, \quad u_1 > 0.$$

Ясно, что  $\delta > 0$  при  $\varepsilon^2 \neq 1$ ;  $\varepsilon$  – параметр решения, который определяет отклонение температуры жидкости от равновесного значения  $\tau = 0$ . Если  $\varepsilon^2 < 1$ , то  $\tau > 0$ , течение происходит в «горячей» области,  $T > T_0$ . Если  $\varepsilon^2 > 1$ , то  $\tau < 0$ , имеем «холодную» область,  $0 < T < T_0$ . Рассмотрим линии нулевой завихренности  $\omega = 0$ :

$$2y/y_1 = 2\pi n_0 \pm \arccos[-2\varepsilon/(1 + \varepsilon^2)]; \quad (10)$$

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_1, \quad (\bar{u}^2)_{\max} = 4\varepsilon^2/(1 - \varepsilon^2)^2.$$

Обсудим энтропийные свойства линий (10). В обеих температурных областях  $d(q^2)/d[(\bar{u}^2)_{\max}] > 0$ . В холодной области на этих линиях  $q_v > 0$ ,  $\sigma > 0$ , а функция  $\sigma(u_{11})$ ,  $u_{11} = u_1^2/(c_1 T_0)$  не имеет экстремума. В горячей области в ходе производства энтропии преобладает сток энергии ( $q_v < 0$ ,  $\sigma < 0$ ), а функция  $\sigma(u_{11})$  имеет минимум при  $u_{11} = 1/\bar{\tau}_1$ . Согласно (10), на линиях  $\omega = 0$  модуль теплового потока постоянен, а знак изменяется и совпадает со знаком выражения  $(-\bar{u}\bar{\tau}_1)$ . Зафиксируем  $q_1^2$  и изучим поведение функции  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(f^2)$ , где  $\bar{\sigma} = \sigma \lambda T_0^2 / q_1^2$ ,  $f^2 = 4(\lambda T_0)^2 / (y_1^2 q_1^2)$ ,  $(\bar{\tau}_1^2 - 1)\bar{\tau}_1^2 = 1/(u_{11}^2 f^2)$ ,  $(\bar{u}^2)_{\max} + 1 = \bar{\tau}_1^2$ ;  $f$  – безразмерная частота колебаний по координате  $y$ . Анализ показал, что в горячей области  $d\bar{\sigma}/d(f^2) < 0$ ,  $\bar{\sigma} < 0$ , экстремум отсутствует. В холодной области функция  $\bar{\sigma}(f^2) > 0$  имеет минимум при  $1 + 3\bar{\tau}_1 u_{11} = 0$ , что соответствует частоте  $f = 3/(\bar{\tau}_1^2 - 1)^{1/2}$ . На рис. 1 представлены некоторые результаты численного расчета производства энтропии.

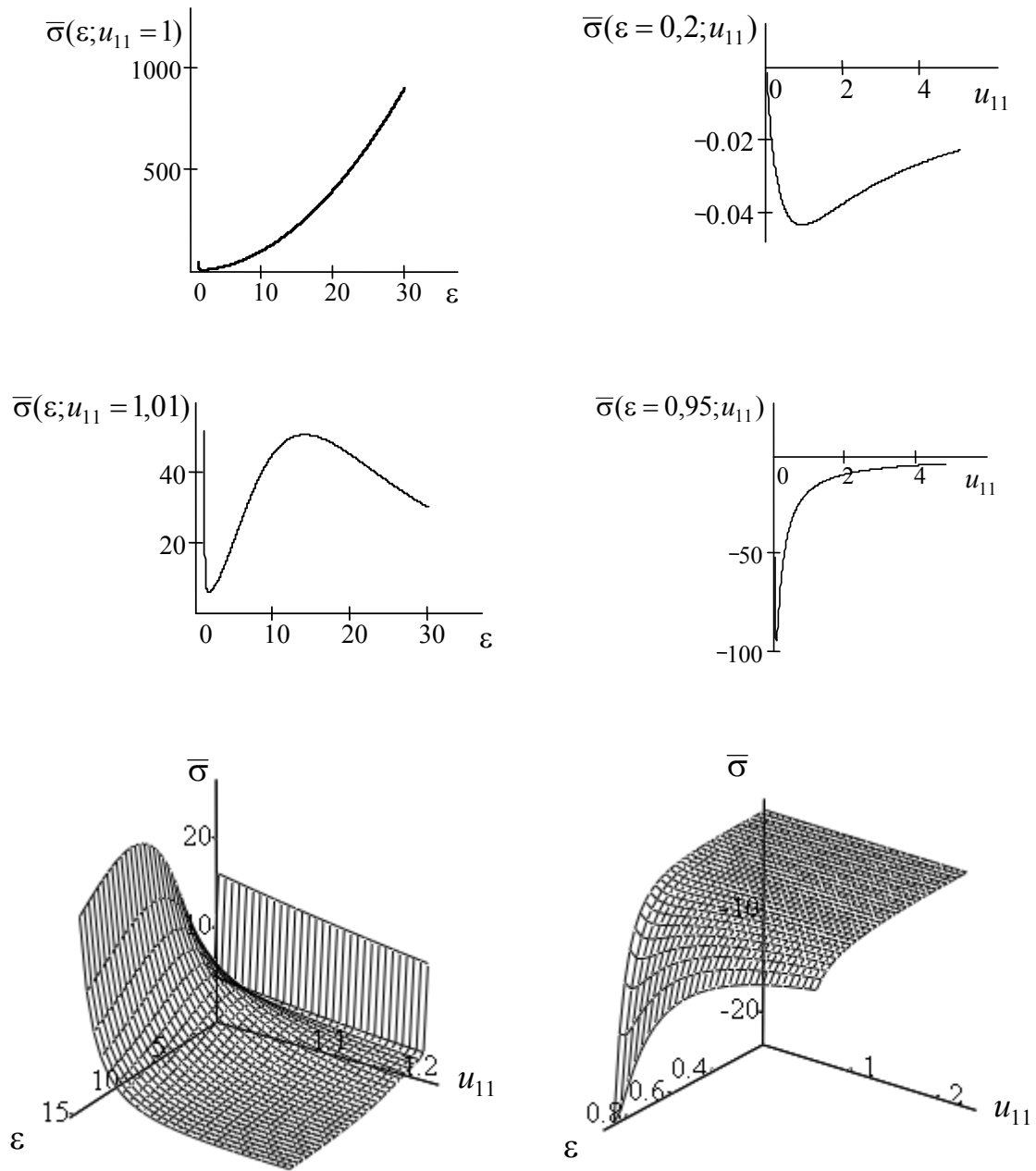


Рис. 1. Параметрические свойства производства энтропии:  
 левый столбец – «холодная» область; правый столбец – «горячая» область

Данная работа выполнена в рамках государственной программы «Энергетические системы, процессы и технологии 2.84». Научный руководитель проекта профессор О. Н. Шабловский.

Литература

1. Седов, Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1973. – Т. 1. – 536 с.

2. Шабловский, О. Н. Тригонометрический профиль скорости сдвигового течения вязкой жидкости / О. Н. Шабловский // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. «Математика. Механика. Физика». – № 32 (249). – Вып. 5. – С. 77–82.
3. Шабловский, О. Н. Вихрь скорости и производство энтропии в релаксирующем потоке вязкой жидкости с внутренними источниками / О. Н. Шабловский // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2011. – № 5. – С. 55–65.

УДК 621.762

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ, БЛАГОПРИЯТНО ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПРОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОКРЫТИЯ И ОСНОВЫ В ПРОЦЕССЕ СОВМЕСТНОЙ ВЫТЯЖКИ

М. И. Лискович, Д. А. Максименко

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

Напряженное состояние в очаге деформации является определяющим фактором, от которого зависит прочность соединения покрытия с основой и эксплуатационные характеристики изделий.

Исходя из этого следует определить зависимости:

- 1) контактных напряжений на границе между материалом покрытия и основой от степени деформации порошка;
- 2) напряжений в материале основы от степени деформации основы и степени деформации порошка;
- 3) величины усилия совместной вытяжки от основных параметров процесса.

При этом нормальные и касательные напряжения на границе между материалом покрытия и основой, а также между пуансоном и материалом покрытия вместе с величиной степени деформации порошка определяют конечную относительную пористость покрытия, прочность соединения покрытия с основой и основные физико-механические характеристики, а также эксплуатационные свойства покрытия.

Величины напряжений в материале основы определяют предельную степень деформации основы и требуемое количество переходов, а величина усилия совместной деформации – подбор оборудования, энергетические затраты и силовой расчет инструмента.

Рассмотрим схему процесса совместной вытяжки металлической заготовки 2 и порошка 3 с помощью матрицы 1 и пуансона 4 (рис. 1). Для анализа напряженного состояния материала порошка выделим в очаге деформации бесконечно малый элемент (рис. 2) высотой  $d_z$  и толщиной  $h_z$ , средний диаметр которого  $D_z$ , и обозначим действующие напряжения:  $p$  – нормальные контактные напряжения на границе между основой и порошком и на границе между пуансоном и порошком;  $\tau_0$  и  $\tau_n$  – касательные контактные напряжения на границах «основа – порошок» и «пуансон – порошок»;  $\sigma_z$  и  $\sigma_z + d\sigma_z$  – нормальные напряжения в выделенных сечениях элемента (см. рис. 2).

Расчет напряжений  $p$  и  $\tau_0$  будем производить, решая совместно дифференциальное уравнение условия равновесия выделенного элемента и уравнение условия пластичности.

Теория процесса осесимметричной вытяжки листового металла разработана в достаточной степени. Наиболее обстоятельно напряженное состояние при листовой вытяжке в различных участках очага деформации изучено Е. А. Поповым [1], [2].



Это позволяет использовать методику и расчетные зависимости, полученные указанным автором для описания процесса вытяжки металлической листовой основы, дополняя и видоизменяя их, если это будет необходимо, таким образом, чтобы сделать возможным учет влияния процесса деформации порошкового материала на процесс деформации основы.

Разделим очаг деформации основы на три участка, так же как это сделано в [1] (см. рис. 1): «А» – участок перехода цилиндрической части заготовки основы в коническую; «Б» – участок конической части; «В» – участок перехода конической части в цилиндрическую часть изделия.

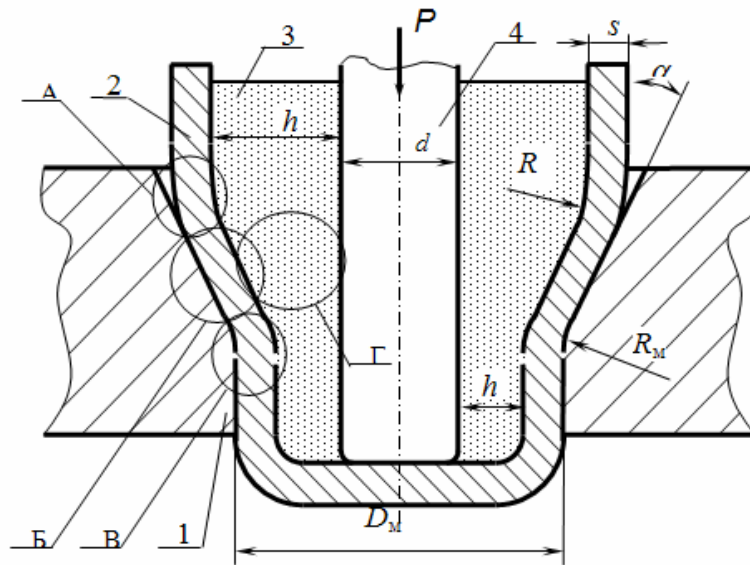


Рис. 1. Схема процесса совместной вытяжки покрытия и основы:  
1 – матрица; 2 – металлическая основа; 3 – порошковый состав; 4 – пуансон

На участке «А» воздействием порошкового материала пренебрегаем, анализируя только процесс пластического изгиба при переходе цилиндрической части заготовки основы в коническую. На участке «Б» будем рассматривать процесс свертывания полой основы на конической матрице с дополнительным давлением на основу со стороны порошкового материала, на участке «В» – процесс пластического изгиба при переходе конической части основы в цилиндрическую часть изделия.

Усилие совместной вытяжки будем определять в следующем виде:

$$P = \sigma_{pMAX} \pi(D_M - s)s + P_{TP},$$

где первое слагаемое учитывает величину усилия, необходимого для вытяжки основы с учетом влияния давления и сил трения со стороны порошка;  $\sigma_{pMAX}$  – максимальное растягивающее напряжение, действующее в материале основы в осевом направлении в месте окончания участка «В», которое будем определять последовательным расчетом напряжений в основе, начиная с участка «А» и заканчивая участком «В»;  $D_M$  – диаметр цилиндрического отверстия в матрице;  $s$  – толщина материала основы;  $P_{TP}$  – усилие, затрачиваемое на трение порошка по пуансону.

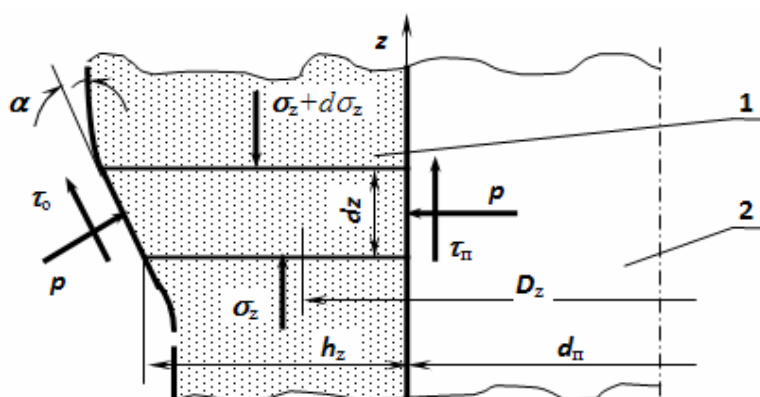


Рис. 2. Схема выделенного элемента материала порошка:  
1 – порошковый состав; 2 – пуансон

Используя принцип подхода и терминологию, применяемую А. В. Степаненко и Л. А. Исаевичем [3], был исследован процесс совместной вытяжки металлической основы и порошкового покрытия

Так как на участке «А» (см. рис. 2) перехода цилиндрической части заготовки металлической основы в коническую воздействием порошкового материала на процесс деформирования основы можно пренебречь, то для определения радиальных напряжений на этом участке  $\sigma_r$  использовались расчетные зависимости, приведенные в [1, с. 376].

Величину дополнительного усилия  $P_{\text{ТР}}$ , которое нужно приложить со стороны пуансона, чтобы преодолеть силы трения порошка по пуансону, можно представить следующим образом:

$$P_{\text{ТР}} = \frac{\pi f_{\text{П}} d_{\text{П}}}{\sin \alpha} \int_{h_{\text{Н}}}^{h_{\text{П}}} p dh_z, \quad (2.35)$$

где  $d_{\text{П}}$  – диаметр пуансона.

Полученные расчетные зависимости для определения нормальных и касательных напряжений на границе материала покрытия и основы позволяют выявить факторы, влияющие на величину этих напряжений, определить расчетные зависимости для нахождения величины растягивающего напряжения в материале основы, а также усилия совместной вытяжки.

#### Литература

1. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / Е. А. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1971. – 424 с.
2. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.
3. Степаненко, А. В. Непрерывное формирование металлических порошков и гранул / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич. – Минск : Наука и техника, 1980. – 256 с.

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

УДК 339.138: 004.8

### ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА CRM-МАРКЕТИНГ

**О. В. Лапицкая, А. В. Шах**

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

Основу любого бизнеса составляют клиенты. Для современного предприятия важно правильно выстроить систему взаимоотношений с клиентами. Привлеченный и удовлетворенный качеством услуг клиент принесет компании дополнительную прибыль и популярность. Именно поэтому современные предприятия при принятии управленческих решений активно применяют системы класса CRM.

Определение или аббревиатура CRM расшифровывается как Customer Relationship Management, т. е. «управление отношениями с клиентами». CRM при помощи автоматизации процессов помогает эффективнее выстраивать диалог с покупателем, не допускать ошибок в работе и в итоге продавать больше. CRM-система представляет собой набор программных модулей и приложений, позволяющих автоматизировать сбор информации об отношениях с клиентами. Далее на основе полученной информации менеджеры предприятий принимают управленческие решения относительно повышения качества производимых товаров и предоставляемых услуг.

С наилучшими результатами CRM-маркетинг показывает себя в следующих отраслях:

- автопроизводители: высокая стоимость покупки, высокая вовлеченность в процесс выбора товаров, клиенты легко обмениваются информацией;
- FMCG (или товары повседневного спроса): много потребителей, высокая активность брендов с точками контакта с целевой аудиторией, вовлеченная аудитория;
- ритейл: уникальной ценности информация, высокая вовлеченность аудитории и отличный отклик на мотивацию, например, на мероприятия;
- e-commerce: высокая вовлеченность информации и дополнительные возможности по сбору данных;
- продажа алкогольной и табачной продукции: практически единственный канал коммуникации с потребителями, высокий «share of wallet» (доля кошелька покупателя);
- финансы и страхование: большой объем аудитории и информация о структуре потребления, на основе которой можно делать прогноз;
- туризм: продукция дает возможность делать CRM-коммуникации привлекательными для клиентов;
- телекоммуникации: частота обновления данных гораздо выше, чем в других областях, что дает безграничные возможности для аналитики) [1].

При помощи CRM-системы получается более эффективный диалог с покупателем, исключаются типичные ошибки, связанные с человеческим фактором. В итоге количество успешных сделок растет, эффективность работы менеджеров повышается, прибыль компании увеличивается.

Если пользователь заинтересовался продукцией или услугой компании, перешел по ссылке на сайт фирмы или совершил звонок, его данные направляются в базу

данных CRM и сохраняются. Также автоматически составляется список операций, т. е. записывается время звонков, текст сообщений и совершенные покупки.

Помимо основных задач – ведения клиентской базы, управления продажами и автоматизации бизнес-процессов в CRM-системе можно:

- прослушивать звонки;
- смотреть историю покупок;
- создавать шаблоны документов;
- записывать клиентов на предоставление услуг;
- отмечать особенности и интересы клиента;
- управлять проектами, задачами;
- вести учет сделок и заявок;
- анализировать состоявшиеся сделки;
- отправлять смс-сообщения, e-mail и создавать задачи.

Когда клиент звонит, данные о нем отображаются и доступны каждому менеджеру. В программе могут быть представлены наглядные онлайн-отчеты, калькуляция и т. п. [2].

Известно, что информационные технологии для CRM развивались чуть ли не со времени появления самих компьютеров. Однако вплоть до 1990-х гг. они решали проблемы в продажах, маркетинге и поддержке в довольно изолированных отделах. Компании не получали никакой выгоды от их возможного сотрудничества, и только к концу XX в. «Siebel», «SAP», «Salesforce» и другие «пионеры» CRM смогли изменить прежние подходы и продемонстрировали преимущества объединенной, коллаборативной системы.

Следующее большое технологическое продвижение произошло в середине 2000-х гг., когда разработчики CRM-систем во главе с компанией «Salesforce» обратились к модели «Программное обеспечение как обслуживание» (Software-as-a-Service, (SaaS)).

Сейчас очень интенсивно идет очередное обновление инструментальных информационных технологий, обеспечивающих процессы управления взаимодействия с потребителями. ИИ-технологии (технологии искусственного интеллекта) развиваются колоссальными темпами и в разных направлениях, ежедневно помогая в решении большого количества задач.

Один из примеров внедрения искусственного интеллекта в CRM-системы – это продажи в интернет-магазинах. Чат-бот с обученной нейросетью анализирует запрос клиента и предыдущий опыт sales-менеджеров, предлагает продавцам наиболее удачные варианты ответов, на основании которых ранее состоялись сделки и проводились оплаты [3]. Сотрудники отдела продаж только выбирают вариант ответа и, если нужно, корректируют его. В некоторых случаях система предлагает сделать звонок, если посчитает, что он необходим по данным статистики, причем звонок она может предложить как менеджеру, так и клиенту [4].

Машинное обучение используется в CRM-системах для автоматизации таких задач, как создание и заполнение карточек клиента из email-сообщений, социальных сетей; голосовой ввод данных в карточку клиента; перевод записей телефонных разговоров в текст; авто-рекомендации по следующему шагу в работе с клиентом; определение вероятности закрытия сделки (приоритетности клиентов); прогнозирование объемов продаж [5].

Понятно, что внедрение лишь одного такого сервиса не произведет «чудес» в реализации маркетинговой стратегии. Необходимо комплексное использование инструментов, среди которых специалисты «Forrester Consulting» выделили наиболее желанные для них:

- 43 % планируют подключить более продвинутую за счет искусственного интеллекта аналитику бизнес-процессов;
- 40 % активно присматриваются к механизмам рекомендаций на основе ИИ;
- 37 % интересуются машинным обучением и его влиянием на автоматизацию маркетинга через более прогрессивную механику определения паттернов поведения;
- 35 % высоко оценивают потенциал ИИ в аналитике потребительского поведения;
- 30 % хотят имплементировать ИИ для оптимизации email-маркетинга благодаря определению лучшего времени отправки сообщений на основе истории поведения потребителя [6].

Основные инструменты ИИ для маркетологов приведены на рис. 1.



Рис. 1. Основные инструменты искусственного интеллекта для маркетологов

Таким образом, можно сделать вывод о том, что системы управления взаимоотношениями с клиентами являются подходящим инструментом для поддержки принятия маркетинговых решений в современной организации. Системы класса CRM обладают необходимыми инструментами анализа текущего состояния бизнеса, где в качестве индикатора используется система взаимодействия с клиентами. CRM-система позволяет оптимальным образом организовывать управление маркетингом компании: проводить маркетинговые мероприятия, управлять маркетинговыми действиями. Однако в мире маркетинга пока существует очень большой разрыв между тем, какие решения в сфере ИИ есть на рынке сегодня, и степенью готовности маркетологов имплементировать их в свои стратегии [7]. И даже если ИИ не заменит людей во взаимодействии с клиентами в ближайшей перспективе, он существенно повлияет на распорядок дня торговых представителей и, возможно, сократит их количество в компании.

На данный момент самыми большими практическими преимуществами использования ИИ в продажах являются предсказание поведения лидов и эффективное управление взаимоотношениями с большим числом клиентов одновременно.

#### Литература

1. CRM-маркетинг как эффективная модель взаимодействия с клиентами. – Режим доступа: <https://www.optimism.ru/blog/crm-marketing/>. – Дата доступа: 28.09.2020.

2. Что такое CRM? – Режим доступа: [https://www.bitrix24.by/-articles/crm\\_what\\_is.php](https://www.bitrix24.by/-articles/crm_what_is.php). – Дата доступа: 27.09.2020.
3. Шах, А. В. Чат-боты как современный инструмент маркетинга / А. В. Шах, Е. Г. Шапович // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сб. науч. тр. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под ред. В. В. Кириенко. – Гомель, 2019. – С. 200–203.
4. AI в CRM – следующая «большая волна». – Режим доступа: [https://ko.com.ua/ai\\_v\\_crm\\_sleduyushhaya\\_bolshaya\\_volna\\_120957](https://ko.com.ua/ai_v_crm_sleduyushhaya_bolshaya_volna_120957). – Дата доступа: 28.09.2020.
5. Искусственный интеллект для CRM. – Режим доступа: [https://www.liveintellect.ru/tags/ii\\_dlja\\_crm/](https://www.liveintellect.ru/tags/ii_dlja_crm/). – Дата доступа: 23.09.2020.
6. Исследование: что происходит с российским рынком CRM-маркетинга сегодня? – Режим доступа: <https://www.inbrief.ru/blog/36/>. – Дата доступа: 23.09.2020.
7. Шах, А. В. Применение методов искусственного интеллекта в маркетинговой деятельности / А. В. Шах, И. В. Колбаско // Экономика, технологии и право в современном мире : материалы Междунар. науч.-практ. конф. фак. экономики и права и инженер. фак., Барановичи, 20 окт. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т ; редкол. А. В. Никишова (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2017. – С. 135–136.

УДК 339.13

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ НА БЕЛОРУССКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**Е. Н. Карчевская**

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

Электронная торговля является динамично развивающейся отраслью в мировой экономике, поскольку дает возможность потребителям познакомиться с продукцией и услугами, а предприятиям открывает границы освоения новых рынков. Электронная коммерция выступает частью экономической сферы, где проводятся финансовые и торговые транзакции, бизнес-процессы посредством возможностей компьютерных сетей.

В рамках настоящего исследования была изучена степень использования белорусскими предприятиями возможностей электронной коммерции. Акцентировалось внимание на использовании основных бизнес-операций: электронный обмен данными (Electronic Data Interchange (EDI)); электронная торговля (e-trade); электронные деньги (e-cash); электронный маркетинг (e-marketing); электронный банкинг (e-banking).

Для оценки разных сторон применения систем электронной коммерции были выделены соответствующие критерии эффективности, по которым в дальнейшем проводилась оценка, дающая возможность принимать необходимые меры по корректировке, развитию и совершенствованию реализуемой программы. Анализ используемых инструментов электронной коммерции проводился экспертным методом по следующим направлениям: ресурсное, экономическое, организационное, структурное, маркетинговое, каждое из которых, в свою очередь, исследовалось с позиций структурных компонентов – показателей эффективности.

Ресурсные показатели включали такие критерии, как качество визуализации; анализ текстовой информации; активный веб-поиск; использование ссылочного ранжирования; возможность интеграции данных, поступающих с датчиков; смена актуальной информации.

Экономические показатели изучались с позиции оценки экономической эффективности выбранного варианта построения системы электронной коммерции, доходности и прибыльности проводимых операций [4].

Организационные показатели определялись как степень интеграции новой информационной системы с существующей системой, а также с деятельностью предприятия и его бизнес-процессами, стабильность и положительная динамика посещений [4].

Структурные показатели выражали общий принцип медиаданных; наличие структурных элементов на интернет-странице и ее заполняемость.

Под маркетинговыми показателями понимались показатели, характеризующие эффективность проведения маркетинговой программы реализации и продвижения в среде интернета, эффективность использования инструментов web-маркетинга, положительная динамика подписчиков и прекращение взаимодействия, уровень доверия между участниками [4].

Изучая тенденции развития и использования предприятиями интернет-технологий, становится очевидно, что электронная коммерция успешно развивается, проникает в узкие и специализированные сферы деятельности.

В целом следует отметить, что белорусский интернет готов к развитию электронной коммерции. Наблюдаются быстрый рост числа пользователей сети и развитие информационно-коммуникационных технологий, что положительно влияет на количество потенциальных покупателей, использующих для покупок web-технологии.

Количество абонентов и пользователей сетью «Интернет» в стране составляет более 9 млн, в том числе физических лиц – более 8,4 млн человек. Конечно, для оценки возможностей развития электронной коммерции большое значение имеют не только подключение к интернету и техническая оснащенность организаций современными компьютерами, но и наличие у них web-сайта и электронного адреса [1].

В Республике Беларусь пока далеко не все организации используют интернет для представления сведений о себе и своей продукции и услугах, однако их количество постоянно растет.

Организации активно пользуются информационно-коммуникационными технологиями в своей деятельности, что способствует развитию коммерческих отношений между ними в электронной среде. Появление электронных торговых площадок во многом содействовало внедрению и распространению электронной коммерции в Республике Беларусь.

Заметное место среди различных видов экономической деятельности в сети «Интернет» занимает купля-продажа товаров в секторе розничной онлайн-торговли.

На данный момент в Беларуси сложилась ситуация, когда наблюдается дисбаланс в развитии рынка электронной торговли по регионам. В настоящее время больше всего интернет-магазинов работает в г. Минске.

В электронной коммерции недавно появилось новое направление – продажа товаров через социальные сети. Такой вид торговли получил название «социальная коммерция». Реализуется она с помощью следующих торговых площадок: интернет-магазины, web-витрины, социальные сети.

В Республике Беларусь пользователи интернета, совершающие онлайн-покупки, составляют более 20 % [2], [3]. Почти половина всего взрослого населения страны имела хотя бы однократный опыт покупок через интернет. В географической структуре интернет-покупателей наиболее емкая доля представлена жителями г. Минска [2], [3].

Анализ состояния проблем развития электронной коммерции позволил выделить ряд основных способов эффективного продвижения услуг в сети «Интернет»:

- развитие инфраструктуры связи и телекоммуникаций;
- расширение доступа к телекоммуникационной инфраструктуре;
- создание условий для снижения тарифов на подключение и использование информационно-коммуникационных технологий;
- стимулирование разработки онлайн-приложений для бизнеса;
- расширение круга пользователей интернета и информационных технологий в предпринимательской среде;
- повышение образовательного уровня в области информационно-коммуникационных технологий среди граждан;
- популяризация электронного бизнеса в жизненной среде граждан.

#### Л и т е р а т у р а

1. Инджинян, Р. О. Мировые тенденции развития электронной коммерции в сфере финансовых услуг / Р. О. Инджинян // Деньги и кредит. – 2006. – № 1.
2. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://belstat.gov.by>. – Дата доступа: 17.04.2020.
3. Статистический ежегодник : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск, 2018. – 490 с.
4. Хайбуллина, И. В. К вопросу об оценке эффективности деятельности электронного предприятия / И. В. Хайбуллина // Электроэнергетика: тенденции и прогнозы : аналит. бюл. – 2014. – Вып. № 13. – С. 9–17.

УДК 658.2

### **СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИЕЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ВЫРАЖЕНИЯ ЕЕ ЦЕЛЕЙ И ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ**

**В. А. Голуб**

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

В процессе реализации своей деятельности организация стремится к равновесию или сбалансированному состоянию. Степень сбалансированности, в свою очередь, обратно пропорциональна степени расхождения реального состояния организации с представлением о ее желательном состоянии в момент проведения оценки.

Соответственно, достижение сбалансированности возможно путем влияния на реальное состояние организации или на представление о ее желательном состоянии. Чтобы преобразовать состояние организации, следует воздействовать на саму организацию и на окружающую ее среду.

Для достижения состояния сбалансированности необходимы одновременное воздействие на представление о состоянии сбалансированности и преобразование внутренней структуры самой организации и окружающей ее среды.

В каждый отдельный отрезок времени степень возможности осуществления дисбалансирующего действия процессов и компонентов организации, а также различных компонентов внешней среды неодинакова. Это позволяет выделить множество актуальных источников проблем для данного периода на данном уровне понимания перспектив развития организации и ее внешней среды. Введем понятие «актуальное жизненное пространство», под которым будем понимать множество



объектов и процессов в организации и внешней среде, которые в данный момент представляются значимыми с точки зрения необходимости учета их влияния в достижении сбалансированного состояния системы.

Эффективность управления организацией как процесс достижения цели сбалансированного состояния будет тем выше, чем адекватнее соответствие сформированного представления о закономерностях развития дестабилизирующих факторов и реальных тенденций этих закономерностей.

Желательное состояние организации выражается в виде совокупности целей, определение которых осуществляется с учетом положения организации во внешней среде, в том числе в организациях более высокого уровня.

Одной из наиболее актуальных проблем совершенствования управления организацией является необходимость разработки интегрированного показателя эффективности деятельности, сочетающего в себе инструмент выражения и достижения целей организации и планирования результатов ее деятельности.

Один из критериев достижения организацией сбалансированного состояния – такой темп роста показателей, характеризующих объемы производства, который выше темпов роста вовлеченных ресурсов. Задачей управления организацией становится создание условий для обеспечения целесообразной динамики показателей производства, а также показателей использования ресурсов и результатов функционирования.

В качестве подхода к построению интегральной оценки эффективности организации может использоваться подход, основанный на положениях теории хозяйственных систем.

На основе данных положений, исходя из специфики деятельности организации, ее текущего состояния, представлений о желательном состоянии, а также на основе оценки состояния внешней среды разрабатывается динамическая система показателей, особенностью которой является учет целей развития организации и имеющихся возможностей для их достижения.

Разработка динамической системы показателей включает следующие этапы:

1. Определение функции организации, исходя из целей и планов ее развития.
2. Выделение набора показателей, характеризующих реализацию функции организации.
3. Закрепление эталонного порядка изменения значений показателей на основе величины разрыва между текущим и желательным состоянием значений показателей и объективных экономических законов.
4. Расчет интегрального показателя эффективности деятельности на основе измерения динамики изменения значений показателей за анализируемый период времени с помощью ранговых статистик.

Расчет значения интегрального показателя эффективности деятельности организации на основе разработанной последовательности изменения показателей осуществляется в следующей последовательности:

1. Определение за анализируемый период абсолютных значений показателей.
2. Расчет приростов значений показателей за анализируемый период как отношение значения показателя последующего года к значению показателя предыдущего года.
3. Расчет темпов изменения приростов значений показателей за анализируемый период как отношение последующего значения прироста показателя к предыдущему значению прироста.
4. Определение фактического ранга показателей и сопоставление его с эталонным порядком.

Случай совпадения реального порядка увеличения темпов приростов показателей с эталонным или максимально приближенный к эталонному означает эффективность функционирования организации, развитие в направлении достижения поставленной цели и реализацию запланированных результатов.

#### Литература

1. Голуб, В. А. Управление хозяйственными организациями / В. А. Голуб. – Гомель : ГПИ им. П. О. Сухого, 1996. – 157 с.
2. Голуб, В. А. Эффективность территориального управления / В. А. Голуб. – Минск : Выш. шк., 1992. – 106 с.
3. Управление организацией : учебник / под ред. А. Г. Поршнева. – М. : ИНФРА-М, 2008. – 736 с.

УДК 330

## СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП РЕФОРМИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ МОНОПОЛИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Р. И. Громыко

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

Естественные монополии присутствуют в инфраструктурных отраслях и играют важную роль в экономике нашей страны, так как оказывают непосредственное влияние на экономический рост, благосостояние потребителей и издержки производителей.

Деятельность естественных монополий является объектом государственного регулирования. Необходимость повышения качества регулирования и его эффективности требует учета факторов, влияющих на трансформацию рыночной среды существования естественных монополий. К таким факторам можно отнести, во-первых, технологические изменения, которые затрагивают принципиальные условия существования естественной монополии и приводят к трансформации ее сущности и форм проявления. Традиционные методы регулирования заменяются (полностью или частично) рыночными механизмами. Во-вторых, Беларусь стоит перед необходимостью модернизации процесса регулирования естественных монополий в силу внешних факторов, связанных с формированием общего рынка Евразийского экономического союза (ЕАЭС).

Существование естественной монополии вызывают, во-первых, технологические факторы, которые приводят к минимизации издержек для больших объемов выпуска, равных отраслевому спросу. Возникает эффект экономии от масштаба, действующий длительное время. Во-вторых, естественная монополия вызвана сетевой инфраструктурой отрасли (транспортные сети, электрические и т. д.). Препятствием для входа на данный рынок становится размер капитала и невозможность покрытия постоянных издержек для двух фирм. Важным фактором возникновения естественной монополии является и субаддитивность издержек. Для многопродуктовой компании возникает «эффект экономии от разнообразия». Производство услуг одной компанией обходится дешевле, чем несколькими. Примером могут быть услуги железнодорожной компании, когда для различных видов услуг используется одна и та же инфраструктура и система обслуживания железных дорог.

В Законе Республики Беларусь «О естественных монополиях» естественная монополия определяется как состояние рынка услуг, при котором создание конку-

рентных условий для удовлетворения спроса на определенный вид услуг невозможно или экономически нецелесообразно в силу технологических особенностей производства и предоставления данного вида услуг [1]. Постановлением Министерства антимонопольного регулирования и торговли Республики Беларусь от 8 мая 2020 г. № 37 установлен порядок отнесения услуг к сфере естественных монополий. Услуга относится к сфере естественных монополий при одном из следующих условий: 1) невозможность создания конкурентных условий для формирования предложения и удовлетворения спроса на такую услугу в силу технологических особенностей производства; 2) экономическая целесообразность создания конкурентных условий для формирования предложения и удовлетворения спроса на такую услугу в силу технологических особенностей производства и предоставления рассматриваемой услуги [2].

Изменения в технологических условиях функционирования естественных монополий, а также факторы, снижающие эффективность их функционирования (непрозрачность прав собственности и их слабая специализация, включенность отраслей в процессы лоббирования, проблемы корпоративного управления и координации институтов регулирования), вызывают потребность в совершенствовании регулирования сферы естественных монополий.

Технологические изменения приводят к утрате естественной монополией своей определяющей характеристики: удовлетворение отраслевого спроса с наименьшими издержками. Так, развитие технологий (IP-телефонии, мобильной связи, услуг доступа в интернет) привело к утрате рынками услуг электросвязи и почтовой связи признаков естественной монополии, что вызвало необходимость корректировки списка субъектов естественной монополии в стране. Из сфер естественных монополий в новой редакции закона исключены услуги электросвязи и почтовой связи общего пользования. Эти услуги сегодня могут обеспечивать хозяйствующие субъекты, получившие соответствующую лицензию. Таким образом, Белпочта, оставаясь доминирующим субъектом на рынке, становится субъектом антимонопольного регулирования.

Непрозрачность деятельности естественных монополистов и отсутствие у них стимулов к снижению издержек вызвали необходимость введения в новую редакцию указанного Закона ряда норм, касающихся как формирования затрат, так и характера публичности функционирования. Так, в электроэнергетике в новой редакции данного Закона разделены потенциально конкурентные и монопольные виды деятельности. Развитие конкуренции в электроэнергетике возможно в сфере производства и сбыта электроэнергии, при этом передача электрической энергии и ее распределение с учетом наличия сетевой инфраструктуры будут оставаться естественно-монопольной средой. В новой редакции Закона «О естественных монополиях» услуги электрической энергии разделены на три сферы: услуги по передаче электрической энергии по электрической сети; услуги по распределению электрической энергии; услуги по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике. Субъекты естественных монополий обязаны осуществлять отдельный учет расходов (затрат), в том числе инвестиций, а также доходов и задействованных активов по видам услуг. Это позволит отказаться от модели котлового тарифообразования и повысить прозрачность распределения затрат, приблизить размер платы за услуги к реальным затратам. Разделение услуг естественного монополиста и ожидаемое принятие Указа «О развитии конкуренции в сфере энергетики», который позволит создать условия для продажи излишков электроэнергии владельцами блок-станций, не входящих в систему Министерства энергетики, являются свидетельством попытки включить элементы рыночных механизмов в закрытую сферу экономики. Это под-

тверждается и введением нормы о публичных слушаниях при установлении или изменении тарифов и обязанности субъектов естественных монополий обеспечивать свободный и открытый доступ к информации о результатах своей деятельности, стоимости услуг, порядке их оказания путем размещения информации на своем сайте и в иных источниках.

На стимулирование снижения затрат направлена и норма закона о применении долгосрочных параметров регулирования цен, полученных с использованием метода сравнительного анализа эффективности деятельности субъектов, осуществляющих аналогичный вид деятельности. В международной практике этот метод известен как «ярдстик-конкуренция». Это положение соответствует п. 7 приложения № 20 к Договору о ЕАЭС.

Реформирование системы регулирования естественных монополий в Республике Беларусь находится также под влиянием законодательной базы ЕАЭС, которая регулирует функционирование общего рынка стран-субъектов. Формирование рынков отдельных товаров, а в будущем и единого энергетического рынка требует гармонизации национального законодательства с нормами ЕАЭС. Например, страны-партнеры Беларуси по ЕАЭС Россия и Казахстан опережают нас в реформировании энергетической отрасли. В этих странах услуги в сфере электроэнергетики законодательно и фактически разделены. В России сформировался конкурентный оптовый рынок электроэнергии и мощности. Участие субъектов Республики Беларусь в общем энергетическом рынке должно опираться на законодательную базу, отражающую международную практику.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Необходимость реформирования сферы естественных монополий вызвана как внутренней неэффективностью и низкими стимулами к восприятию технических и инновационных нововведений, так и необходимостью повышения инвестиционной составляющей в тарифе при одновременном выполнении последним социальной функции (доступности блага естественных монополий для населения).

2. Принятие новой редакции Закона Республики Беларусь «О естественных монополиях» вызвано технологическими изменениями в производстве, которые привели к появлению услуг-субститутов в сфере связи. Белпочта и стационарная связь утратили признаки естественных монополий.

3. Практика показывает, что рыночные механизмы более эффективны в силу их прозрачности и конкурентности, поэтому в Законе «О естественных монополиях» появились нормы, касающиеся прозрачности государственного регулирования и обеспечения защиты прав потребителей.

4. Необходимость реформирования практики регулирования вызвана также нормами Договора о ЕАЭС. Изменения в Законе «О естественной монополии» были призваны привести в соответствие законодательство Беларуси Договору о ЕАЭС.

#### Л и т е р а т у р а

1. Об изменении Закона Республики Беларусь «О естественных монополиях»: Закон Респ. Беларусь № 250-3 : принят Палатой представителей 11 нояб. 2019 г. – Режим доступа: [https://kodeksy-by.com/norm\\_akt/source-11.11.2019.htm/](https://kodeksy-by.com/norm_akt/source-11.11.2019.htm/). – Дата доступа: 25.09.2020.
2. Об отнесении услуг к сферам естественных монополий : Постановление Министерства антимонопольного регулирования и торговли Республики Беларусь № 37 от 8 мая 2020 г. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document>. – Дата доступа: 28.09.2020.

УДК 657.622

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИКВИДНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ****Е. П. Пономаренко***Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Функционирование любого субъекта хозяйствования невозможно без систематического осуществления им расчетов по своим обязательствам. Поэтому в условиях экономической нестабильности особое значение приобретают вопросы создания на предприятии эффективной системы управления ликвидностью и платежеспособностью во избежание несвоевременного погашения им долгов, начисления и уплаты неустоек за нарушение условий хозяйственных договоров. Основу этой системы должны составлять постоянный мониторинг покрытия обязательств предприятия платежными средствами и принятие решений по управлению активами и источниками их формирования, адекватных сложившейся ситуации. Важная роль в построении эффективной системы управления отводится анализу ликвидности и платежеспособности предприятия как источнику информационного обеспечения системы финансового менеджмента.

Проведенное нами исследование показало, что, несмотря на достаточно большое количество трудов, посвященных оценке ликвидности и платежеспособности предприятия, в настоящее время отсутствуют четкие критерии разграничения этих понятий. Это приводит к неверному выбору показателей их оценки, а также к искажению информации, формируемой для целей управления. Цель настоящего исследования состоит в уточнении сущности ликвидности предприятия и обосновании методики ее прогнозной оценки с использованием данных бухгалтерского учета и отчетности.

Большинство ученых и экономистов сходятся во мнении, что категории «ликвидность» и «платежеспособность» означают способность предприятия погашать свои долги. При этом отличие между ними они проводят по таким основаниям, как вид погашаемых обязательств (краткосрочные или все обязательства) [1, с. 41–42]; срочность погашения обязательств (погашение в установленные сроки или без их учета) [2, с. 486]; форма погашения задолженности (денежная форма прекращения обязательств или сочетание денежной и неденежной форм) [3, с. 80–81] и т. д.

Полагаем, что ликвидность не стоит интерпретировать как способность предприятия рассчитаться по краткосрочным обязательствам, поскольку при условии сохранения непрерывности деятельности у него нет необходимости единовременно погашать все обязательства. В случае же наступления банкротства предприятия возмещение долгов осуществляется за счет средств, вырученных от продажи всего имущества, а не только краткосрочных активов. Мы предлагаем трактовать ликвидность предприятия как прогнозную обеспеченность его краткосрочных обязательств активами, срок превращения которых в денежные средства соответствует сроку погашения этих обязательств. Определяя таким образом суть ликвидности, мы исходим из того, что активы предприятия обладают способностью превращаться в денежные средства, и в будущем, когда примут форму платежных средств, они смогут выступить источником погашения текущих обязательств.

Теоретически как краткосрочные, так и долгосрочные активы (за исключением неликвидных) могут трансформироваться в денежные средства. Однако при диагно-

стике ликвидности предприятия в расчет целесообразно брать только краткосрочные активы (за вычетом безнадежной к получению дебиторской задолженности и расходов будущих периодов), поскольку прогноз денежных потоков на длительный период не всегда может быть обоснован. Сопоставлять их следует с краткосрочными обязательствами, формальным платежным обеспечением которых они являются.

Отличие ликвидности предприятия от платежеспособности состоит в том, что она показывает, как обеспечены обязательства со сроками погашения до одного года исключительно теми активами, которые имеются у предприятия на дату проведения анализа. Платежеспособность же отражает его способность своевременно и в полном объеме рассчитываться по своим обязательствам за счет имеющихся денежных средств.

Для оценки степени ликвидности предприятия в определенные периоды времени в пределах года мы предлагаем проводить сравнение стоимости ликвидных активов, сгруппированных с учетом сложившегося на предприятии срока их трансформации в денежные средства, с величиной обязательств, сроки погашения которых находятся в тех же временных рамках. Степень ликвидности предприятия будет определяться тем, в какой мере соответствующие активы покрывают обязательства.

На первом этапе анализа следует рассчитать частные показатели оборачиваемости отдельных видов краткосрочных активов в днях, используя данные оборотно-сальдовой ведомости по синтетическим счетам и правило расчета оборачиваемости для счетов, сформулированное И. Ф. Шером [4, с. 99]. Для тех краткосрочных активов, которые не напрямую преобразуются в денежные средства, а переходят из одной функциональной формы в другую, общий срок оборота будет определяться суммированием сроков оборота активов, участвующих в цепочке трансформации. Например, материалы, прежде чем принять денежную форму, проходят стадии затрат незавершенного производства, готовой продукции, дебиторской задолженности. Как результат, срок их оборота определяется суммированием частных сроков обращения этих активов, а также самих материалов.

На следующем этапе нужно произвести группировку ликвидных активов и краткосрочных обязательств. Для распределения активов и обязательств определяется одинаковое количество групп с равноценными временными диапазонами. Отнесение активов в соответствующие группы осуществляют с учетом рассчитанного срока их оборота, а обязательств – исходя из сроков их погашения. Затем итоговая стоимость активов по каждой группе сопоставляется с величиной обязательств по группе с аналогичным временным диапазоном (например, до 25 дней, от 26 до 50 дней и т. д.). Если сумма активов превышает обязательства, то предприятие считается ликвидным на отрезке времени, заданном для соответствующих групп активов и обязательств.

Предложенная методика оценки ликвидности предприятия имеет ряд достоинств: она учитывает существующую на определенном предприятии скорость оборота средств и, как результат, длительность преобразования краткосрочных активов в денежные средства; позволяет оценить ликвидность предприятия на заданных временных отрезках в течение года; учитывает точные, а не предполагаемые сроки погашения обязательств. Применение данной методики прогнозной оценки ликвидности позволит менеджерам получить информацию о теоретической обеспеченности обязательств предприятия с разными сроками погашения активами и в итоге повысить эффективность принимаемых управленческих решений.

## Литература

1. Крылов, С. И. Финансовый анализ : учеб. пособие / С. И. Крылов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 160 с.
2. Ковалев, В. В. Финансовый учет и анализ: концептуальные основы / В. В. Ковалев. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 720 с.
3. Сорокина, Е. М. Теоретический аспект анализа платежеспособности организации / Е. М. Сорокина // Изв. ИГЭА. – 2012. – № 2 (82). – С. 80–86.
4. Соколов, Я. В. История бухгалтерского учета : учебник / Я. В. Соколов, В. Я. Соколов. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 272 с.

УДК 332.122

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
ТЕХНОПАРКОВ****М. В. Минько, К. С. Шаповалова***Белорусский государственный университет, г. Минск*

Оценка эффективности технопарка является актуальной проблемой науки и практики на современном этапе, что обусловлено спецификой анализируемой структуры [5]. Это специфика проявляется в том, что, во-первых, технопарк является интегрированной платформой для реализации инновационными компаниями и якорными резидентами совокупности разнонаправленных проектов, что требует их обобщенной оценки. Во-вторых, инвестиции и инновационные проекты в инфраструктуру технопарка являются рисковым вложением капитала, имеющим чаще всего длительный срок окупаемости, в связи с чем возникают затруднения в оценке коммерческого проекта. В-третьих, оценка технопарка как организационно сложной структуры должна учитывать опосредованное влияние отдельных функциональных и структурных элементов. В-четвертых, неопределенность развития технопарков вследствие недостаточной проработанности нормативно-правовой базы и механизмов инвестирования в их развитие затрудняет перспективную оценку их деятельности. И, в-пятых, существуют проблемы стоимостного измерения социальных результатов инновационной деятельности [4, с. 13].

Учеными и специалистами на современном этапе предлагаются различные методологические подходы к оценке эффективности технопарков, в основу которых положены отдельные эффекты деятельности и взаимосвязи между ними. В ряде работ выделяются две группы показателей эффективности деятельности технопарка, характеризующие его как стандартное коммерческое предприятие и как специфическую компоненту региона. Первая группа содержит типичную систему показателей – прибыль, рентабельность, финансовая устойчивость. Во вторую группу входят особые индикаторы деятельности технопарка, характеризующие число резидентов, размеры, особенности и эффекты их деятельности. Другие исследователи выделяют экономический, научно-технический, региональный и социально-психологический эффекты от деятельности технопарков. В основу оценки его эффективности входят результативность, окупаемость и доходность реализуемых резидентами инновационных проектов.

По мнению Р. Г. Майнера, результативность технопарка может быть оценена с использованием интегрального эффекта, аналогичного чистому дисконтированному доходу, который представляет собой величину разностей результатов и инновационных затрат за расчетный период с учетом дисконтирования [3].

Методика оценки вклада технопарка в социально-экономическое развитие региона, предложенная профессором Н. В. Родионовой, включает измерение следую-

щих внешних эффектов, связанных с созданием и функционированием технопарка: экономические, демографические, социальные, экологические, градостроительные, оборонно-мобилизационные, бюджетно-налоговые и культурно-исторические. Автором предлагается система показателей оценки приведенных эффектов и указаны проблемы ее осуществления на современном этапе [6].

Таким образом, большинство методик по расчету эффективности деятельности технопарков рассчитывается на основе рейтингового или интегрального показателя, полученного из выбранных критериев.

В связи с многоаспектностью, полиструктурностью и общественной значимостью технопарков А. А. Мальцева предлагает рассматривать подобные структуры с двух точек зрения:

– технопарк как ядро инновационного кластера, обладающее достаточным потенциалом для обеспечения синергетического эффекта от взаимодействия участников и реализации взаимодополняющих стратегий – повышения эффективности использования существующих в кластере знаний и формирования новых внутренних сетей сотрудничества. При этом выделяются финансовая составляющая; клиентская составляющая; составляющая внутренних бизнес-процессов и составляющая интеллектуального капитала;

– технопарк как коммерческая структура, включающая имущественный комплекс, созданный для осуществления деятельности в сфере высоких технологий и для получения прибыли [4, с. 14].

В результате аналитического исследования сбалансированной системы показателей технопарка как ядра инновационного кластера могут быть выявлены возможные инициативы по совершенствованию системы управленческого контроля за его функционированием, что обеспечит максимально эффективное достижение стратегических целей и инновационного развития технопарка и региона в целом.

Например, в основе методики рейтинга Ассоциации кластеров и технопарков России лежит комплексная оценка эффективности деятельности управляющих компаний технопарков по 4 группам показателей (суб-индексам):

1. Инновационная активность резидентов технопарка.
2. Экономическая деятельность резидентов технопарка.
3. Эффективность деятельности управляющей компании технопарка.
4. Инвестиционная привлекательность и информационная открытость технопарка [1].

Эффективное функционирование технопарков в Беларуси является актуальным вопросом, поскольку они стимулируют социально-экономическое развитие страны, ускоряют инновационную деятельность и продвижение инновационных идей и продуктов на внутренний и международный рынок. Кроме того, технопарки оказывают помощь в развитии малого инновационного бизнеса, который в Беларуси на данный момент является крайне недооцененным [7]. На наш взгляд, эффективность деятельности технопарков должна рассматриваться и через показатели влияния на инновационную активность резидентов.

Для того чтобы понять, каким образом технопарк влияет на инновационную активность предприятий, проанализируем понятие «инновационная активность». Инновационная активность – комплексная характеристика инновационной деятельности фирмы, включающая степень интенсивности осуществляемых действий и их своевременность, способность мобилизовать потенциал необходимого количества и качества, в том числе его скрытые стороны, способность обеспечить обоснованность, прогрессивность применяемых методов, рациональность технологии инновационного процесса по составу и последовательности операций [2].



В свою очередь, резидентом технопарка является юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, осуществляющие инновационную деятельность с использованием предоставленного технопарком движимого и недвижимого имущества, в том числе помещений различного функционального назначения, и оказываемых технопарком услуг (выполняемых работ), пользующиеся статусом резидента на основании решения органов управления технопарка. Следовательно, резиденты технопарка – это инновационно-активные предприятия, повышение уровня инновационной активности которых зависит от деятельности самого технопарка, предоставляемых им услуг, а также от выделяемых государством преференций и льгот в данной области.

Основным лимитирующим фактором, ограничивающим возможности выбора частных критериев, безусловно, является состояние имеющейся информационной базы, формируемой на основе данных, поступающих от управляющих компаний технопарков и соответствующих органов государственного управления.

Таким образом, эффективность деятельности технопарка для обеспечения инновационной активности предлагается рассматривать через следующие показатели резидентной структуры технопарка (см. таблицу).

#### Показатели резидентной структуры технопарка

Показатель	Единица измерения
1. Число резидентов технопарка, в том числе малых и средних предприятий	Количество
2. Число созданных и модернизируемых рабочих мест технопарком и его резидентами	Количество
3. Объем отгруженной инновационной продукции (выполненных работ, оказанных услуг)	Тыс. р.
4. Налоги и сборы, уплачиваемыми резидентами	Тыс. р.
5. Число патентов на изобретения, полезные модели, полученные резидентами	Количество

*Источник.* Собственная разработка.

Кроме вышеперечисленных показателей, следует также изучить следующие критерии:

- наличие инфраструктуры технопарка, достаточной для его развития;
- номенклатуру услуг технопарка, динамику их развития;
- наличие на территории технопарка центра внедрения технологий, бизнес-инкубатора, учебного центра, центра сервисных услуг.

Сейчас технопарки проводят мероприятия для привлечения потенциальных резидентов, повышая их уровень инновационной активности и предприятий в соответствующем регионе. Количество таких мероприятий следует рассматривать в качестве критерия для оценки эффективности деятельности технопарка для повышения инновационной активности предприятий.

#### Литература

1. Ассоциация кластеров и технопарков России. – Режим доступа: <http://akitrf.ru/>. – Дата доступа: 10.12.2019.
2. Гавриленко, В. Г. Капитал: энциклопедический словарь / В. Г. Гавриленко. – Минск : Право и экономика, 2009. – 858 с.

3. Майнер, Р. Г. Взаимосвязи экономических и социальных показателей в технопарковой системе / Р. Г. Майнер // *Инновации*. – 2009. – № 5.
4. Мальцева, А. А. Методика оценки эффективности технопарка как ядра инновационного кластера региона на основе системы сбалансированных показателей / А. А. Мальцева // *Инновации и инновац. деятельность*. – 2011. – № 3 (210). – С. 13–19.
5. Минько, М. В. Повышение эффективности инновационной деятельности ООО «Минский городской технопарк» / Д. С. Артеменко, М. В. Минько // *Инновационное развитие организаций в современных экономических условиях Республики Беларусь : материалы Второго форума молодых ученых, Минск, 15 марта 2018 г. / Белорус. гос. ун-т, СНИЛ «Центр инновац. проектов и трансфера знаний» ; редкол.: В. Ф. Байнев [и др.] ; под общ. ред. В. Ф. Байнева, Е. Э. Головчанской. – Минск : БГУ, 2018. – С. 9–21.*
6. Родионова, Н. В. Методика оценки вклада технопарка в социально-экономическое развитие региона / Н. В. Родионова // *Инновации*. – 2009. – № 5.
7. Шаповалова, К. С. Анализ роли технопарков в инновационной активности предприятий / К. С. Шаповалова, М. В. Минько // *Тенденции экономического роста в XXI веке : материалы Междунар. науч. конф., г. Минск, 28 февр. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 2019. – С. 547–550.*

Научное издание

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Материалы

**XIII Международной научно-технической конференции  
(научные чтения, посвященные 125-летию со дня рождения П. О. Сухого)**

*Гомель, 22 октября 2020 года*

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редакторы: *Н. В. Гладкова, Т. Н. Мисюрова*

Компьютерная верстка: *Н. Б. Козловская, И. П. Минина*

Подписано в печать 21.10.20.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 39,52. Уч.-изд. л. 31,45.

Тираж 70 экз. Заказ № 518/23.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48