

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

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ЭНЕРГЕТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

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

Гомель, 22–23 апреля 2021 года

**В двух частях
Часть 1**

Гомель 2021

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

И88

Редакционная коллегия:

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

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

д-р техн. наук, проф. *И. А. Мурашко*

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

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

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

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

канд. техн. наук *А. О. Добродей*

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

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

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

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

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

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

Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики
И88 и управления : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспиран-
тов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования
Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бой-
ко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 293 с.

ISBN 978-985-535-469-8.

Содержатся материалы XXI Международной научно-технической конфе-
ренции по следующим направлениям: машиностроение; материаловедение
и технологии обработки материалов; энергетика; радиоэлектроника, автоматиза-
ция, телекоммуникации и связь; экономика, организация производства и управ-
ление; маркетинг и отраслевая экономика; информационные технологии и моде-
лирование; физические и математические методы исследования сложных систем.

Для студентов, аспирантов и молодых ученых.

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

ISBN 978-985-535-469-8 (ч. 1)

ISBN 978-985-535-472-8

© Оформление. Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Зализный Д. И.</i> Фотоэлектростанции: принципы работы, основные параметры, методы и средства диагностирования фотоэлектрических модулей.....	7
--	---

Секция I. МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Климович В. А., Абрамович О. К.</i> Метод кустового бурения на месторождениях Припятского прогиба.....	11
<i>Ермоленко В. А., Андреевец Ю. А.</i> Исследование динамики распределителя со встроенным клапаном предохранительным.....	14
<i>Порошина С. Л., Семенова В. А., Порошина А. Д., Жогло В. Г.</i> Литологические и гидрогеохимические аспекты изучения масштабов засоления и рассоления коллекторов при разведке и разработке месторождений нефти и газа.....	17
<i>Корчевский А. С., Дубровец Е. А., Судаков Р. А., Раков В. О., Целуева С. Н.</i> Проектирование штамповой оснастки в КОМПАС-3D с фотореалистичной визуализацией и анимацией сборочных 3D-моделей оснастки.....	21
<i>Бекиров Э. Л., Джемилев Э. Ш.</i> Методика комплексного исследования процесса сверления.....	25
<i>Хазеев Е. В., Рогов С. А., Стасенко Д. Л.</i> Анализ гидравлической системы с клапанной адаптацией к нагрузке.....	27
<i>Хазеев Е. В., Стасенко Д. Л.</i> Анализ гидравлической системы с объемной адаптацией к нагрузке.....	31
<i>Синявский М. В., Кулаев А. И., Петришин Г. В.</i> Технологические свойства нитроцементированных порошков для магнитно-абразивной обработки.....	35
<i>Mtayrek M., Nevzorova A. B.</i> Geological research on the search for oil and gas reserves on the shelf of the exclusive economic zone of Lebanon.....	40
<i>Санько В. Э., Шепелева И. С.</i> Геофизические исследования скважин в процессе бурения.....	40
<i>Стельмашонок А. Г., Абрамович О. К.</i> Адаптация перспективных технологий бурения скважин для добычи углеводородов на месторождениях Припятского прогиба....	43
<i>Сошенко А. В., Машечко Е. И., Семенова В. А., Шепелева И. С.</i> Выделение засоленных коллекторов методами геофизических исследований скважин на примере Северо-домановичского месторождения нефти.....	46
<i>Уразалиев Ф. Б.</i> Упругие особенности шин хлопкоуборочных машин в режиме динамического нагружения.....	49
<i>Саховский К. А., Кульгейко М. П.</i> Влияние инверсии главного движения на погрешность обработки при растачивании глубоких отверстий.....	52
<i>Хихлуха А. В., Михайлов М. И.</i> Решение обратной задачи робота для работы в робототехническом комплексе.....	56
<i>Воробей С. И., Михайлов М. И.</i> Исследование точности обработки фасонных отверстий на токарном станке с ЧПУ.....	59
<i>Власов М. А., Попов В. Б.</i> Математическое моделирование транспортного переезда мобильного сельскохозяйственного агрегата.....	63
<i>Найдин А. О., Попов В. Б.</i> Определение сопротивления со стороны почвы при ее пахоте плугом пятикорпусным навесным ПЛН-5-35.....	66

Секция II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

<i>Агаджанов А., Батыров С.</i> Возможности использования местного сырья в литейном производстве.....	69
---	----

<i>Речиц А. Г., Злотников И. И.</i> Изучение технологии микроплазменного анодирования.....	72
<i>Гутман Р. Е., Асвинова П. В., Степанкин И. Н.</i> Исследование прочности горных пород методом Scratch Test	75
<i>Дорошко Н. Ю., Бобрышева С. Н.</i> Водород как альтернативный вид топлива.....	78
<i>Поздняков Е. П., Рабков А. В., Коноваленко Н. С., Радионов А. В., Степанкин И. Н.</i> Износостойкость науглероженных слоев конструкционной стали 42CrMoS4.....	81
<i>Буйко М. Е., Коноваленко Н. С., Поздняков Е. П., Рабков А. В., Радионов А. В., Степанкин И. Н.</i> Микроструктура и микротвердость термодиффузионно-упрочненных слоев конструкционной стали 16CrMnS5.....	84
<i>Мартьянов Ю. В., Цыганович И. А., Бобарикин Ю. Л.</i> Исследование влияния скоростных параметров тонкого волочения на структурные изменения в проволоке.....	88
<i>Мартьянов Ю. В., Цыганович И. А., Бобарикин Ю. Л.</i> Исследование влияния режимов свивки металлокорда на изменение свойств проволоки	91
<i>Барановский Д. С., Астапенко И. В.</i> Совершенствование прокатки по «слиттинг-процессу» в контрольном калибре стана 320 ОАО «БМЗ».....	93
<i>Барановский Д. С., Астапенко И. В.</i> Моделирование горячей прокатки угловой стали в чистовых калибрах стана 320 ОАО «БМЗ»	97
<i>Петрусевич В. А., Астапенко И. В.</i> Оценка влияния частоты вращения волокна на параметры процесса при волочении стали	100
<i>Савченко С. А., Астапенко И. В.</i> Влияние процесса гомогенизации непрерывнолитых заготовок подшипниковых марок сталей на уровень карбидной неоднородности при горячей сортовой прокатке	104
<i>Малашков Н. Г., Бобрышева С. Н.</i> Разработка атласа индентификации токсичных и пожароопасных полимеров.....	107
<i>Сарнавский А. В., Целуева С. Н.</i> Реализация методики нисходящего проектирования сложных систем с использованием технологии компоновочной геометрии	109
<i>Грудина Н. В., Стельмашенок С. В., Пацай Д. Г., Кольцова И. А., Козлов В. И.</i> Фоторендеринг и комплексная анимация модели в реальном времени – новые функциональные возможности программного обеспечения 3D CAD PTC Creo версия 7.0	113
<i>Козлов А., Бобрышева С. Н.</i> Снижение пожароопасности полимеров, применяемых в 3D-технологиях.....	117
<i>Грудина Н. В., Кольцова И. А., Шантыко А. С.</i> Коллаборативная работа «конструктор–технолог–производство» с использованием 3D-моделей в концепции Индустрия 4.0.....	121
<i>Ковалев Е. В., Довгало Д. А., Ковалевич А. В., Стельмашенок С. В., Кириленко С. И., Степанкин И. Н.</i> Особенности трехмерного моделирования анатомических структур человека для повышения эффективности оперативного лечения в ортопедии и нейрохирургии.....	125
<i>Бондарев А. В., Волнянко Е. Н.</i> Особенности формирования поверхностного слоя стальной детали при трении со смазочными материалами, модифицированными твердыми дисперсными наполнителями.....	128
<i>Никитин П. Н., Жаранов В. А.</i> Применение параметрической оптимизации при исследовании работы систем интенсификации работы дуговых сталеплавильных печей на металлургических мини-заводах.....	130
<i>Бобышев В. И., Жаранов В. А.</i> Численное моделирование гидродинамики промковшей машин непрерывной разливки.....	133
<i>Петрусевич В. А., Бобарикин Ю. Л.</i> Величина прогнозной относительной обрывности металлокорда при свивке	136
<i>Атннша Махмуд Омар Ахмед, Одарченко И. Б., Жаранов В. А.</i> Optimization of the quality of large steel castings based on complex numerical modeling of casting technological processes.....	138
<i>Путеев В. С., Бобарикин Ю. Л.</i> Анализ влияния способа деформации слитка на структуру шарикопоподшипниковой стали в процессе непрерывной разливки стали.....	141
<i>Пости А. И., Бобарикин Ю. Л.</i> Исследование влияния бора на свойства катанки.....	143

Секция III. ЭНЕРГЕТИКА

Светличный К. А., Шаповалов А. В. Альтернативные холодильные системы с использованием нетрадиционных источников энергии и термосифонных систем	146
Кацуба Е. В., Шаповалов А. В. Электрические отопительные приборы нового поколения	149
Пырх А. О., Шаповалов А. В. Энергоэффективные системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха современных комплексов	151
Никитенко В. П., Овсянник А. В. Теплообмен при конденсации хладагентов на теплообменниках	153
Волоткевич Д. А., Ермалинская Н. В. Развитие топливно-энергетического комплекса в условиях обеспечения энергетической безопасности Республики Беларусь	157
Вежновец Е. М., Герасенко К. П., Рудченко Г. А. Перспективы и барьеры развития систем энергоснабжения на базе распределенной генерации в Республике Беларусь....	161
Каминский М. В., Широглазова Н. В. Реконструкция градирни № 1 на Гомельской ТЭЦ-2.....	164
Кохан А. С., Широглазова Н. В. Газопоршневые установки	166
Кныш О. А., Вальченко Н. А. Рекуперация низкопотенциального тепла в системах вентиляции зданий	169
Шкробот А. А., Макеева Е. Н. Сезонные изменения показателей качества поверхностных вод Гомеля	172
Найден Е. С., Круталевич А. Г., Макеева Е. Н. Повышение октанового числа бензина и цетанового числа дизельного топлива.....	176
Вегера М. А., Коришунов К. Е., Костюченко И. Д., Чудиловская С. А. Программа для расчета коэффициента теплоотдачи при разных режимах течения жидкости в трубе	180
Оразбердиева М., Аннаев М., Гурдов К., Анныев Дж. Культивирование хлореллы как способ развития альтернативной энергетики	182
Matyakiyev A., Vatmanov J., Agajanov A. Design of the heat pipe helium greenhouse	185
Сапарлыева О. Б. Оценка внедрения ресурсосберегающих и инновационных технологий по развитию энергетики в условиях Туркменистана	188
Дяченко А. А., Гламаздин П. М. Дослідження зниження втрат теплоти з димовими газами при підвищенній концентрації кисню в дутьовому повітрі енергетичних установок	190
Наталенко С. А., Гламаздин П. М. Використання теплових насосів в теплових схемах ТЕЦ та ТЕС.....	193
Поздняков М. Н., Коротченко С. Н., Попкова Н. А. Оценка установки активного энергетического комплекса на предприятии Беларуси	197
Гецман Е. М., Попкова Н. А. Текущее состояние и перспективы развития энергосистемы Республики Беларусь.....	199
Ковалева Т. Д., Климович П. И., Гецман Е. М. Прогнозируемые режимы работы энергосистемы Республики Беларусь с учетом БелАЭС.....	202
Новиков М. А., Обозов А. А. Прогнозирование экологических характеристик и анализ систем снижения токсичности отработавших газов энергетических машин ...	205
Спитальников В. М., Грунтович Н. В. Исследование структурных полей суточного потребления газа от температуры для укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» региональной системы газоснабжения	208
Малашенко М. П., Грунтович Н. В. Направления экономии импортируемого природного газа в Республике Беларусь с учетом интеграции БелАЭС	212
Спитальников В. М., Грунтович Н. В. Оценка схожести вида структурных полей суточного потребления газа для укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» региональной системы газоснабжения	216

<i>Малашенко М. П., Грунтович Н. В.</i> Исследование структурных полей суточного потребления газа укрупненной балансовой подгруппы «Минпром» региональной системы газоснабжения	220
<i>Матьякубов А., Азадова А., Атаджанов Б.</i> Возможности внедрения «умных технологий» в систему городского освещения в Туркменистане	223
<i>Джумаев А. Я.</i> Анализ потенциала солнечной энергии на территории Балканской области Туркменистана	226
<i>Нурмухаммедов Д., Шахымов Э., Акымова Я.</i> Система учета электроэнергии на фидерах контактной сети	229
<i>Алланазаров Н., Блясова Ш., Мулкиев Ч.</i> Особенности проектирования фотоэлектрической солнечной электростанции	232
<i>Нурмухаммедов Д., Данатаров В., Нуриев Р.</i> Определение показателей надежности электроустановок в местных условиях	236
<i>Петров И. В., Грунтович Н. В.</i> Роль комплексного технического диагностирования электрических двигателей в обеспечении надежности их эксплуатации	240
<i>Зеленькевич А. И., Збродыга В. М., Прищепов М. А.</i> Работа силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при однофазной нагрузке	243
<i>Лугачев В. М., Гапанюк С. Г.</i> Учет теплового импульса при коротком замыкании	245
<i>Громыко И. Л., Галушко В. Н.</i> Сверточные нейронные сети для идентификации межвиткового замыкания в трансформаторе	248
<i>Громыко И. Л., Белькин В. О., Галушко В. Н.</i> Диагностика трансформаторов с помощью приборного учета данных и сверточных нейронных сетей	251
<i>Жук Е. А., Грунтович Н. В.</i> Применение критерия «уровень частичных разрядов» при технической диагностике кабелей	253
<i>Панфилов А. М., Грунтович Н. В.</i> Сравнение метрологических характеристик двух виброакустических измерительных систем	256
<i>Сучков Д. В., Зализный Д. И.</i> Микропроцессорный автоматический выключатель	259
<i>Бобров Д. В., Козлов В. Д., Рудченко Ю. А.</i> Экономический выбор варианта распределительного трансформатора	261
<i>Слепнёв Г. А., Кравченко А. И.</i> Поиск путей снижения воздействия коротковолнового оптического излучения источников света, экранов сотовых телефонов и компьютеров на зрительные органы человека	264
<i>Савицкая С. А., Алфёрова Т. В.</i> Технология «Умный дом» как средство повышения энергетической эффективности жилых зданий	268
<i>Новик А. В., Алфёрова Т. В.</i> Силовые аморфные трансформаторы как средство повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей	271
<i>Гурьянов А. Ю., Алфёрова Т. В.</i> Диагностика силовых трансформаторов на основе искусственных нейронных сетей	274
<i>Керус К. В., Алфёрова Т. В.</i> Методы и средства моделирования элементов теории катастроф для задач энергетики	277
<i>Кончиц Н. С., Широков О. Г.</i> Качество электрической энергии питающих сетей	281
<i>Соболенко А. В., Алфёрова Т. В.</i> Повышение безопасности прохождения ночного минимума энергосистемы путем модернизации электрической части котельной «Южная» с установкой электродвигателей	284
<i>Натарин Е. В., Алфёрова Т. В.</i> Влияние сварочного оборудования на показатели качества электроэнергии промышленных потребителей	287
<i>Шитиков П. К., Лычёв П. В.</i> Выбор принципов и методов регулирования напряжения на шинах 6 и 10 кВ подстанции «Центролит» в связи с реконструкцией ...	290

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Д. И. Зализный

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

Солнечная энергетика – активно развивающаяся отрасль в Республике Беларусь. По официальной статистике на 2019 г. [1] установленная мощность фотоэлектрических станций в нашей стране составила 154 МВт. Это 1,5 % от общей установленной мощности электростанций (10181 МВт на 2019 г.). Наиболее крупные фотоэлектростанции сооружены в гомельской и могилевской областях.

Структурная схема фотоэлектростанции изображена на рис. 1.

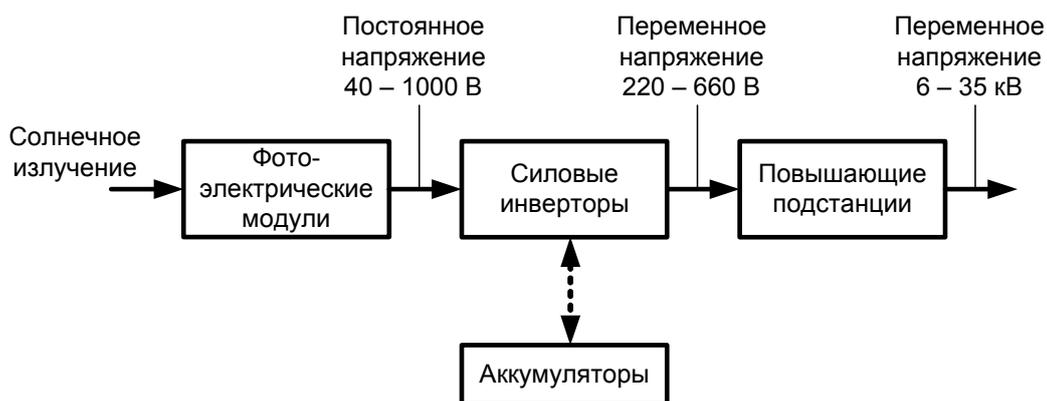


Рис. 1. Структурная схема фотоэлектростанции

Источником энергии для фотоэлектростанции является солнечное излучение (радиация, инсоляция), уровень которого измеряется в Ваттах на метр квадратный ($\text{Вт}/\text{м}^2$). На широте экватора максимальное значение этой величины может достигнуть $1300 \text{ Вт}/\text{м}^2$, а на широте Республики Беларусь – не более $1100 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Основными элементами фотоэлектростанции являются фотоэлектрические модули (солнечные батареи). Они состоят из отдельных ячеек – фотоэлементов (рис. 2, а).

Внутри каждого фотоэлемента реализован p - n переход между двумя полупроводниками разных типов проводимости. Солнечное излучение, попадая на p - n переход, придает дополнительную энергию электронам, в результате на электродах фотоэлемента возникает разность потенциалов – фотоЭДС (ЭДС – электродвижущая сила). Значение этой ЭДС, как правило, не превышает 0,7 В.

В состав модуля могут входить от 48 до 90 фотоэлементов. Наиболее распространенные конструкции – 60 или 72 фотоэлемента. Все фотоэлементы модуля $BL_1 - BL_n$ (рис. 2, б) соединяются последовательно для повышения значения генерируемого напряжения. Это значит, что в модуле с 72 фотоэлементами максимальное выдаваемое напряжение (в режиме холостого хода) составит: $72 \cdot 0,7 = 50,4 \text{ В}$.

По отношению к максимально возможной вырабатываемой мощности КПД солнечных фотоэлементов находится в диапазоне от 15 до 20 %.

Кроме фотоэлементов в модуле имеются обходные диоды $VD_1 - VD_3$ (рис. 2, б), предназначенные для обеспечения работы модуля при его частичном затенении.

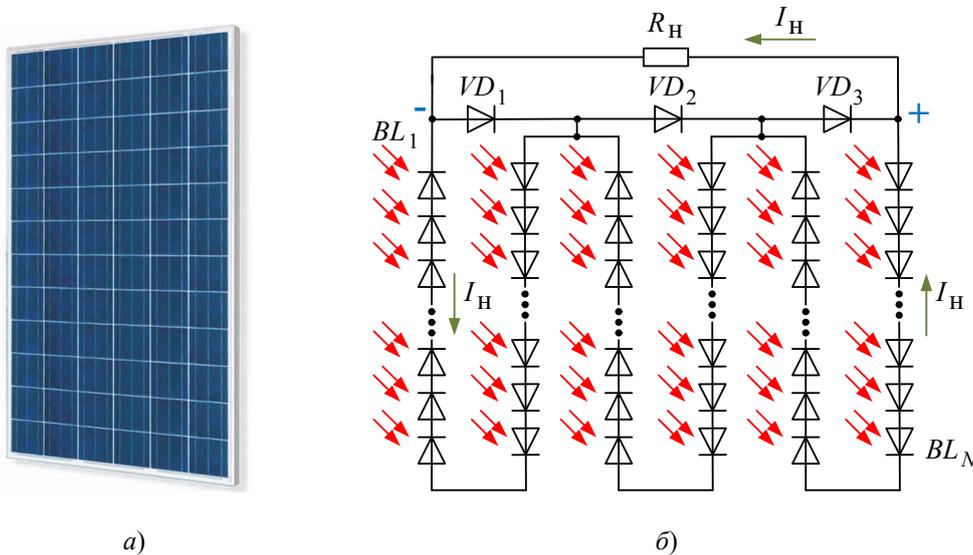


Рис. 2. Фотоэлектрический модуль (а) и его схема (б)

В рамках схемы фотоэлектростанции часть модулей соединяется последовательно в секции, а затем полученные секции подключаются между собой параллельно в блок. Таким образом, на выходе блока формируется постоянное напряжение с максимальным значением не более 1000 В. Далее это напряжение подается на силовой инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный при действующем значении выходного напряжения 220, 380 или 660 В с частотой 50 Гц. По такому принципу устроена вся электростанция: один блок фотоэлектрических модулей – один инвертор.

Выходы силовых инверторов соединяются параллельно и затем подключаются к повышающему трансформатору подстанции, на вторичных обмотках которого формируется трехфазная система напряжений значением 6, 10 или 35 кВ, позволяющая передавать энергию на большие расстояния и выдавать ее в энергосистему страны.

Накопительные аккумуляторы применяются, как правило, на небольших электростанциях мощностью не более 100 кВт. Однако есть реализации таких накопителей и на мощных электростанциях. Так, в Австралии в 2021 г. компанией *Tesla* реализована накопительная станция мощностью 100 МВт.

Для анализа качества работы фотоэлектрических модулей используют их схемы замещения и вольт-амперные характеристики (рис. 3).

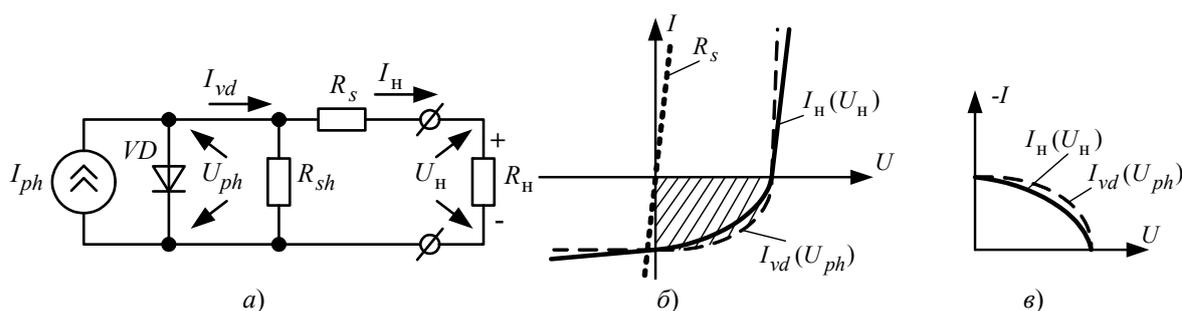


Рис. 3. Схема замещения (а) и вольт-амперные характеристики (б – исходные; в – инверсные для генераторного режима) фотоэлектрического модуля

Полупроводниковая составляющая фотоэлектрического модуля в схеме замещения представлена эквивалентным диодом VD и источником фототока I_{ph} . Кроме этого модуль характеризуется параллельным R_{sh} и последовательным R_s сопротивлениями.

Если пренебречь влиянием сопротивления R_{sh} , то вольт-амперная характеристика модуля, показанная зависимостью $I_H(U_H)$ на рис. 3, б, в, будет равна сумме вольт-амперных характеристик полупроводниковой части $I_{vd}(U_{ph})$ и сопротивления R_s (рис. 3, б) по отношению к оси напряжения.

Источник тока I_{ph} и диод VD формируют исходную вольт-амперную характеристику как зависимость $I_{vd}(U_{ph})$ в соответствии с формулой [2], [3]:

$$I_{vd} = I_0 \left(e^{\frac{qU_{ph}}{K_B\theta}} - 1 \right) - K_{ph}S, \quad (1)$$

где I_{vd} – суммарный ток через $p-n$ переходы модуля, А; I_0 – обратный ток $p-n$ переходов при отсутствии солнечного излучения, А; q – заряд электрона, Кл; K_B – постоянная Больцмана, Кл · В/К; U_{ph} – напряжение, генерируемое $p-n$ переходами модуля, В; θ – температура $p-n$ переходов модуля, К; K_{ph} – коэффициент пропорциональности; S – солнечное излучение, Вт/м².

Зависимость $I_H(U_H)$ можно получить экспериментальным путем. Тогда, вычитая график $I_{vd}(U_{ph})$, рассчитанный по формуле (1), из графика $I_H(U_H)$, получим график для последовательного сопротивления R_s (рис. 1, б). На его основе по закону Ома и рассчитывается значение R_s .

Автором данной статьи с помощью прибора *SOLAR I-Vw* фирмы *HT ITALIA* получены следующие экспериментальные значения последовательного сопротивления [2], [3]: для модуля *Orange Solar OSP XTP 250* (60 фотоэлементов) $R_s = 0,48$ Ом, а для модуля *SF-P672300* (72 фотоэлемента) $R_s = 1,22$ Ом.

Если выполнять рассмотренные расчеты последовательного сопротивления фотоэлектрического модуля периодически, то таким образом можно реализовать задачу

его диагностирования, что позволит своевременно выявлять модули с ухудшением характеристик.

Литература

1. Энергетический баланс Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – 152 с.
2. Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета Matlab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. – 2019. – № 2. – С. 135–145.
3. Зализный, Д. И. Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета Matlab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. – 2020. – № 6. – С. 515–525.

СЕКЦИЯ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

МЕТОД КУСТОВОГО БУРЕНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

В. А. Климович

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

Научный руководитель О. К. Абрамович

Кустовое бурение находит широкое применение в нефтедобывающей отрасли многих стран, так как имеет ряд существенных преимуществ, приводящих к сокращению затрат на обустройство нефтепромыслов: уменьшаются объемы строительномонтажных работ, строительства дорог, водопроводов, линий электропередач; упрощается обслуживание эксплуатируемых скважин и переход на автоматизированные процессы добычи. Кустовое бурение способствует решению экологических проблем, например, уменьшению вероятности понижения уровня грунтовых вод на огромных территориях, которое может возникнуть вследствие нарушения целостности водоносных горизонтов. Кустом скважин называется такое их расположение, когда устья находятся вблизи друг друга на одной технологической площадке, а забои скважин – в узлах сетки разработки залежи. Учитывая перечисленные достоинства, тему кустового бурения можно считать актуальной и требующей повышенного внимания.

Для Беларуси кустовой метод бурения не типичен вследствие сложности геологического строения Припятского прогиба и технико-технологических условий проводки скважин, однако с 2014 г. «Белоруснефть» также стала использовать его из-за очевидных преимуществ.

Припятский прогиб занимает южно-восточную часть Беларуси, протягивается в северо-западном направлении на 280 км при ширине 150 км и представляет собой палеорифт. В его пределах простираются две структуры II порядка – Северная зона ступеней и внутренний грабен. В платформенном чехле Припятского прогиба выделяются три структурных отдела: 1) подсолевой; 2) нижнесолевой и межсолевой; 3) верхнесолевой и надсолевой, которые различаются стилем тектоники и морфологией локальных структур. Глубины залеганий продуктивных отложений колеблются в широких пределах от 1600 до 4700 м и зависят от стратиграфического положения в разрезе и приуроченности к той или иной тектонической зоне. Кустовой метод бурения в таких условиях имеет ряд ограничений, однако опыт Речицкого месторождения показал, что эти проблемы преодолимы. Куст принадлежит ланско-старооскольской залежи. Ланско-старооскольская залежь нефти территориально находится в центральной, сводовой части Речицкого поднятия и приурочена к очень сложно построенному терригенному резервуару. Поверхность ланского горизонта – это часть нормальной антиклинали, разбитая она северную и южную части региональным Речицким сбросом. Северная, прибрсовая часть структуры осложнена серией разнонаправленных сбросов; некоторые из них находят продолжение и в вышележащих отложениях. Основные нефтенасыщенные пласты-коллекторы ланского резервуара в пределах месторождения и куста характеризуются неоднородностью распростране-

ния как по разрезу, так и по площади простирания. Это в основном линзовидные, нередко ограниченные, «ныряющие» пласты толщинами от 0,8 до 5,0 м. При практически выдержанных толщинах горизонта на небольших расстояниях происходит изменение литологического состава, заглинизированность алевро-песчаных разностей, наложение катагенетических изменений, что влияет на ухудшение коллекторских свойств пород и определяет неоднородность распространения компонентов по площади.

Нефтенасыщенные толщи в наилучших коллекторах составляют 7,2, 7,6 и 9,8 м. На остальных участках месторождения суммарные толщины коллекторов изменяются от 0,8 до 9 м. Открытая пористость в песчаных пластах в основном колеблется в пределах 8,9–18,6 %. Перечисленные условия говорят о необходимости серьезного подхода к выбору схемы кустования скважин на месторождениях Припятского прогиба. Знание того, как распределен энергетический потенциал конкретной залежи, который характеризуется картами изобар, имеет первостепенное значение, так как именно на основе этих данных составляется проект наиболее рационального размещения на промысле либо одиночных, либо кустовых скважин. В практике кустового бурения основным критерием определения числа скважин в кусте является суммарный дебит скважин и газовый фактор нефти. Количество скважин в кусте, помимо сетки разработки, наличия одно- или многопластовых залежей и других факторов, определяется технически возможными отклонениями забоев наклонных скважин. Зная примерное число скважин в кусте, переходят к построению плана куста. Планом куста называется схематичное изображение горизонтальных проекций стволов всех скважин, бурящихся с данной кустовой площадки. План куста включает схему расположения устьев скважин, очередность их бурения, направление движения станка, проектные азимуты и смещения забоев скважин. Задача завершается построением схемы куста. Число скважин в кусте может колебаться от 2 до 20–30 и более. Речицкое месторождение в этом плане занимает среднюю позицию, куст состоит из 14 скважин, но для его условий это количество внушительное. Расчеты показывают, что укрупнение кустовых площадок в процессе выбора схем эксплуатации промысла является целесообразным: экономия капиталовложений до 10 %, а длина коммуникаций снижается на 45 %, меньше затраты и на решение экологических проблем. Площадку для кустового бурения обычно располагают там, где по условиям рельефа местности затраты времени и средств будут минимальными. Характер расположения устьев скважин на кустовой площадке играет большую роль и при эксплуатации скважин. Бурить скважины на кустовой площадке можно различным количеством одновременно действующих буровых установок. Буровое и вспомогательное оборудование монтируется таким образом, чтобы при передвижении буровой установки от одной скважины к другой буровые насосы, приемные амбары и часть оборудования для очистки, химобработки и приготовления промывочной жидкости оставались стационарными до момента окончания строительства скважин на данном кусте. При строительстве скважин куста по результатам отклонения ранее пробуренных скважин от проектного положения необходима соответствующая корректировка проектов на бурение последующих скважин. Зона вокруг ствола скважины менее 1,5 м считается опасной с точки зрения встречи стволов. Если в процессе бурения выявляется, что возможно соприкосновение опасных зон двух скважин, бурение продолжают с соблюдением мер, исключающих повреждение обсадной колонны, или корректируют геометрические параметры ствола скважины. Если на плане горизонтальные проекции стволов пересекаются, необходимо определить вер-

тикальные глубины, соответствующие точке пересечения, и указать их. В ходе кустового освоения нефтяных месторождений буровая установка размещается на ограниченной территории по площади. Поэтому практика наклонного бурения показала, что наиболее рациональны два метода компоновки оборудования. По первому методу оборудование разделяют на две части – подвижную и стационарную. В этом случае не все буровое оборудование перемещается с точки на точку. Во втором случае по мере проводки скважин все буровое оборудование перемещают с точки на точку, включая циркуляционную систему, буровые насосы и т. д. На кустах с большими отходами в качестве насосов используют в основном электрические центробежные насосы, а также некоторые виды насосов с гидроприводом. Гидроприводные агрегаты также позволяют обеспечивать подачу ингибиторов, которые защищают от коррозии и парафинистых отложений. Это дает возможность совмещать две технологии: подготовку рабочей жидкости и подготовку нефти, что позволяет экономить на силовых линиях и существенно снизить экологические риски. Кустовые скважины могут быть как отдельными объектами обустройства промыслов, так и входить в состав технологических комплексов. Преимущества кустового бурения ощутимы даже на фоне его сложностей и недостатков.

К осложняющим факторам можно отнести:

- необходимость применения отклонителей с одинаковой интенсивностью искривления ствола скважины;
- повышенное внимание к навигационному обеспечению; первый замер углов искривления после зарезки осуществляют через 25 м, а в дальнейшем через каждые 50 м;
- контролирование расстояния между скважинами, под строгим соблюдением зенитного и азимутального углов с применением забойного ориентирования, основанного на использовании электронной техники;
- при увеличении числа скважин в кусте возрастание отклонения забоев от вертикали, увеличение длины стволов, что приводит к росту затрат на проводку скважин;
- консервирование пробуренных скважин до завершения бурения всех или части скважин куста по техническим причинам, что снижает темпы разработки.

На месторождении был сформирован самый большой куст на сегодняшний день в Беларуси, он насчитывает 14 нефтяных скважин. Их начали бурить осенью 2014 г., закончили в мае 2018 г. На строительство скважин, сгруппированных на близком расстоянии друг от друга, потребовалось четыре года и девять месяцев. На каждую из них – немногим более трех месяцев. Благодаря использованию современных установок отдельные объекты были пробурены в рекордные сроки. Так, скважина № 352 построена менее чем за 80 суток. Структура куста – 10 добывающих скважин и 4 используются для поддержания пластового давления. На локальных кустах скважины, как правило, располагают в форме веера во все стороны, что позволяет иметь на кусте максимальное количество скважин. На структурной карте кровли коллектора ланского горизонта Речицкого месторождения представлено именно такое расположение. Средний дебит одной скважины – 12 т в сутки. Весь куст дает по две цистерны в сутки; плюс попутный газ, его получают по 12–13 тыс. м³.

Однако, по оценке специалистов, кустовое бурение в Беларуси эффективно, полностью оправдано, а также актуален поиск вариантов его усовершенствования с учетом сложных геологических условий Припятского прогиба.

Литература

1. Сооружение и оборудование для кустового бурения скважин : справ. пособие / В. Г. Колчегин [и др.]. – М. : Недра, 1992. – 231 с.
2. Режим доступа: <http://gr.by> © Правда Гомель.
3. Конищев, В. С. Соляная тектоника Припятского прогиба / В. С. Конищев. – Минск : Наука и техника, 1975. – 150 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ СО ВСТРОЕННЫМ КЛАПАНОМ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫМ

В. А. Ермоленко

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

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

На предприятии ООО «Гидросила БЕЛАР» в частности и «Гидросила ГРУП» в целом при проектировании изделий производится технический расчет, анализ целесообразности применения материалов и сплавов, анализ технологичности и испытания готовой продукции. При проектировании новой продукции необходимо обеспечить требуемые характеристики, в том числе и для гидравлического распределителя, который проектируется в рамках дипломного проекта.

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

Динамический расчет распределителя проводится с целью выбора его параметров, обеспечивающих устойчивую работу, анализа возможных автоколебаний, оценки быстроты действия и погрешности регулирования, а также качества переходного процесса.

Для исследования динамики распределителя со встроенным клапаном предохранительным производим расчет передаточных функций. Исходные данные для расчета представлены в таблице.

Исходные данные

Название параметра	Обозначение	Числовое значение
Диаметр золотника	d_p	0,025 м
Давление, подаваемое на распределитель	p_0	0,55 МПа
Давление управления распределителя	p_1	0,35 МПа
Газовая постоянная для воздуха	R	287,14 Дж/(кг · К)
Абсолютная температура воздуха	T	293 К
Время открытия клапана	T_1	0,000411 с
Диаметр клапана	$d_{кл}$	0,006 м
Коэффициент расхода клапана	$\mu_{кл}$	0,61
Перепад давления на клапане	$\Delta p_{кл}$	4,8 МПа
Плотность жидкости	ρ	900 кг/м ³

Сначала находим по отдельности передаточные функции распределителя и клапана. Типовая передаточная функция распределителя [1]–[3]:

$$W_p(p) = \frac{1}{K_1 p}.$$

Для нахождения коэффициента K решим систему уравнений, из которой выразим K :

$$\begin{cases} Q = \sqrt{\frac{2}{RT}} S p_0 \varphi_1 \frac{1}{1 + \varphi_1^2}; \\ S = \pi d_p X. \end{cases}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \sqrt{\frac{2}{RT}} S p_0 \varphi_1 \frac{1}{1 + \varphi_1^2};$$

$$\frac{\pi d_p^2 X}{4t} = \sqrt{\frac{2}{RT}} \pi d_p X p_0 \varphi_1 \frac{1}{1 + \varphi_1^2} \rightarrow K_1;$$

$$K_1 = \frac{d_p (1 + \varphi_1^2)}{4 \sqrt{\frac{2}{RT}} p_0 \varphi_1} = \frac{0,025 (1 + 0,756^2)}{4 \sqrt{\frac{2}{287,14 \cdot 293}} 0,55 \cdot 10^6 \cdot 0,756} = 4,75 \cdot 10^{-6}.$$

В итоге получаем передаточную функцию распределителя:

$$W_p(p) = \frac{1}{4,75 \cdot 10^{-6} \cdot p}.$$

Находим передаточную функцию предохранительного клапана. Типовая передаточная функция:

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{K_2}{T_1 p + 1}.$$

Далее находим коэффициент K и получаем передаточную функцию клапана предохранительного:

$$\begin{cases} Q = \mu_{\text{кп}} S_{\text{кп}} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}; \\ S_{\text{кп}} = \pi d_{\text{кп}} X. \end{cases}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \mu_{\text{кл}} S_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}};$$

$$\frac{\pi d_{\text{кл}}^2 X}{4t} = \mu_{\text{кл}} \pi d_{\text{кл}} X \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \rightarrow K_2;$$

$$K_2 = \frac{d_{\text{кл}}}{4\mu_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}} = \frac{0,006}{4 \cdot 0,61 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 4,8 \cdot 10^6}{900}}} = 23,8 \cdot 10^{-6};$$

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{23,8 \cdot 10^{-6}}{411 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1}.$$

Передаточная функция распределителя со встроенным клапаном предохранительным:

$$W(p) = \frac{1}{4,75 \cdot 10^{-6} \cdot p} \cdot \frac{23,8 \cdot 10^{-6}}{411 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1};$$

$$W(p) = \frac{23,8}{1952,25 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 4,75 \cdot p}.$$

Строим переходную характеристику (рис. 1).

Исходя из переходной характеристики, определяем период, колебательность, частоту колебаний и погрешность регулирования:

$$T_{\text{п}} = T_3 - T_2 = 0,0313 - 0,019 = 0,0123 \text{ с};$$

$$M = \frac{t_{\text{пер}}}{T_{\text{п}}} = \frac{0,016}{0,0123} = 1,3;$$

$$f = \frac{1}{T_{\text{п}}} = \frac{1}{0,0123} = 81,3 \text{ Гц};$$

$$\delta = \frac{0,5(A_2 - A_3)}{A} = \frac{0,5(2,124 - 1,875)10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,06 \text{ \%}.$$

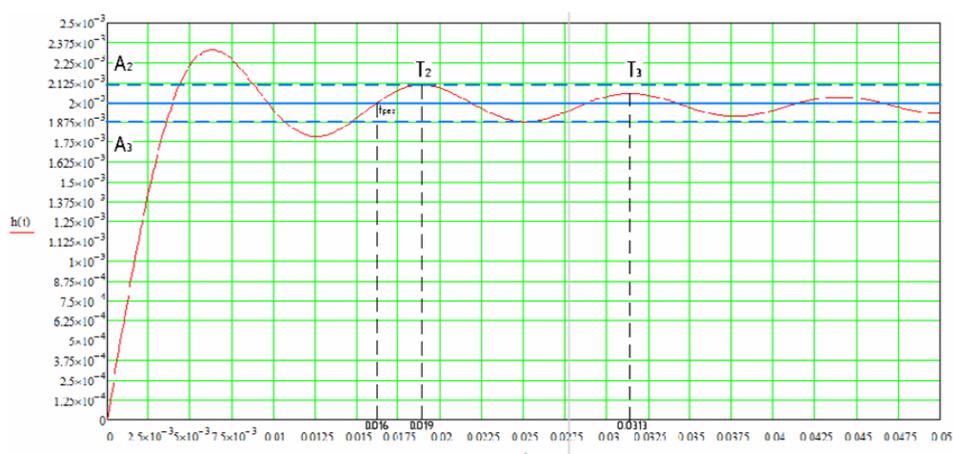


Рис. 1. Переходная характеристика исследуемого распределителя

Разработана методика определения динамических характеристик распределителя, которая учитывает влияние встроенного клапана предохранительного. Представленная математическая модель позволяет получить следующие характеристики: период, кобательность, частоту колебаний и погрешность регулирования при определении динамики распределителя. Такая методика может применяться для расчета других распределителей данного типа на производстве и в теоретических исследованиях.

Литература

1. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин: Теория системного автоматического управления : учеб. пособие для вузов / В. П. Автушко [и др.] ; под ред. Н. В. Богдана, Н. Ф. Метлюка. – Минск : ПИОН, 2001. – 396 с.
2. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д. Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 424 с.
3. Руководство по проектированию систем автоматического управления : учеб. пособие для вузов / под ред. В. А. Бесекерского. – М. : Высш. шк., 1983. – 296 с.

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ МАСШТАБОВ ЗАСОЛОНЕНИЯ И РАССОЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ РАЗВЕДКЕ И РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

С. Л. Порошина, В. А. Семенова

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

А. Д. Порошина

Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, г. Москва

Научный руководитель В. Г. Жогло

Нефтяные и газовые месторождения Припятской нефтегазоносной области (НГО), нефтегазоносных провинций (НПП) и областей юга Сибирской платформы, бассейна Чу-Сарысу, центральной части Северо-Западноевропейской провинции, Триасовой провинции в Алжире, нефтегазоносных бассейнов штата Мичиган в США, а также

ряда других нефтегазоносных регионов мира залегают в засоленных породах-коллекторах. Такие породы широко представлены в подсолевом и межсолевом нефтегазоносных комплексах Припятского прогиба и юга Сибирской платформы. Засолонение пород существенно ухудшает их пористость и проницаемость, что снижает эффективность проводимых геологоразведочных работ на нефть и газ в участках его наиболее интенсивного проявления. Способность галита, частично или полностью заполняющего первичное пустотное пространство пород продуктивных горизонтов, растворяться при взаимодействии с закачиваемыми для ППД водами, приводит к существенному изменению емкостных и фильтрационных свойств коллекторов в процессе разработки нефтяных залежей, что оказывает заметное влияние на эксплуатацию скважин и месторождений углеводородов (УВ). Все это свидетельствует о необходимости всестороннего изучения данного процесса и учета особенностей его проявления при проведении поисково-разведочных работ, подсчете запасов, анализе, контроле, моделировании и регулировании разработки нефтяных залежей [1].

Засолонение пород Лено-Тунгусской НГП и Припятской НГО отмечено в середине 20-го столетия при изучении литологического состава подсолевых и межсолевых отложений в 60–70-е гг. прошлого столетия. Впервые на наличие кристаллов галита в продуктивных горизонтах Марковской площади юга Сибирской платформы указывали В. С. Муляк и Ф. Н. Яковенко (1965), а также Ю. И. Марьенко с В. Г. Постников (1967). В настоящее время засоленность пород коллекторов фиксируется здесь практически на всех нефтегазопроисловых площадях и месторождениях УВ. Первые сведения о засоленности межсолевых и подсолевых пород Припятского прогиба нашли отражение в опубликованных работах А. В. Кудельского и К. М. Обморышева (1971), Р. С. Сахибгареева (1974), В. В. Панова (1975), В. Л. Тюменцева (1977). Наиболее полная характеристика этих, а также авторских данных по засолонению пород различных регионов можно найти в обобщающих работах А. А. Махнача (1982, 1989). При этом первоначально литологическое, описательное исследование засоленных пород, присущее большинству исследователей, переводится в плоскость комплексного литогидрогеохимического изучения условий формирования галитовых выделений в пустотном пространстве подэвапоритовых толщ. В этот же период появляются работы преимущественно гидрогеохимического исследования данной проблемы. Делаются попытки решить эти вопросы путем изучения степени насыщенности пластовых вод подсолевых и межсолевых комплексов по хлориду натрия (В. Г. Жогло, 1977; Букаты и др., 1981), а также путем восстановления гидрогеохимических условий, существовавших во время засолонения коллекторов по сведениям о химическом составе вторичного галита (В. Л. Тюменцев, 1977; В. Д. Порошин, 1981; А. А. Махнач, В. В. Шиманович, 1988).

Литологическое исследование подсолевых и межсолевых пород рассматриваемых регионов указывало на широкое распространение засоленных пород. Массовые лабораторные исследования степени заполнения пустотного пространства нефтегазоносных пластов вторичным галитом по ряду скважин нефтяных и газовых месторождений Восточной Сибири, Республики Саха (Якутия), а также Беларуси свидетельствовали о существенном влиянии процесса засолонения на их пористость и проницаемость [1], [2]. В разных районах рассматриваемых территорий устанавливается приуроченность засолонения к определенным литофациям. Однако такими исследованиями охарактеризована лишь небольшая часть разреза отдельных скважин, что не позволяло корректно оценить масштабы проявления процесса галитизации пород подсолевых и межсолевых комплексов. Учитывая то, что засолонение по-

род произошло в катагенезе и связано с выпадением галита из рапы древних соленосных бассейнов и межкристалльных рассолов соленосных толщ, оценить количественно масштабы проявления этих процессов путем изучения современного состава пластовых вод подсолевых и межсолевых комплексов также не представляется возможным. Более обстоятельно такая оценка может быть проведена при изучении процесса рассоления таких коллекторов в процессе эксплуатации нефтяных месторождений, разработка которых ведется с закачкой в продуктивные пласты пресных или слабоминерализованных вод для поддержания пластовых давлений в залежах и вытеснения нефти к забоям добывающих скважин. Впервые такой подход к оценке масштаба засоления продуктивных пород был предложен и апробирован в 1996 г. В. Д. Порошиным на примере ряда наиболее крупных белорусских залежей нефти. С этого времени такого рода исследования начали проводиться регулярно для большинства скважин белорусских нефтяных месторождений, добывающих обводненную продукцию. В результате этих исследований установлены существенные масштабы растворения галитовых выполнений трещин, пор и каверн продуктивных горизонтов по ряду нефтяных залежей при их разработке. Показано, что эти процессы активно продолжаются на всех белорусских залежах, разработка которых ведется с закачкой пресных и слабоминерализованных вод, и в настоящее время. Результаты такой оценки, выполненной одним из авторов (С. Л. Порошина, 2020) с использованием новых методических приемов [3] по воронежской залежи Золотухинского месторождения, приведены в таблице.

Общий объем растворенного и вынесенного с попутными водами галита за весь период эксплуатации залежи оценивается в 7581 м^3 . Построенные по этим данным схематические карты свидетельствуют о том, что для западной части воронежской залежи нефти характерны повышенные значения этих показателей. Отмеченная особенность может свидетельствовать в пользу того, что вытеснение нефти к забоям добывающих скважин в данной части залежи происходило в целом более равномерно, чем в восточной. Перемещение смешанных вод, вытеснявших нефть в западной части залежи, происходило с охватом непромытых и слабо промытых коллекторов. В восточной же части залежи основная доля закачиваемой воды прорывалась к скважинам по отмытым от галита каналам, что приводило к слабому охвату вытеснением нефти из коллекторов с более низкими фильтрационными свойствами.

Приводимые выше материалы свидетельствуют о том, что оценку масштабов засоленности продуктивных коллекторов нефти и газа и изучения процесса их рассоления при разработке залежей углеводородов целесообразно проводить комплексно, используя методы литологических, литолого-фациальных, гидрогеохимических и промысловых гидрохимических (литогидрогеохимических) исследований.

Результаты расчета объемов растворенного в продуктивных пластах и вынесенных попутными водами галита для воронежской залежи Золотухинского месторождения

Скважина	Этап	Интервал времени, месяц, год	$Q_{\text{поп.в.}}$, тыс. м ³	$Q_{\text{тех.обр.}}$, тыс. м ³	$Q_{\text{поп.в.}} - Q_{\text{тех.обр.}}$, тыс. м ³	NaCl _{изб.} , мг/л	m_{NaCl} , т	V_{NaCl} , м ³
56		02.02–н. в.	19,163	2,809	16,354	81272	1329	618
58		07.01–н. в.	33,555	5,754	27,801	82483	2293	1067
73		09.06–н. в.	22,416	2,198	20,218	31511	637	296
74		01.03–01.10	3,259	0,160	3,099	14850	46	21

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ В КОМПАС-3D С ФОТОРЕАЛИСТИЧНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ И АНИМАЦИЕЙ СБОРОЧНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ ОСНАСТКИ

А. С. Корчевский, Е. А. Дубровец, Р. А. Судаков, В. О. Раков

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

Научный руководитель С. Н. Целуева

Проектирование штамповой оснастки – достаточно сложный и трудно формализуемый процесс, который учитывает большое количество факторов как конструкторского, так и технологического характера, особенности технологической подготовки производства и производственные возможности конкретного предприятия. Более того, имеет место многовариантность проектирования оснастки, как и любой другой сложной технической системы. Тем не менее за весь период развития машиностроения накоплен богатый производственный опыт проектирования технологической оснастки для штамповки, разработано большое количество типовых конструкций штампов, универсальных штампов [1], [2], многие элементы пакетов и блоков штампов стандартизированы, что стало благоприятным фактором, позволившим в свое время повысить качество и сократить сроки проектирования оснастки. Однако это характеризует предыдущие этапы развития технологической подготовки производства в машиностроении.

Сегодня реальное производство и цифровые процессы объединяются, происходит интеграция производства и современных информационных и коммуникационных технологий. Развитие и внедрение IT-технологий в машиностроении требует внедрения и новых методик и подходов к проектированию технологической оснастки, которые успешно могли бы быть реализованы в условиях всеобъемлющей цифровой системы [0].

Цель работы – реализация методики проектирования штамповой оснастки, основанной на технологии сквозного 3D-моделирования, с последующей обработкой электронной сборочной 3D-модели оснастки в системе фотореалистичного рендеринга и созданием анимационного видеопроцесса функционирования сборки.

Для достижения цели выполнялись работы по созданию сборочных 3D-моделей штампов с использованием функционала системы автоматизированного проектирования (САПР) процесса функционирования сборки.

КОМПАС-3D и по их визуализации в интерфейсе системы SolidWorks.

Работа имеет конструкторскую направленность и реализована на примере четырех штампов: штамп для выполнения операции Вырубка-вытяжка для детали «Диск», эскиз которой представлен на рис. 1, *а*; штамп для выполнения операции Гибка для деталей «Поддержка» (рис. 1, *б*) и «Кронштейн» (рис. 1, *в*); штамп для выполнения операции Пробивка для детали «Диск», эскиз которой представлен на рис. 1, *г*.

Проектирование электронных сборочных 3D-моделей штампов в КОМПАС-3D осуществлялось в соответствии с методикой, позволяющей создать сборку «от центра – к периферии», в следующей последовательности:

1. *Создание 3D-моделей деталей (изделий), получаемых в штампах* (применялись как формообразующие операции для моделирования твердых тел, так и специализированные операции для моделирования деталей из листовых материалов), с фиксацией их положения в сборочных 3D-моделях штампов.

2. *Создание рабочих деталей пакетов штампов.* По геометрии эскизов внутренних контуров деталей проектировались 3D-модели таких рабочих деталей штам-

пов, как пуансоны, а по геометрии эскизов внешних контуров – 3D-модели матриц. Все компоненты 3D-моделей штампов размещались друг относительно друга по сопряжениям.

3. *Проектирование пакетов и блоков штампов.* Важной особенностью данного шага является то, что 3D-модели направляющих деталей, плит, хвостовиков и других деталей блоков можно добавлять в сборку из 3D-библиотек деталей и узлов штампов, а стандартные изделия пакетов и блоков (крепежные элементы и пр.) – из 3D-библиотек стандартных изделий КОМПАС-3D, что существенно сокращает время проектирования и позволяет соблюдать требования стандартизации при проектировании штамповой оснастки.

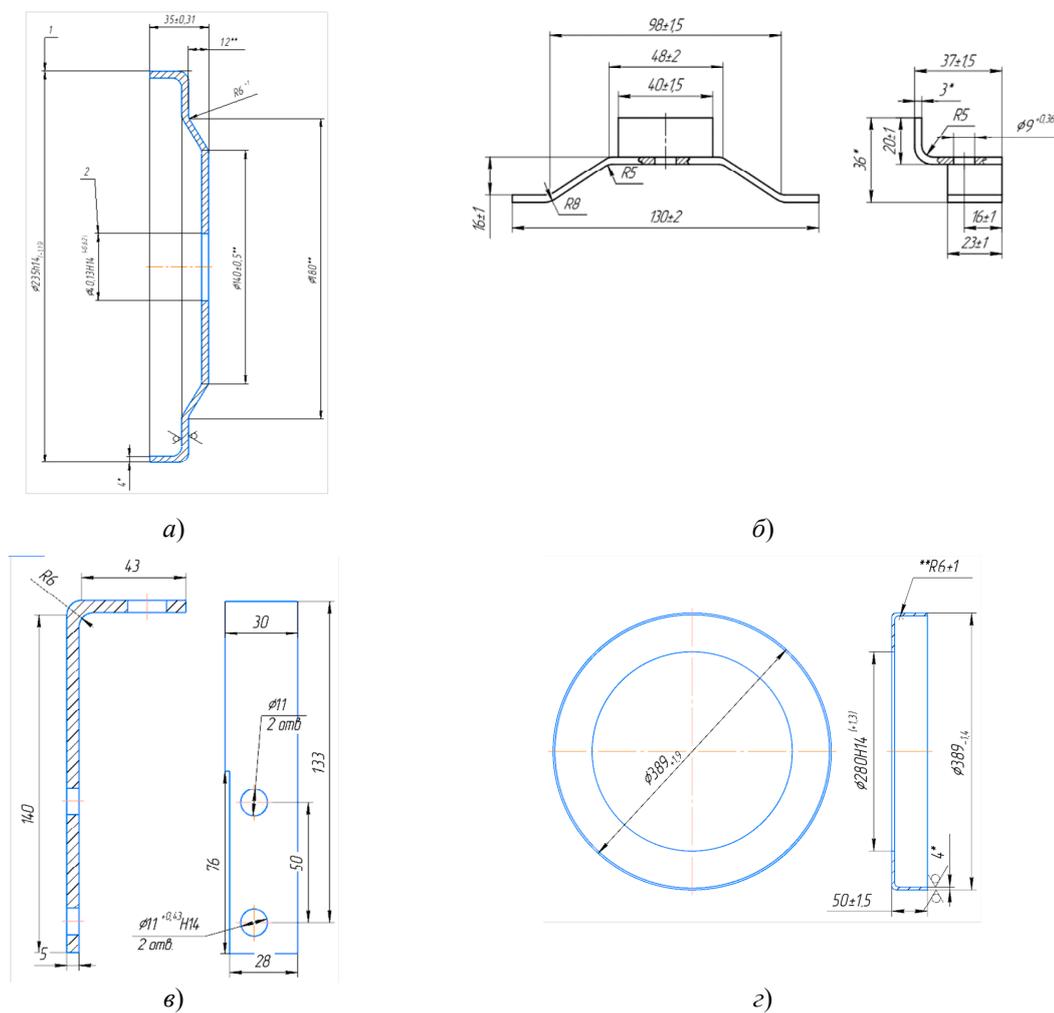


Рис. 1. Операционные эскизы деталей:
а – «Диск»; б – «Поддержка»; в – «Кронштейн»; г – «Диск»

Последовательность реализации в КОМПАС-3D методики создания сборочных 3D-моделей штампов «от центра – к периферии» для детали «Диск» показана на рис. 2.

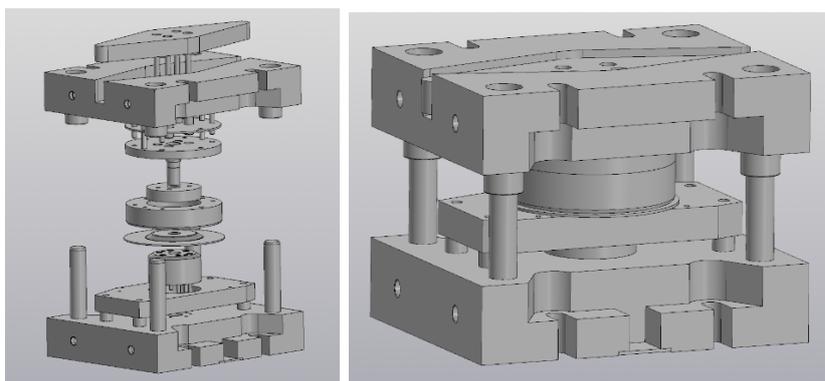


Рис. 2. Последовательность создания сборочной 3D-модели штампа для детали «Диск» и 3D-модель штампа в собранном виде

Такая методика проектирования штампов в САПР позволяет на любом этапе проектирования их сборочных 3D-моделей устранять ошибки, возникающие при проектировании, вносить изменения в конструкцию штампов, способствует сокращению времени на проектирование и повышению качества проектов. Следует отметить, что для сборочных 3D-моделей штампов и для каждой 3D-модели их деталей можно автоматически сформировать ассоциативные чертежи. Изображения полученных в автоматическом режиме проекций деталей необходимо несколько доработать для их соответствия ЕСКД.

Спецификации на штампы формировались автоматически в процессе проектирования штампов и наполнения сборочных 3D-моделей отдельными параметрическими 3D-моделями деталей из 3D-библиотеки деталей и узлов штампов.

На следующем этапе работы выполнена фотореалистичная визуализация 3D-моделей штампов. 3D-визуализация – это раздел проектирования, который наглядно показывает, как будет выглядеть проектируемый объект до реализации проекта в металле.

Для выполнения фотореалистичной визуализации 3D-модели штампов, созданные в КОМПАС-3D, импортировались в систему SolidWorks Visualize, в интерфейсе которой для них выбирались варианты освещения, постановки камеры, отражения поверхностей, фоны объектов, задавались материалы и их структуры и пр.

Процесс визуализации 3D-модели штампа для детали «Диск» представлен на рис. 3, а результат визуализации всех 3D-моделей штампов – на рис. 4.

В завершение в системе SolidWorks Visualize выполнена анимация подвижных деталей 3D-моделей спроектированных штампов, что позволило видеть в виртуальном пространстве процесс работы штампов. Преимущество создания анимированного представления сборочной 3D-модели штампа заключается в том, что еще на этапе создания рабочего проекта оснастки можно увидеть в реальном времени процесс ее сборки-разборки и функционирования, своевременно выявить и устранить ошибки, исключив необходимость проведения столь дорогостоящего этапа ТПП, как освоение оснастки.

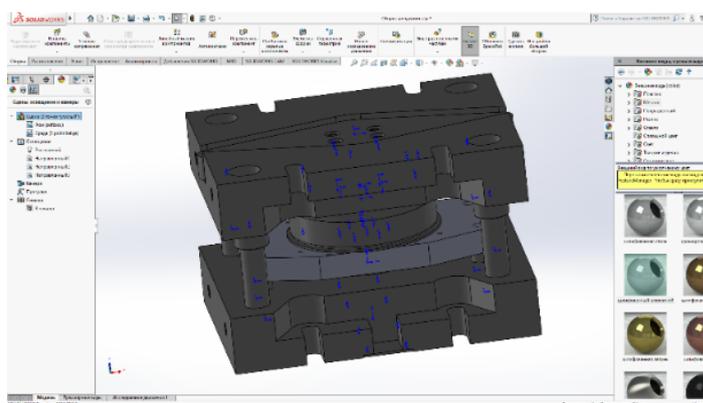


Рис. 3. Процесс визуализации в системе SolidWorks Visualize 3D-модели штампа для детали «Диск»

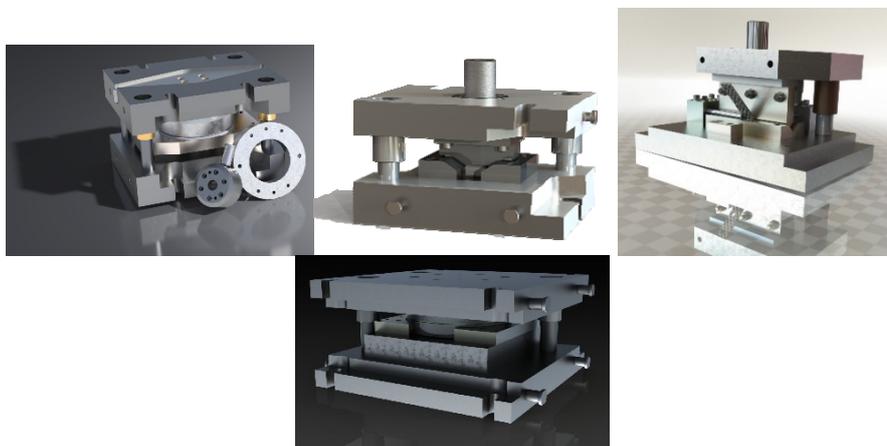


Рис. 4. Фотореалистичные представления спроектированных 3D-моделей штампов

Выполненная работа наглядно демонстрирует реализацию и несомненные преимущества современной методики проектирования штамповой оснастки в САПР, основанной на технологии сквозного 3D-моделирования и позволяющей успешно осуществлять процесс проектирования оснастки в условиях всеобъемлющей цифровой системы, где применяются различные программные продукты, работающие согласованно в едином информационном пространстве, основой которого является 3D-модель изделия.

Литература

1. Фойгельман, Г. А. Альбом конструкций универсальных штампов блоков и узлов для холодной штамповки / Г. А. Фойгельман. – 3-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1980. – 112 с.
2. Мещерин, В. Т. Листовая штамповка. Атлас схем / В. Т. Мещерин. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 227 с.
3. Черепашков, А. А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении : учеб. пособие / А. А. Черепашков, Н. В. Носов. – СПб. : Проспект Науки, 2018. – 592 с.

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

Э. Л. Бекиров, Э. Ш. Джемилов

*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
г. Симферополь*

Обработка отверстий спиральными сверлами является одной из наиболее распространенных операций механической обработки. Процесс сверления связан с малой жесткостью инструмента, в результате чего формообразующие движения его вершины могут значительно отличаться от движений исполнительных органов технологического оборудования, вызывая тем самым развитие геометрических погрешностей отверстия. Сверло является также наименее прочным элементом во всей технологической системе, поэтому возмущающие факторы, присущие процессу сверления, зачастую приводят к его поломке. С технологической точки зрения гарантировать требуемое качество отверстия после выполнения операции сверления достаточно трудно [1].

Анализ работ [2]–[4] показал, что применяемые методики разработаны для исследования и определения конкретного параметра в процессе сверления.

Изучение механики контактного взаимодействия инструмента с деталью на основе теории упруго-пластического деформирования является актуальным направлением исследования.

Разработка на основе научных положений теории резания материалов и механики контактного взаимодействия при сверлении методики для комплексного исследования с использованием датчиков высокой точности и быстродействия для получения потока данных, адекватных протекающему процессу, позволит за один проход инструмента выявить зависимости между несколькими параметрами.

Предлагаемая методика для исследования процесса сверления включает в себя сложный измерительный аппарат, регистрирующий за один проход инструмента сигналы пяти параметров (рис. 1).

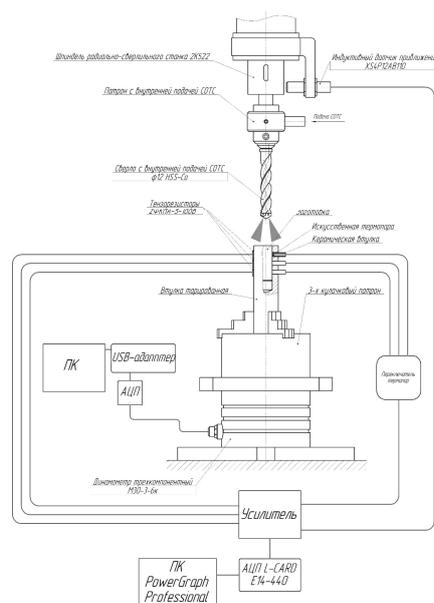


Рис. 1. Схема методики для комплексного исследования процесса сверления

Определение контактных нагрузок основано на измерении тензометрией с использованием тензорезисторов 2 ФКПА-5-100В.

Температура фиксируется искусственной термопарой «хромель – алюмель».

Для определения колебания инструмента за время сверления применяется индукционный датчик приближения XS4P12AB110.

Регистрация параметров крутящего момента и составляющих силы резания производится при помощи трехкомпонентного динамометра МЗО-3-6К.

Согласно схеме методики исследования создан экспериментальный стенд, установленный на радиально-сверлильном станке модели 2К522 (рис. 2).

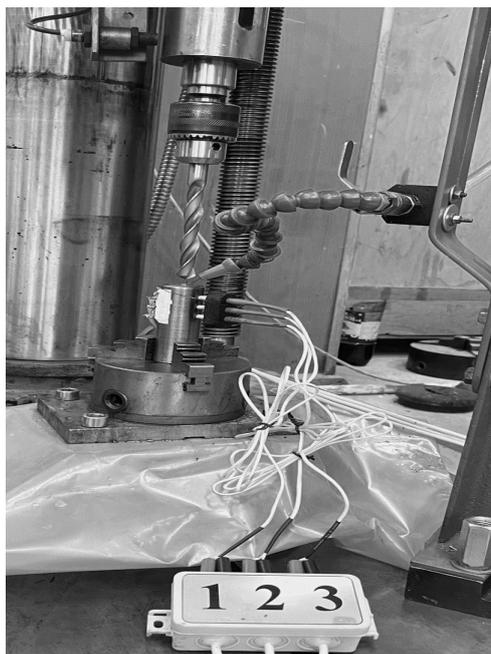


Рис. 2. Стенд для проведения экспериментов в динамике

Сигналы, выдаваемые тензорезисторами, термопарой, индуктивным датчиком приближения, а также значения крутящего момента и составляющие силы резания записываются и отображаются на мониторе компьютера (рис. 3 и 4).

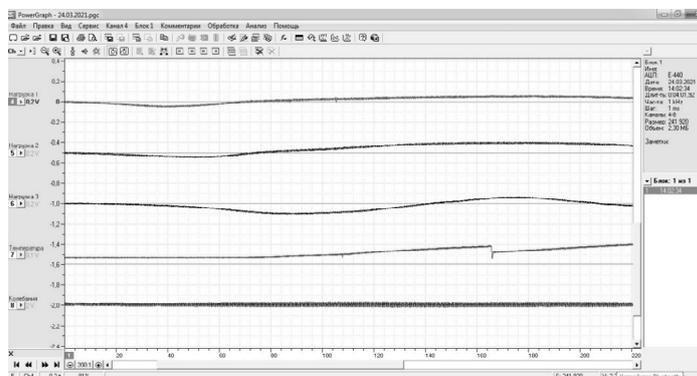


Рис. 3. Интерфейс записанных сигналов, выдаваемых тензорезисторами, термопарой и индуктивным датчиком приближения

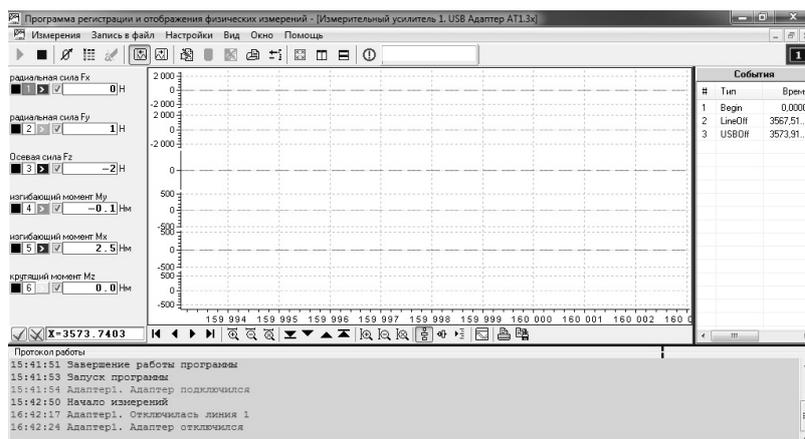


Рис. 4. Интерфейс записанных сигналов крутящего момента и составляющих силы резания

Предполагается проведение экспериментов, где в качестве заготовок будут использованы Ст.40Х, ШХ15 и 18ХН10Т, в качестве СОТС – эмульсия, масло минеральное и масло синтетическое, инструмент – сверло спиральное и с внутренней подачей СОТС.

Предлагаемая методика позволяет за один проход инструмента определить контактные нагрузки, температуру, колебание инструмента, крутящий момент и составляющие силы резания. Необходимо отметить, что при комплексном подходе к исследованию процесса сверления присутствующие погрешности технологической системы равнозначны для всех определяемых значений параметров.

Л и т е р а т у р а

1. Быкадор, В. С. Повышение точности обработки глубоких отверстий спиральными сверлами на основе раскрытия нелинейных эффектов динамики процесса : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / В. С. Быкадор. – Ростов н/Д, 2011. – 242 с.
2. Огневенко, Е. С. Повышение производительности обработки отверстий путем выбора оптимальных режимов резания на основе анализа динамики процесса сверления : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 ; 05.02.08 / Е. С. Огневенко. – Барнаул, 2010. – 150 с.
3. Афанасьев, К. В. Диагностирование зоны резания методами бесконтактного контроля при сверлении углеродсодержащих сплавов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / К. В. Афанасьев. – М., 2012. – 168 с.
4. Шашин, А. Д. Исследование влияния СОЖ на процесс взаимодействия инструмента и заготовки при обработке металлов резанием : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / А. Д. Шашин. – М., 2003. – 118 с.

АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КЛАПАННОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ

Е. В. Хазеев, С. А. Рогов

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

В последнее время в области машиностроения появляется большое количество машин, гидравлические системы которых основаны по принципу адаптации к нагрузке, т. е. по принципу *LS*-регулирования. Одна из главных проблем современных

гидроприводов – излишние потери мощности в гидросистемах при одновременном дроссельном регулировании нескольких исполнительных органов, системы с *LS*-регулированием успешно решают данную проблему. Достоинствами гидросистем с *LS*-регулированием являются экономичность, низкие потери энергии, большой срок эксплуатации рабочей жидкости по сравнению с системами с дроссельным управлением. Недостатком таких систем является высокая стоимость элементов, а также трудности при ремонте данных гидросистем.

Одним из видов гидросистем *LS*-регулирования, получивших широкое применение, являются гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке. В гидросистеме с клапанной адаптацией к нагрузке для поддержания постоянной разности давлений между входным давлением системы и наибольшим давлением на рабочих органах используются гидравлические клапана разности давлений. Примером гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке является гидросистема машины рубильной «Belarus МР-40» [1].

Целью работы является анализ гидравлической системы машины рубильной «Belarus МР-40».

В гидросистеме рубильной машины «Belarus МР-40» (рис. 1) применяется нерегулируемый аксиально-поршневой насос с рабочим объемом 28 см³. Пропорциональные распределители PVG 32 являются чувствительными к нагрузке. Расход рабочей жидкости в гидросистеме машины рубильной «Belarus МР-40» регулируется клапанным способом с адаптацией к нагрузке при помощи данных пропорциональных распределителей [1].

В гидросистеме рубильной машины «Belarus МР-40» (рис. 1) применяется два данных типа распределителей: для аутригеров и кабины машины – 3-секционный пропорциональный распределитель «PVG32»; для манипулятора – 6-секционный пропорциональный распределитель «PVG32». Это позволяет обеспечить в гидросистеме отсутствие взаимных помех при совмещении рабочих операций нескольких исполнительных органов и индивидуально устанавливать величину давления для каждой рабочей гидролинии. Также при работе системы наблюдается быстрое реагирование на требования системы к расходу и давлению, и питание нескольких исполнительных механизмов от одного нерегулируемого насоса.

Основные параметры работы гидросистемы рубильной машины «Belarus МР-40» представлены в таблице.

Основные показатели, гидросистемы рубильной машины «Belarus МР-40»

Показатель	Значения
Мощность рубильной машины	156 кВт
Максимальное давление	21 МПа
Максимальный расход	60 л/мин

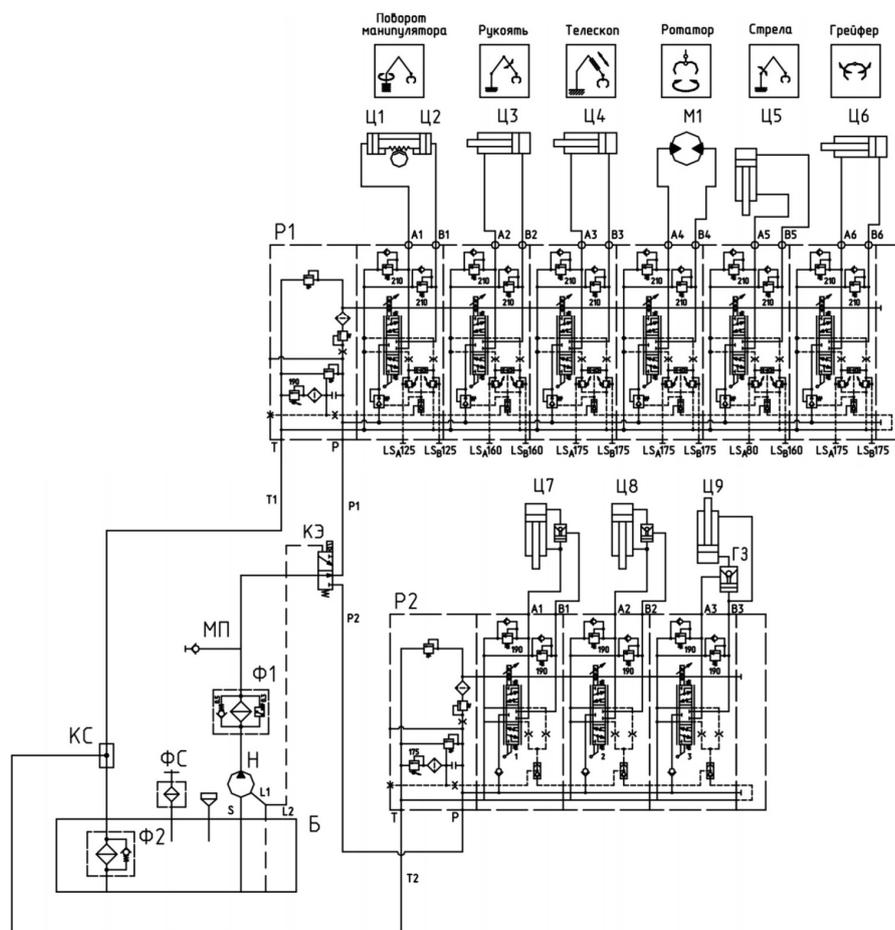


Рис. 1. Схема принципиальная гидравлическая гидроманипулятора, аутригеров и кабины машины рубильной «Belarus MP-40»:
 Н – насос аксиально-поршневой; Б – бак; КЭ – клапан электромагнитный;
 КС – кодовка сливная; М1 – гидромотор ротора; P1, P2 – распределители;
 Ф1, Ф2, ФС – фильтры; Ц1, Ц2 – гидроцилиндры поворота манипулятора;
 Ц3 – гидроцилиндр рукоятки; Ц4 – гидроцилиндр телескопа; Ц5 – гидроцилиндр
 стрелы; Ц6 – гидроцилиндр грейфера; Ц7, Ц8 – гидроцилиндры аутригеров;
 Ц9 – гидроцилиндр кабины; ГЗ – гидрозамок

Анализ систем с клапанной адаптацией к нагрузке по уровню потерь мощности возможно выполнить, используя известные зависимости [2]:

$$\Delta N = \Delta p_{lsk} \cdot Q_0 + \max(p_i) \left(Q_0 - \sum_{i=1}^n Q_i \right) + \sum_{i=1}^n (\max(p_i) - p_i) Q_i, \quad (1)$$

где Δp_{lsk} – разность давлений между входным давлением гидросистемы и давлением на наиболее нагруженном рабочем органе (LS -перепад) для гидросистем с клапанной адаптацией к нагрузке; p_i – давление в рабочей полости i -го исполнительного органа; Q_i – расход на i -м исполнительном органе; Q_0 – входной расход гидропривода (подача насоса) однопоточной системы с клапанной адаптацией.

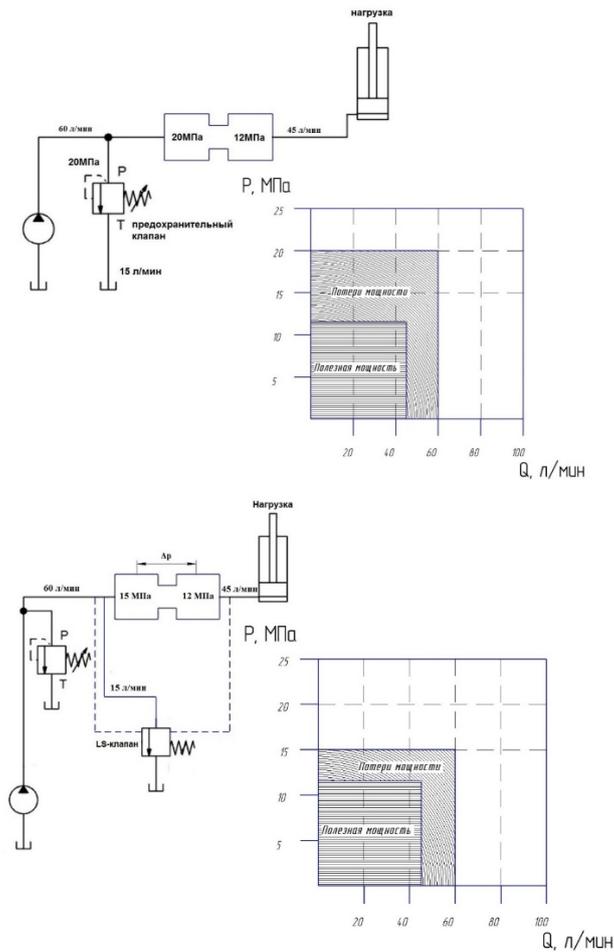


Рис. 2. Энергетический баланс систем с дроссельным регулированием и с регулированием клапанной адаптацией к нагрузке

Применение в рубильной машине «Belarus МР-40» гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке весьма выгодное и разумное решение, поскольку по показателю потерь мощности данный тип системы эффективнее, чем применение дроссельного управления.

Сравним энергетический баланс для каждого типа систем при полезной мощности [3]:

$$N_{\text{пол}} = \frac{45 \text{ л/мин} \cdot 12 \text{ МПа}}{60} = 9 \text{ кВт.}$$

Система с дроссельным управлением:

$$N_{\text{потр}} = \frac{60 \text{ л/мин} \cdot 20 \text{ МПа}}{60} = 20 \text{ кВт.}$$

Система с клапанной адаптацией к нагрузке:

$$N_{\text{потр}} = \frac{60 \text{ л/мин} \cdot 15 \text{ МПа}}{60} = 15 \text{ кВт.}$$

В результате сравнения гидросистема с клапанной адаптацией к нагрузке имеет преимущество перед гидросистемой с дроссельным регулированием по уровню потерь мощности.

Анализ гидросистемы рубильной машины «Belarus МР-40» показывает, что применение принципа клапанной адаптации к нагрузке по показателю энергетической эффективности является лучшим решением, чем стандартное дроссельное регулирование. Также по показателю быстродействия системы с клапанной адаптацией к нагрузке являются лучшими из систем, представленных в современном машиностроении. Однако на широкое внедрение данного типа систем существенным образом влияет ограниченность заданных параметров работы. При работе в системах со средним и высоким давлением клапанная адаптация проигрывает объемной по множеству факторов. В связи с этим применение клапанной адаптации к нагрузке в каждом конкретном случае должно быть обосновано и подкреплено совокупностью положительных факторов системы.

Литература

1. Машина рубильная «Belarus МР-40». Руководство по эксплуатации «МР40-00010» РЭ. – Мозырь : Мозыр. машиностр. завод, 2009. – 129 с.
2. Гинзбург, А. А. Сравнение однопоточных гидросистем с объемной и клапанной адаптацией к нагрузке по уровню потерь мощности / А. А. Гинзбург, Д. Л. Стасенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – Вып. 3. – С. 67–74.
3. Шошиашвили, М. Э. Системы управления гидропневмоприводами : учеб.-метод. пособие для практ. занятий / М. Э. Шошиашвили ; Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова. – Новочеркасск : ЮРГПУ(НПИ), 2017. – 94 с.

АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ОБЪЕМНОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ

Е. В. Хазеев

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

В современном машиностроении разработчики при проектировании наиболее часто выбирают гидравлические системы с адаптацией к нагрузке (*LS*-системы, от словосочетания *Load sensing*), которые решают ключевую проблему одновременного дроссельного регулирования скоростей нескольких рабочих органов гидравлического привода – проблему излишнего уровня потерь мощности в гидросистеме. Достоинствами гидросистем с *LS*-регулированием являются низкие потери энергии, экономичность, малый нагрев от дросселирования и, следовательно, меньшее окисление и больший срок эксплуатации рабочей жидкости по сравнению с системами с дроссельным управлением. Недостатки *LS*-систем заключаются в высокой стоимости и технической сложности элементов, а также трудности ремонта и диагностики данных систем.

Одним из видов широко применяемых *LS*-систем являются системы с объемной адаптацией к нагрузке. Массовость использования таких систем обусловлена тем, что по уровню потерь мощности данные *LS*-системы являются более эффективными, чем системы с дроссельным регулированием или системы с клапанной адаптацией к нагрузке. В качестве рассматриваемого примера системы с объемной адаптацией к нагрузке представлена гидросистема энергонасыщенного трактора «Belarus 3022В» [1].

Целью настоящей работы является анализ гидравлической системы энергонасыщенного трактора «Belarus 3022В».

В тракторе «Belarus 3022В» установлена универсальная гидросистема управления рабочими органами с регулирующим насосом, с объемной адаптацией к нагрузке управляемая при помощи пропорциональных и логических клапанов сравнивающих давление по сливу и напору (гидравлическое управление) имеет ряд достоинств и недостатков.

Основным достоинством данной гидросистемы трактора является ее энергетические возможности (см. таблицу). Гидросистема работает с различными системами трактора независимыми друг от друга, с гидравлической запиткой от одного насоса с регулируемым расходом. Такими системами, в частности, являются автоматическая система регулирования положением навесного орудия, система управления бортовыми, выносными гидроцилиндрами. Также следует отметить, что данная следящая система работает непрерывно, так как используется гидравлическое управление.

Основные показатели, характеризующие энергетические возможности гидросистемы трактора «Belarus 3022В»

Показатель	Значения
Мощность трактора	220 кВт
Максимальное давление	20 МПа
Максимальный расход	120 л/мин
Функциональные свойства:	
– регулирование расхода	Объемное
– автоматическое регулирование навески	Электронное
– ограничение расхода для внешних потребителей	Объемное

Сравнительный анализ систем с адаптацией к нагрузке возможно выполнить, используя известные зависимости [2]:

$$\Delta N_0 = \Delta p_{iso} \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^n (\max(p_i) - p_i) Q_i, \quad (1)$$

где Δp_{iso} – разность давлений между входным давлением гидросистемы и давлением на наиболее нагруженном рабочем органе (LS -перепад) для гидросистем с объемной адаптацией к нагрузке; p_i – давление в рабочей полости i -го исполнительного органа; Q_i – расход на i -м исполнительном органе.

В гидроприводах с объемной адаптацией к нагрузке характерный уровень максимального давления составляет от 10 до 25 МПа, но среднее значение максимального давления в гидросистеме p_0 за цикл является меньшим. Такие гидросистемы можно подразделить на системы низкого (со средним значением $p_0 < 12$ МПа), среднего ($12 < p_0 < 20$ МПа) и высокого ($p_0 > 20$ МПа) давления [2].

Результаты анализа показывают, что применение в тракторе «Belarus 3022В» гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке – более разумное решение, чем применение стандартного дроссельного управления.

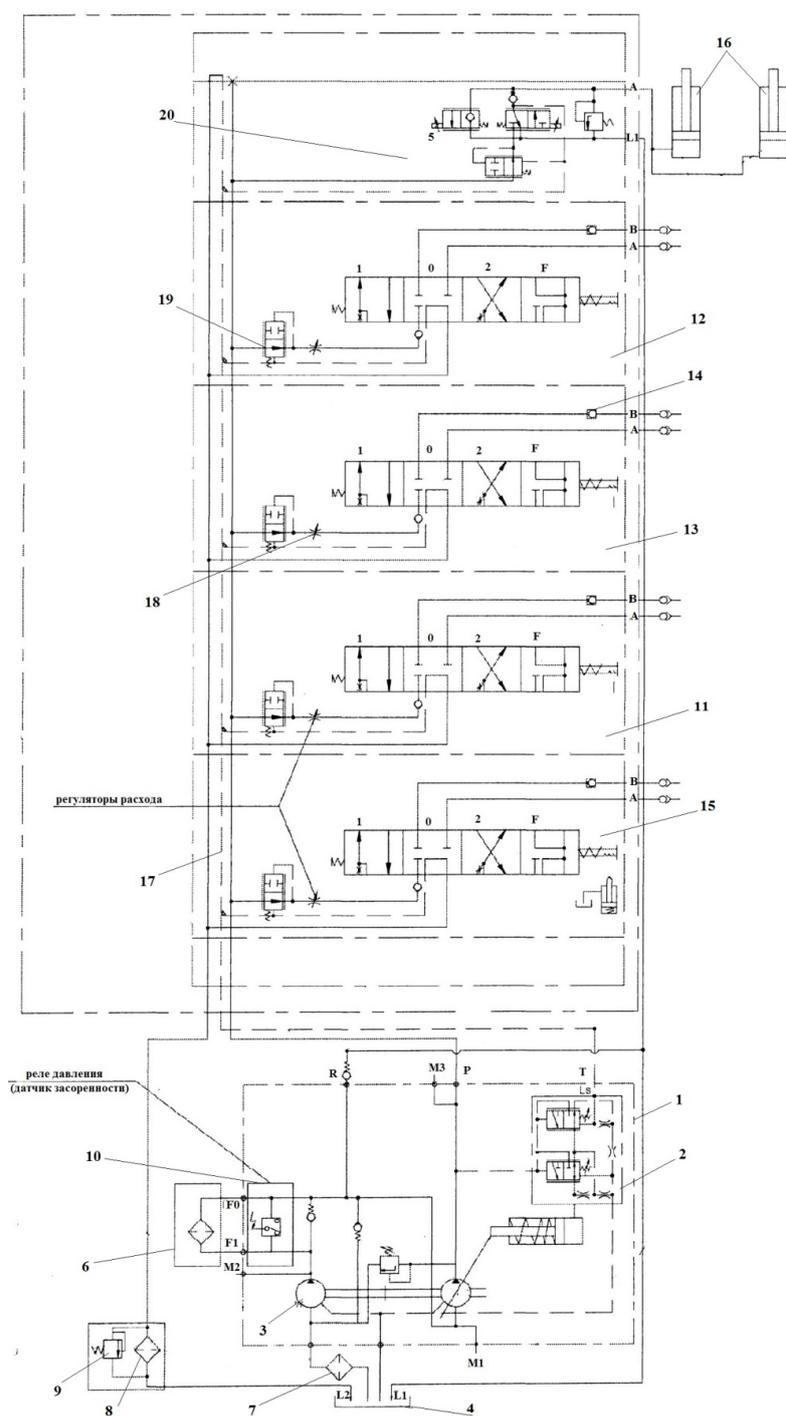


Рис. 1. Схема принципиальная гидравлическая трактора «Belarus 3022В»:
 1 – насос аксиально-поршневой; 2 – регулятор аксиально-поршневого гидронасоса;
 3 – насос подпитки; 4 – масляный бак; 5 – клапан редукционный;
 6–8 – фильтры; 9 – предохранительный клапан; 10 – реле давления (датчик засорения фильтра); 11–13 – секции выносных гидроцилиндров;
 14 – обратный клапан; 15 – секция подъемника; 16 – гидроцилиндр подъемника;
 17 – клапан управления; 18 – регуляторы расхода (дрессели);
 19 – клапаны редукционные; 20 – регулятор; p – магистраль нагнетания;
 R – магистраль слива; T – магистраль управления; M_1 , M_2 , M_3 – отверстия (порты)
 для подключения манометра

Сравним энергетический баланс для каждого типа систем при полезной мощности [4]:

$$N_{\text{пол}} = \frac{85 \text{ л/мин} \cdot 12 \text{ МПа}}{60} = 17 \text{ кВт.}$$

Стандартное дроссельное управление:

$$N_{\text{потр}} = \frac{100 \text{ л/мин} \cdot 20 \text{ МПа}}{60} = 33,3 \text{ кВт.}$$

Система с объемной адаптацией к нагрузке:

$$N_{\text{потр}} = \frac{85 \text{ л/мин} \cdot 15 \text{ МПа}}{60} = 21,2 \text{ кВт.}$$

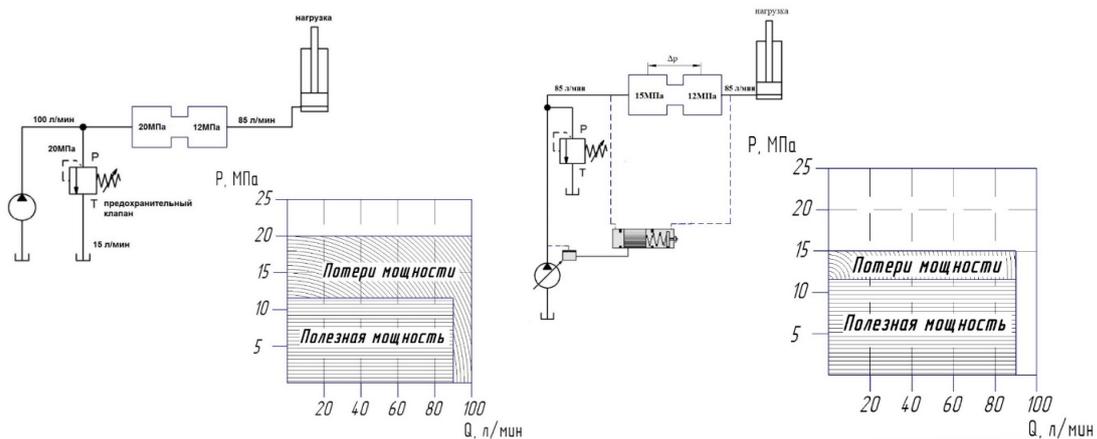


Рис. 2. Энергетический баланс систем с дроссельным регулированием и регулированием с объемной адаптацией к нагрузке

Анализ гидросистемы трактора «Belarus 3022В» показывает, что применение принципа объемной адаптацией к нагрузке по показателю энергетической эффективности является весьма разумным решением нежели применение иных типов гидросистем. По показателю потерь мощности системы с объемной адаптацией к нагрузке являются лучшими из систем, представленных в современном машиностроении. Однако на повсеместное внедрение данного типа систем существенным образом влияет стоимость насосов. В связи с этим выбор той или иной схемы гидросистемы в каждом конкретном случае необходимо определять не только показателями энергоэффективности, но и иными факторами.

Литература

1. Рунов, А. В. Руководство по эксплуатации «Беларус 2522В/2522ДВ 2822ДЦ /3022В/3022ДВ» / А. В. Рунов. – Минск : Мин. трактор. завод, 2008. – 395 с.
2. Гинзбург, А. А. Сравнение однопоточных гидросистем с объемной и клапанной адаптацией к нагрузке по уровню потерь мощности / А. А. Гинзбург, Д. Л. Стасенко // Механика машин, механизмов и материалов, 2018. – Вып. 3 – С. 67–74.

3. Шошиашвили, М. Э. Системы управления гидродневоприводами : учеб.-метод. пособие для практ. занятий / М. Э. Шошиашвили ; Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова. – Новочеркасск : ЮРГПУ(НПИ), 2017. – 94 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТРОЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

М. В. Синявский, А. И. Кулаев

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

Научный руководитель Г. В. Петришин

Цель работы – определение технологических свойств нитроцементированных порошков для магнитно-абразивной обработки.

Надежность всей машины, как и отдельных ее элементов, снижается вследствие их износа во время эксплуатации. Долговечность механических передач машины во многом определяется долговечностью элементов, наиболее подверженных износу: зубчатых, червячных колес, червяков и др. Известно, что на скорость износа рабочих элементов механических передач наибольшее влияние оказывает качество их изготовления – точность геометрической формы, шероховатость рабочей поверхности, состояние ее поверхностного слоя. Современные технологические методы обработки не обеспечивают должного качества изготовления элементов передач; кроме того, существующие методы финишной обработки сложнопрофильных поверхностей трудоемки и дорогостоящи, требуют применения специальной оснастки и инструмента. Предлагаемый метод финишной обработки деталей, имеющих сложный профиль, позволяет повысить качество изделий и при этом избежать ненужных трудозатрат. При магнитно-абразивном полировании режущий инструмент под воздействием магнитного поля формируется из ферромагнитного порошка, обладающего абразивными свойствами. При этом на качество обработки и в первую очередь на шероховатость обработанной поверхности и производительность процесса оказывает существенное влияние магнитно-абразивный порошок. Выбор магнитно-абразивных порошков для финишной обработки сложнопрофильных поверхностей зависит от многих факторов: заданной шероховатости обработанной поверхности, физико-химических свойств материала (твердости, вязкости, склонности к адгезионному схватыванию и др.), схемы обработки и конструктивных особенностей технологического оборудования. В настоящее время разработана широкая гамма порошков для процесса магнитно-абразивной обработки, однако эти порошки дорогостоящие ввиду сложности их производства, так как они должны отвечать таким взаимоисключающим свойствам, как высокие магнитные свойства и высокая твердость (присуща в основном немагнитным материалам). Такие порошки изготавливают многослойными, состоящими из ферромагнитного ядра (как правило, сталь) и равномерно распределенных по поверхности немагнитных твердых включений (корунд, нитрид бора, карбиды вольфрама, титана и др.). В результате их стоимость резко возрастает, что повышает себестоимость обработки.

Под *технологическими свойствами порошков* понимают: насыпную массу порошка; текучесть; прессуемость.

Насыпная масса порошка – это масса единицы его объема при свободной насыпке. Она определяется плотностью материала порошка, размером и формой его частиц, плотностью укладки частиц и состоянием их поверхности. Например, сфе-

рические порошки с гладкой поверхностью обеспечивают более высокую насыпную плотность.

Текучесть порошка – это способность перемещаться под действием силы тяжести. Она оценивается временем истечения определенной навески (50 г) через калиброванное отверстие (диаметр 2,5 мм). Текучесть зависит от плотности материала, гранулометрического состава, формы и состояния поверхности частиц и влияет на производительность автоматических прессов при прессовании, так как она определяет время заполнения порошком пресс-формы. Текучесть ухудшается при увлажнении порошка, увеличении его удельной поверхности и доли мелкой фракции.

Прессуемость порошка – это способность порошка под влиянием внешнего усилия приобретать и удерживать определенную форму и размеры.

Порошки одного и того же химического состава, но с разными физическими характеристиками, могут обладать различными технологическими свойствами, что влияет на условия дальнейшего превращения порошков в готовые изделия. Поэтому физические, химические и технологические свойства порошков находятся в непосредственной зависимости от метода получения порошка. Но не только качественные характеристики порошка лежат в основе выбора способа получения порошков. Очень важными при оценке метода производства порошков являются вопросы экономики – себестоимость порошка, размер капиталовложений, стоимость переработки порошка в изделия. Все это вызвало необходимость разработки и промышленного освоения большого числа различных способов производства порошков.

В данной работе была исследована возможность применения для магнитно-абразивной обработки диффузионно-легированных борированных порошков на железной основе с частицами неправильной формы. На основании проведенных сравнительных испытаний технологических свойств магнитно-абразивных порошков колотой чугунной дробы, подвергнутой дополнительной химико-термической обработке – диффузионному борированию на глубину 10–15 мкм, можно констатировать, что предлагаемый материал показал результаты на уровне лучших магнитно-абразивных порошков и оказался лучше широко применяемых в данной технологии недорогих магнитно-абразивных порошков (см. таблицу).

Магнитно-абразивный порошок	Характеристика порошка	
	Производительность, Мг/цикл	Шероховатость поверхности Ra, мкм
Fe–TiB ₂	215	0,1
Fe–WC	52	0,13
Fe–CrB ₂	207	0,09
Fe–TiC	302	0,07
Железо–карбид кремния	162	0,09
ДЧК (дробь чугунная колотая)	45	0,32
Борированный порошок на основе ДЧК	212	0,09

Как видно из таблицы экспериментальных данных, предлагаемый магнитно-абразивный порошок, обладая хорошими магнитными свойствами, показывает хорошие режущие и полирующие свойства, уступая только порошку Fe–TiC, оказываясь при этом значительно дешевле.

Таким образом, предлагаемый магнитно-абразивный порошок, сочетающий в себе высокие магнитные, режущие и полирующие свойства, является эффективным в технологии магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей. Предварительные результаты исследований таких порошковых материалов показали необходимость дальнейших исследований в данном направлении.

Литература

1. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с. : ил.
2. Устинович, Д. Ф. Моделирование силового взаимодействия между элементами порошковой ферромагнитной среды в магнитном поле / Д. Ф. Устинович, В. И. Прибыльский // Весті НАН Беларусі. Сер. фізика-тэхнічных навук. – 2005. – № 1.
3. Хомич, Н. С. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки деталей применением новых ферромагнитных абразивных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Н. С. Хомич. – Минск, 1981. – 204 с.

GEOLOGICAL RESEARCH ON THE SEARCH FOR OIL AND GAS RESERVES ON THE SHELF OF THE EXCLUSIVE ECONOMIC ZONE OF LEBANON

M. Mtayrek

*Gomel Educational Institution “Sukhoi State Technical University of Gomel”,
the Republic of Belarus*

Research supervisor A. B. Nevzorova

Geological studies conducted in Lebanon's exclusive economic zone indicate the likely presence of huge quantities of oil and gas offshore. Estimates are for no less than 100 trillion cubic feet of gas and 865 million barrels of oil. Lebanon has not started any exploration activities yet. On 14 December 2017, the Council of Ministers approved the awards of the first two exclusive petroleum licences for exploration and production in Blocks 4 and 9 for the consortium composed of Total SA, Eni International BV and JSC Novatek. On 9 February 2018, Lebanon signed its first offshore oil and gas exploration and production agreements for Blocks 4 and 9 with the consortium.

Lebanon is considered to become one of major producers in energy production in the Middle East. International companies are very interested and are competing over exploiting the large energy reserves detected off its coast. Every government major concerns are the output growth, unemployment and inflation and deflation rates. The goals of any government policy makers are to increase output growth, lower unemployment and lower inflation. With oil and gas exploration it is expected to create job opportunities and lower unemployment rate. Chief executive officer of the British Spectrum Geo Inc. David Rowlands said that: “the value of the gas and crude oil reserves in Lebanon is worth \$140 billion”. In addition, Spectrum Geo had unveiled in 2012 that Lebanon's oil and gas reserves off its coast are of the richest and best in the Mediterranean.

Purpose of the work – to summarize the results of geological research on the search for oil and gas reserves on the shelf of the exclusive economic zone of Lebanon.

Methodology. Crustal modeling based on the latest studies of the Eastern Mediterranean geodynamics, as well as modern geophysical data, will allow the interpretation of crustal profiles across the entire STP platform (saida tire platform). This was done through numerical modeling taking into account the free-air gravity anomalies (Zeyen and

Fernández, 1994; Zeyen et al., 2005) shows the location of the modelled section on the topography and the free-air gravity maps (Fig. 1).

Free-air gravity anomalies (1-minute grid spacing) are extracted from publicly available worldwide database TOPEX (www.topex.ucsd.edu). A 50 km wide strip was extracted on both sides of the profile and the values were averaged every 5 km. The variability of data within the strip was considered as data uncertainty. The modeled lithosphere is divided into bodies representing from top to bottom: different layers of sediments, a continental upper crust, a continental lower crust and a lithospheric mantle. The oceanic crust is considered to have similar properties as the lower continental crust. These bodies are characterized by the following rock properties: 1) density and its dependence on temperature and depth; 2) thermal conductivity; 3) heat production. The shape, size and characteristics of the bodies are modified interactively in order to find the best-fitting model with the geophysical data used as input. The numerical model combines joint interpretation of thermal and mass distribution related data. The temperature distribution is calculated using a finite element algorithm in two dimensions using the ponderation method within the bodies forming the model.

Results. Crustal modeling. Free-air gravity anomalies extracted along the profile increase progressively from -60 mGals in the N-W to reach $+60$ mGals in the S-E which is in good agreement with the calculated anomalies (less than 8 mGals of uncertainty). The geophysical model invokes a 20–21 km thick crust under the STP in the closest part to the coast that thins progressively to reach a thickness of 5–6 km in the N-W, in the central part of the basin (Fig. 2).

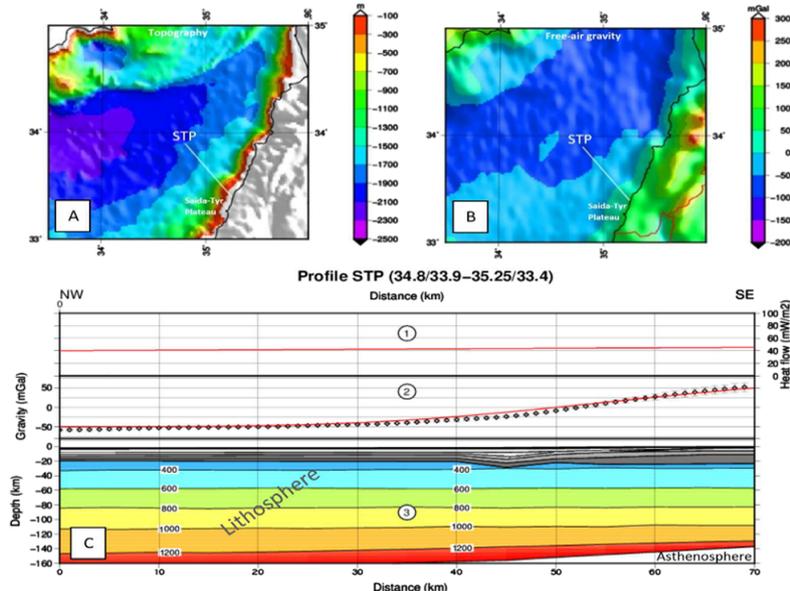


Fig. 1 – (A), (B) Location of the modeled cross section STP on the topography and free-air gravity maps, respectively (Topex database); (C) Modeling results for profile STP.

Graph C1 shows the calculated heat flow for the model. Graph C2 represents the observed gravity anomaly (diamonds: dots with error bars) and the data calculated for the model shown without vertical exaggeration (solid line). The error bars correspond to the data uncertainty for the standard deviation within a range of 5 km to each side of the profile. In graph C3, the crust is represented in grey shades and the lithospheric mantle contains the temperature distribution with isotherms every 200 °C and finally the asthenosphere in white, separated by the Lithosphere-Asthenosphere Boundary (LAB) from the lithosphere

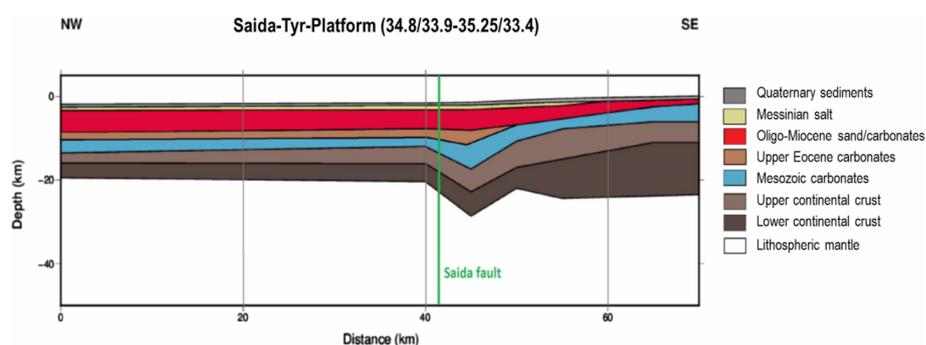


Fig. 2. Crustal model of profile STP based on gravity data

The interpreted Moho is about 19 km deep in the N-W and deepens to 28 km close to the coastline. Such Moho depth configuration appears logical with respect to data provided from previous work (~ 22 km in the center *versus* ~ 26 km at the margin of the basin, see above, Sect. 2.1). This crust is of continental nature and is believed to be constituted of a lower part with a density of 2900 kg m^{-3} density and an upper crust with a density of 2750 kg m^{-3} . The intersection of the Saida fault with the modeled profile could be well recognized at the distance of 45 km from the N-W. The Saida fault represents a fracture in the crust and at the same time a smooth transition between a thick crustal part connected to the continent and a thinner crust basinwards.

The density of the Plio-Quaternary sediments varies between 2200 kg m^{-3} and 2600 kg m^{-3} . These are underlain by a 2 km thick unit of salt with a density of 2100 kg m^{-3} , a layer of 2450 kg m^{-3} consisting of dense Cenozoic siliciclastics, and finally a thick layer of Mesozoic sediments of a constant density of 2550 kg m^{-3} overlying the crystalline crust. This last layer is considered to be compacted enough not to have a density dependent on pressure.

Conclusion. This contribution focuses the Saida-Tyr Platform (STP), an offshore area adjacent to the southern Lebanese coastline – part of the eastern margin of the Levant Basin, which is actually one of the licensed acreage for hydrocarbon exploration. A relatively extensive synthesis of previously (recently) published research work tackling crustal modeling, structural geology, stratigraphy and geochemistry helped in better integrating geo-data and shaping up the geological understanding of this area. In addition, a new crustal model and the interpretation of seismic reflection specifically on the STP led to the following conclusions:

- The Levant margin along the northwestern border of the Arabian Plate and the intra-plate Palmyra Basin (Syria, hinterland), witnessed similar tectonic events with rifting and inversion, followed by strike-slip tectonics in the Late Miocene.

- The STP is bordered by characteristic structural features and constitutes an extension of the Arabian continent into the Levant Basin, with similar crustal rheological properties.

- In addition to the typical Levant Basin tectonostratigraphic elements with thick Cenozoic series, the STP is also characterized by relatively thick Mesozoic successions – similar to the surface exposed strata onshore Lebanon, highlighting the margin petroleum systems.

- In the STP, the Upper Jurassic/Lower Cretaceous clastics and carbonates are believed to provide potential reservoir plays that could have been charged by the deeper Mesozoic source rocks, and sealed by Cretaceous marly layers. The edge of the Cretaceous

carbonate platforms (slope debris) and potential carbonate buildups are interesting to further investigate. While the western and northern anticlinal structures bordering the STP are excellent targets for Oligo-Miocene biogenic gas charging systems.

The STP is an excellent example of the eastern margin of the Levant Basin offshore Lebanon, with a broad diversity of potential plays for hydrocarbon exploration; by integrating geodynamics, tectono-stratigraphic interpretations and petroleum systems analyses, such plays are better constrained and exploration risk lowered.

References

1. Beydoun Z. R. (1977) Petroleum prospects of Lebanon: Reevaluation, AAPG Bull. 61. – P. 43–64.
2. Beydoun Z. R. (1999) Evolution and development of the Levant (Dead Sea Rift) Transform System: A historical-chronological review of a structural controversy, in: Mac Niocaill C., Ryan P.D. (eds), Continental Tectonics, Geological Society Special Publications, London. – P. 239–255.
3. Bou Daher S., Nader F.H., Strauss H., Littke R. (2014) Depositional environment and source-rock characterisation of organic-matter rich Upper Turonian-Upper Campanian carbonates, Northern Lebanon, J. Petrol. Geol. 37. – P. 1–20.
4. Bou Daher S., Nader F. H., Müller C., Littke R. (2015) Geochemical and petrographic characterization of Campanian-Lower Maastrichtian calcareous petroleum source rocks of Hasbayya, South Lebanon, Mar. Pet. Geol. 64. – P. 304–323.
5. Mode of access: <https://uk.practicallaw.thomsonreuters.com/1-630-4231?transitionType=Default&context-Data=Default&firstPage=true>.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

В. Э. Санько

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

Научный руководитель И. С. Шепелева

Геофизические исследования скважин (ГИС) в процессе бурения это наиболее перспективная технология, включающая в себя одновременно бурение и исследование скважины геофизическими методами. В первую очередь она очень экономична с точки зрения времени, средств, оборудования и прочих затрат. Данную технологию использовали в Беларуси в 2020 г. на месторождениях в ведомстве РУП ПО «Белоруснефть».

На сегодняшний день все передовые компании активно используют технологии каротажа в процессе бурения как для разведки новых, так и для оптимальной разработки уже эксплуатируемых месторождений.

Каротаж в процессе бурения позволяет:

- контролировать пространственное положение скважины относительно геологических объектов;
- определять качественные и количественные характеристики пласта с целью бурения по наиболее эффективной части коллектора (пласта);
- получить наиболее объективные данные для оценки свойств пласта за счет минимизации времени от вскрытия пласта до ГИС вследствие того, что фильтрат не успевает насытить прискважинную зону;
- отказаться от проведения окончательного каротажа на кабеле или на буровом инструменте, что существенно снижает затраты недропользователей за счет уменьшения срока строительства скважины.

Цель работы – проверить влияние увеличения скорости записи ГИС на качество каротажных кривых и возможности дальнейшего внедрения технологии на месторождениях Припятского прогиба.

Исследовательская часть. Перспективными направлениями ГИС в процессе бурения являются бурение с применением технологий РУС и КОМПАС.

Роторные управляемые системы (РУС) – это современное поколение забойного бурового оборудования, обеспечивающее снижение рисков возникновения осложнений и аварий, а также позволяющее осуществлять управление траекторией скважины.

В комплексе с различными MWD/LWD инструментами РУС открывают новые возможности при наклонно направленном бурении и решении сложных геологических задач [4].

Зонды инклинометрические систем забойных телеметрических «Compass» (далее – инклинометры) предназначены для измерений зенитного угла и азимута скважины, а также угла установки отклонителя с передачей данных из скважины на поверхность по гидравлическому каналу связи на положительных импульсах. Питание инклинометра обеспечивается специальными батареями.

Инклинометр помещается в защитный немагнитный корпус и коммутируется с остальными приборами измерительного блока системы забойной телеметрической «Compass» [5].

Нормирование времени записи каротажных кривых. В результате проведенного анализа полученных данных было выявлено, что наибольшее влияние скорость записи оказывает на показания радиоактивных методов.

С увеличением скорости каротажа показания данных методов искажаются и показывают более осредненные значения, уменьшается вертикальная разрешающая способность, что негативно сказывается на результатах интерпретации, особенно в тонких (< 1 м) пластах. Показания в таких пластах могут быть осреднены с показаниями во вмещающих породах, что ухудшит результат определения их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) и может послужить причиной пропуска потенциальных коллекторов.

По экспериментальным данным сделаны развернутые выводы о возможности выполнения геофизических исследований на повышенных скоростях. По результатам оценки была увеличена скорость записи приборов относительно паспортных данных при выполнении следующих методов: БК (скорость записи увеличена с 800 м/ч до 1000 м/ч), МК + БМК (скорость записи увеличена с 740 до 1000 м/ч), резистивиметрия (скорость записи увеличена с 800 до 1100 м/ч), профилометрия (скорость записи увеличена с 1600 до 2000 м/ч).

Ухудшение качества каротажных данных наблюдалось на фазокорреляционных диаграммах акустического метода, что приводило к уменьшению точности трассировки волн и последующему уменьшению точности в определении ФЕС из-за гидравлического канала связи.

В свою очередь, показания электрометрии и кавернометрии, проведенные на разных скоростях, показали хорошую сходимость между собой, что дает нам достоверные данные о характере насыщения, так как насыщение в прискважинной зоне не успевает заместиться буровым раствором и оттеснить флюид из зоны исследования.

В сложных скважинных условиях увеличение скорости проведения каротажа может привести к искажениям показаний из-за увеличения риска затяжек и локальных остановок прибора, например, при выходе прибора из-под башмака колонны.

Для электрических методов (БК, МК, МБК, резистивиметрия) и каверномет-

рии/профилеметрии возможно увеличение скорости, однако это возможно только в условиях, когда нет затяжек или иных обстоятельств, которые могут привести к аварийной ситуации и обрыву прибора.

Преимущества и недостатки ГИС в процессе бурения. Одно из основных преимуществ сокращения количества спуско-подъемных операций, что влечет за собой сокращение цикла строительства скважины на этапе геофизических исследований, возможно за счет уменьшения проведения привязочных каротажей с помощью выполнения непрерывной записи каротажных кривых ГИС в процессе бурения.

Основными преимуществами LWD являются: возможность геонавигации в реальном времени; измерение свойств пород перед значительными изменениями. Например, измерения сопротивления до образования зоны проникновения фильтра бурового раствора в пласт; решения задач по геомеханике, в частности прогноз дифприхватов.

К основным недостаткам LWD можно отнести мертвую зону приборов и контроль глубины привязки к разрезу [3].

Мертвая зона возникает из-за расположения модулей друг над другом. Чем дальше прибор от долота, тем больше непромер. В зависимости от применения РУ-Сов и модулей, минимальное возможное расстояние непромера до первого модуля при применении РУС с наддолотными модулями составляет 2 м. При использовании КОМПАСа непромер составляет 13–14 м.

В зависимости от поставленных задач могут применяться следующие модули: ГК + НГК/ННКт:

- стратиграфическая привязка к разрезу.

ГК + НГК / ННКт + БК:

- стратиграфическая привязка к разрезу;

- выделение коллекторов в разрезе и их насыщения для определения необходимости испытания;

- оценочное определение ФЕС.

ГК + НГК / ННКт + БК + АК:

- предварительная оценка литологии;

- стратиграфическая привязка к разрезу с учетом литологии;

- выделение коллекторов в разрезе и их насыщения для определения необходимости испытания;

- оценка ФЕС с учетом литологии.

Поскольку замена полного детального комплекса геофизических методов наддолотными модулями невозможна по ряду причин (качество данных, привязка к глубине, расположение модулей на большом расстоянии от забоя и т. д.), которые будут рассмотрены далее, то основная идея – это сократить количество привязочных каротажей для стратиграфической привязки под испытание, для отбора керна и под спуск колонны при отсутствии продуктивных отложений. Поэтому оптимальным комплексом ГИС для решения этих задач является следующий: ГК + НГК / ННКт + БК.

Внедрение или покупка комплекса модулей для проведения каротажа в процессе бурения определенного производителя будет проводиться только после опытно-промышленных работ и сравнения с детальным комплексом, для подтверждения качества и полноты получаемых данных [2].

Результаты опытно-промышленных работ, проведенных на трех скважинах, представлены в таблице.

Результаты сравнения

Номер скважины, месторождение	Время согласно норм 2009 г., ч	Время согласно норм 2020 г., ч	Отклонение +/- (действующие нормы/новые)
15 Карташовская	24,02	19,64	4,38/18
503 Кореневская	4,15	3,15	1/24
117g Мармовичская	19,34	14,84	4,5/23

Вышеперечисленные мероприятия позволят значительно сократить (до 20 %) длительность проведения комплекса ГИС на скважине. С учетом, что нормируемый объем, затраченный на проведение спуско-подъемных операций при выполненных ГИС в 2020 г. для СУБР составил ориентировочно 340 суток [1], то при применении в 2021 г. разработанных норм предполагаемая экономия при выполнении такого же объема работ составит около 60–65 суток по году.

Данные работы требуют изучения цен и рынка услуг, проведения маркетинговых исследований по закупке аренды LWD (с или без наддолотного модуля).

Применение данных технологий позволяет получить наиболее достоверные данные, увеличить скорость проведения комплекса ГИС и сократить время бурения.

Литература

1. Протокол технико-экономического совета РУП ПО «Белоруснефть», 28.12.20.
2. Постановление № 6 совета РУП ПО «Белоруснефть», 2020.
3. BakerHughes. – Режим доступа: <https://www.bakerhughes.com/integrated-well-services/integrated-well-construction/evaluation/loggingwhiledrilling-services>. – Дата доступа: 11.03.21.
4. Говзич, А. Роторные возможности управляемого бурения / А. Говзич // Сиб. нефть. – 2012. – № 96. – С. 38–42.
5. Башнефтегеофизика. – Режим доступа: <https://www.bngf.ru/services/187/>. – Дата доступа: 12.03.21.

АДАПТАЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БУРЕНИЯ СКВАЖИН ДЛЯ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

А. Г. Стельмашонок

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

Научный руководитель О. К. Абрамович

Современный этап развития техники и технологии добычи углеводородов характеризуется существенным увеличением объемов производственной информации о происходящих изменениях в условиях разработки нефтяных месторождений и их текущем состоянии. Однако при этом на нефтепромыслах зачастую отсутствует технология контроля и управления разработкой, объективно учитывающая все основные структурные особенности месторождения и его эксплуатации (включая кустовые площадки и отдельные скважины). Все это приводит к необходимости более широкого распространения и применения разнообразных систем автоматизации, телемеханики и компьютерных сетей, где главным фактором является наличие встроенного интеллекта. В ближайшем будущем повсеместно появятся «интеллектуальные» нефтепромыслы, которые будут контролировать себя сами и дистанционно управ-

ляться группами виртуальных экспертов, поэтому тема, предложенная к рассмотрению актуальна и современна.

Необходимость создания интеллектуальной системы управления разработкой месторождений углеводородного сырья возникла с учетом: рисков природного характера, например, в ходе освоения глубоких залежей месторождений углеводородного сырья; появления новых, инновационных технологий и техники для добычи углеводородного сырья, а также систем обеспечения всестороннего мониторинга разработки нефтегазовых месторождений; роста объемов геолого-промысловой информации и применения разнотипных программно-аппаратных комплексов для ее сбора, передачи, обработки, анализа и хранения. Разработка концепции интеллектуального месторождения поможет добывающим компаниям сократить расходы на 5 % и увеличить объем добычи на 2 %. Если представить объем прироста добычи нефти в мировом масштабе и, соответственно, сумму сэкономленных средств, станет понятно, что даже такой малый процент будет достаточным основанием для огромных инвестиций в развитие технологий, и особенно в решения на базе искусственного интеллекта. Опыт создания интеллектуальных нефтепромыслов активно адаптируется за рубежом. Например, в Канаде для управления процессами операторы буровых установок используют панельные компьютеры с уровнем защиты IP66, что обеспечивает интеллектуальную автоматизацию и мониторинг системы на нефтяных месторождениях даже в суровых условиях тундры провинции Альберта. Стоит обратить внимание на новый бренд Ventec для ряда инновационных программных приложений и решений. Современная система контроля параметров бурения позволяет осуществлять сбор информации о бурении в режиме реального времени, использовать простой и интуитивно-понятный пользовательский интерфейс, обеспечивать совместимость с внешними системами по протоколам WITS/WITSML, хранение архивной базы данных на жестком диске, существует возможность совместимости с системами дистанционного управления буровой установки последнего поколения, такими как «SCADA», «Symphony» и «FX-control», обеспечивает предоставление отчетов по бурению на основе IADC, а также позволяет создать интегрированный журнал учета труб.

Если перейти к решению достаточно узких практических задач, то также можно рассмотреть ряд интересных и экономически выгодных цифровых решений, например, прогнозирование положения бурового долота в пространстве. Целями и задачами данного проекта являются определение величины и направление отклонения долота от плановой траектории. Разработка системы прогнозирования положения долота скважины в пространстве при помощи современных методов машинного обучения, на базе анализа всей поступающей информации при бурении, позволит управлять бурением скважины и принимать решения по скважине. Ввиду удаленности датчиков инклинометрии от долота (15–35 м от забоя скважины) информация о пространственном положении скважины на основании показаний приборов в процессе бурения поступает не на актуальный забой. Прогноз на забой делается специалистом по наклонно-направленному бурению и носит субъективный характер. В результате этого растет количество случаев перебуров из-за некачественного прогноза.

Интересное практическое решение можно рассмотреть для системы осцилляции колонны бурильных труб. Система Spin Master предназначена для решения проблемы с дохождением осевой нагрузки на долото при наклонно-направленном бурении в горизонтальном участке, используя винтовые забойные двигатели. Система полно-

стью поверхностного монтажа не требует установки внутрискважинного оборудования, которое может быть утеряно в скважине. Оборудование Spin Master подключается к пульту управления верхним силовым приводом. Система Spin Master взаимодействует с пультом управления верхнего силового привода для вращения буровой колонны влево-право с ограничением крутящего момента и количества оборотов по специально разработанному и запрограммированному алгоритму. Данная техника снижает продольное сопротивление с части буровой колонны при бурении. Вращение подвергает верхнюю часть буровой колонны к почти постоянному тангенциальному движению, создавая коэффициент динамического трения, который ниже коэффициента статического трения, создаваемого не вращающейся колонной. Преимущества: осцилляция уменьшает трение колонны о стенки скважины и улучшает подачу веса на долото, режим колебаний регулируется для обеспечения максимального вращения колонны без влияния на ориентацию винтового забойного двигателя, увеличивается скорость проходки при направленном бурении (слайдирование), существенно увеличивается длина бурения горизонтального участка без использования роторных систем управления. Следующая разработка, заслуживающая внимания, – система автобурения скважины, представленная компанией автоматизированных систем бурения (г. Пермь). Управляющий контроллер позволяет коммуницировать со всеми элементами буровых систем. Идея аппарата перехода на дистанционное управление процессом разработки заключается в том, чтобы к физическому моделированию, которое определяет положение ствола скважины в пласте, добавить статистическую информацию. Чтобы к информации о том, куда бурить, с какой скоростью, с каким весом бурового раствора, добавить сведения о проблемах, возникших на всех тысячах скважин на данной конкретной глубине в данном конкретном пласте. Но добавить таким образом, чтобы вся эта информация была доступна работнику в один клик. Достойны внимания и отечественные разработки нового оборудования БелНИПИнефть, например, помехозащищенные системы СКАД-3104 и Цикада-02, обеспечивающие получение достоверных телеметрических данных о работе погружного оборудования в условиях сильных электромагнитных помех. Данная система представлена сотрудниками БелНИПИнефть на конкурс на «Лучшую научно-инженерную и проектную работу», поэтому воспользуемся только общими характеристиками, доступными для демонстрации современности и преимуществ данного комплекса.

Наземная часть системы представляет собой функционально законченный блок, размещаемый в отсеке телеметрии или снаружи станции управления электропогружной установки, а подземная – герметичный контейнер подземного блока, монтируемый в нижней части погружного электродвигателя на фланцевом соединении. Наружный блок предназначен для питания подземного блока, измерения сопротивления изоляции электроцентробежного насоса и приема информационных сигналов, поступающих от подземного блока, с последующей их дешифрацией, преобразованием и передачей данных в контроллер станции управления электропогружной установки. Передача данных от наземного блока в станцию управления осуществляется по последовательному интерфейсу связи типа RS-232 или RS-485, поддерживающему стандартный промышленный протокол обмена MODBUS. Контроль за работой, настройка и диагностирование наземного блока осуществляется с помощью сервисно-диагностического устройства – пульта оператора. Конструктивно подземный блок выполнен в виде герметичного металлического контейнера цилиндрической формы, способного выдерживать перегрузочное давление до 80 МПа и длительное воздействие температуры до 150 °С. Подземный блок формирует цифровой информационный сигнал о физических значениях следующих величин: температуры отка-

чиваемой жидкости; температуры статорных обмоток погружного электродвигателя; осевого и радиального виброускорения в нижней части погружного электродвигателя. Принцип работы системы основан на преобразовании сигналов внутренних и выносных датчиков подземного блока в цифровой код с целью их дальнейшей передачи в станцию управления электропогружной установки для принятия соответствующего решения. Использование результатов представленной модели обеспечит: снижение капитальных и эксплуатационных затрат при внедрении новых комплектов системы; высокую электромагнитную стойкость составных блоков системы при простых замыканиях на землю в электроцентробежном насосе; расширение температурного диапазона работы подземного блока до 150 °С; достоверный контроль сопротивления изоляции установки электроцентробежного насоса в диапазоне от 10 кОм до 10 МОм; снижение погрешности и инерционности измерений по каналам давления и температуры.

В общем объеме проведенных конструкторско-технологических, сборочно-монтажных и экспериментально-технических мероприятий была осуществлена проработка функционально-конструктивного построения составных блоков системы, выполнена программно-аппаратная стыковка ее внутренних электронных модулей между собой, разработаны электрические принципиальные схемы и схемы монтажных соединений изделия, реализовано и протестировано соответствующее программное обеспечение, предназначенное как для функционирования изделия в целом, так и для его адаптации в действующую программно-аппаратную среду. Были решены вопросы, связанные с технологией изготовления, системы, что позволило создать и испытать опытный образец. Внедрение разработанной системы позволит получать достоверные телеметрические данные во всем диапазоне работы погружного электродвигателя, повысить надежность установки электроцентробежного насоса и снизить эксплуатационные затраты и издержки, а в целом создать условия для обустройства интеллектуальных нефтепромыслов. Доступность постоянно пополняющихся производственных данных в режиме реального времени позволит дистанционно управлять объектами нефтедобычи и повысить эффективность их эксплуатации.

Литература

1. Евтин, П. В. Новые технологии – нефтегазовому региону : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / П. В. Евтин. – Тюмень : ТИУ, 2016. – Т. 1. – 398 с.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗАСОЛЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ МЕТОДАМИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-ДОМАНОВИЧСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ

А. В. Сошенко, Е. И. Машечко

*Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти
БелНИПИнефть*

В. А. Семенова

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

Научный руководитель И. С. Шепелева

Горные породы, пустотное пространство которых частично или полностью заполнено вторичным галитом, именуют засоленными коллекторами. На территории Беларуси катагенетическая кальматация пустотного пространства пород-коллекторов

галитом и другими минералами характерна для внутрисолевых и межсолевых залежей нефти Припятского прогиба.

Наряду с галитом в коллекторах также присутствуют ангидрит, доломит и кальцит, однако перечисленные минералы не представляют значительного интереса для исследований, поскольку характеризуются достаточно низкой растворимостью в пресной воде и не оказывают существенного влияния на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) пород. Проявление процесса катагенетической галитизации, в свою очередь, обуславливает значительное снижение пористости и проницаемости пород-коллекторов на многих нефтяных месторождениях Припятского прогиба, следствием чего является уменьшение объема как геологических, так и извлекаемых запасов нефти, уменьшение коэффициента вытеснения нефти из пласта, ограничение охвата залежи воздействием, а также падение продуктивности добывающих и приемистости нагнетательных скважин [1].

При взаимодействии с водой ФЕС пород, поры которых полностью либо частично заполнены солью, значительно изменяются за счет растворения галита. Целью данной работы является выявление засоленных коллекторов в пределах нефтегазоносных пластов, а именно определение их локализации и степени засоления, для учета изменения ФЕС в процессе рассоления, что, в свою очередь, поможет повысить нефтеотдачу пластов. Ниже рассмотрена применимость методов геофизических исследований скважин для решения вышеперечисленных задач на примере Северо-Домановичского месторождения нефти.

Для выявления засоленных коллекторов на Припятском прогибе были проведены опытно-промышленные работы, одним из первых этапов которых стали геофизические исследования скважин на внутрисолевых и межсолевых отложениях Северо-Домановичского месторождения нефти. Так как горные породы данных отложений отличаются многокомпонентным составом скелета, для построения их объемной минералогической модели геофизическими методами, требуется использование расширенного комплекса геофизических исследований скважин с обязательным включением нейтронного, литоплотностного и акустического методов.

В работе были рассмотрены аспекты первичной обработки данных ГИС, а также выполнение многоскважинной нормализации показаний методов ГИС и синтеза показаний метода ГГК-II 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:

$$f_i = \sum e_{ij} V_j m_j = 1, i = 1, n,$$

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.

С учетом выполненного комплекса ГИС, включающего методы ГК, НК, ГГК-II, АК и определенного по данным химического анализа минералогического состава, приведенное выше выражение можно представить в виде следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \delta_{\Pi} = \delta_{\text{фл}} K_{\Pi} + \delta_{\text{гл}} + \delta_{\text{кальц}} V_{\text{кальц}} + \delta_{\text{дол}} V_{\text{дол}} + \delta_{\text{гал}} V_{\text{гал}} + \delta_{\text{анг}} V_{\text{анг}}, \\ W_{\Sigma} = W_{\text{фл}} K_{\Pi} + W_{\text{гл}} V_{\text{гл}} + W_{\text{кальц}} V_{\text{кальц}} + W_{\text{дол}} V_{\text{дол}} + W_{\text{гал}} V_{\text{гал}} + W_{\text{анг}} V_{\text{анг}}, \\ \Delta T_{\Pi} = \Delta T_{\text{фл}} K_{\Pi} + \Delta T_{\text{гл}} V_{\text{гл}} + \Delta T_{\text{кальц}} V_{\text{кальц}} + \Delta T_{\text{гал}} V_{\text{гал}} + \Delta T_{\text{анг}} V_{\text{анг}}, \\ Vcl_{\gamma} = Vcl_{\text{фл}} K_{\Pi} + Vcl_{\text{гл}} V_{\text{гл}} + Vcl_{\text{кальц}} V_{\text{кальц}} + Vcl_{\text{дол}} V_{\text{дол}} + Vcl_{\text{гал}} V_{\text{гал}} + Vcl_{\text{анг}} V_{\text{анг}}, \\ K_{\Pi} + V_{\text{гал}} + V_{\text{кальц}} + V_{\text{дол}} + V_{\text{гал}} + V_{\text{анг}} = 1, \end{cases}$$

где $V_{\text{гал}}$ – коэффициент объемной глинистости; $V_{\text{кальц}}$, $V_{\text{дол}}$, $V_{\text{гал}}$, $V_{\text{анг}}$ – объемное содержание кальцита, доломита, галита и ангидрита соответственно, слагающие скелет породы.

Параметры δ_{Π} , W_{Σ} , ΔT_{Π} и Vcl_{γ} соответствуют объемной плотности, общему водородосодержанию, интервальному времени пробега продольных волн и глинистости каждого из компонентов породы.

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 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 группах скважин указывает на хорошую корреляцию с керновыми данными.

Немаловажной задачей являлось также построение объемной модели пород при отсутствии входной кривой ГК-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 [2].

На показаниях метода ИННК интервалы пластов солей имеют аномально низкие значения времени жизни тепловых нейтронов (τ_{Π}), в связи с тем, что Cl , входящий в состав галита, является аномальным поглотителем тепловых нейтронов. Также при значительной степени галитизации интервалов пород на качественном уровне можно выделить эти интервалы по показаниям ИННК. Мешающим фактором в таком случае является наличие коллекторов, насыщенных минерализованной водой. В ряде скважин, где проводился метод ИННК, выполнялся контроль полученных в результате моделирования интервалов галитизации [3].

Необходимо отметить эффект масштаба. Лабораторные исследования на образцах керна описывают свойства породы в объеме, сопоставимом с цилиндром, с диаметром и высотой 3–10 см, тогда как исследования методами ГИС охватывают значительно больший объем породы, который сопоставим с цилиндром с диаметром и высотой 0,5–1 м. В связи с этим неоднородные свойства породы, а также единичные включения галита могут создавать значительный разброс значений в замерах на образцах керна. Как следствие, при сопоставлении полученных результатов объемного содержания галита по данным ГИС с данными на керне можно судить о верном диапазоне значений, и будет неверно сравнивать результаты в конкретной точке глубины напрямую.

Поэтому для более точной настройки модели и получения данных о содержании галита, с высокой достоверностью рекомендуется проводить исследования на полноразмерном керне по всему интервалу, учитывая образцы без визуально наблюдаемых включений галита. Также необходимо, чтобы интервал был продолжительным (не менее 10 м), и в нем должен быть представлен наибольший диапазон изменений свойств пород и степени галитизации.

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.

Л и т е р а т у р а

1. К вопросу о влиянии галитовой минерализации на особенности разработки залежей нефти в низкопроницаемых породах-коллекторах Припятского прогиба / В. Г. Жогло [и др.] // Природ. ресурсы. – 2014. – № 1. – С. 14–21.
2. Заляев, Н. З. Методика автоматизированной интерпретации геофизических исследований скважин / Н. З. Заляев. – Минск : Университетское, 1990. – 142 с.
3. Стрельченко, В. В. Геофизические исследования скважин / В. В. Стрельченко. – М. : Недра, 2008. – 550 с.

УПРУГИЕ ОСОБЕННОСТИ ШИН ХЛОПКОУБОРОЧНЫХ МАШИН В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Ф. Б. Уразалиев

Джизакский политехнический институт, Республика Узбекистан

В процессе движения по полю хлопкоуборочная машина находится под постоянным воздействием возмущений как случайного (неровности поля), так и непрерывного характера (перераспределение крутящих моментов на ведущих колесах, обусловленное неодинаковой их статической нагруженностью). Эти факторы вызывают отклонения машины от прямолинейного движения и ведут к снижению ее агротехнических показателей.

Проведение натурных исследований по определению компоновочной схемы хлопкоуборочной машины и параметров ее узлов затруднительно по экономическим причинам. Целесообразно было бы провести теоретические исследования, однако в источниках отсутствуют механические характеристики шин, выпускаемых в настоящее время для сельскохозяйственных машин, и размерные характеристики профиля поля в период уборки с точки зрения воздействия на устойчивость движения МТА.

Также следует учитывать взаимодействие уборочных аппаратов с кустами хлопчатника, так как колебания аппаратов на участке без кустов очевидно отличаются на участке с кустами из-за упругости последних.

Без знания упругих характеристик шин, применяемых на хлопкоуборочных машинах, невозможно исследование динамики движения машины. Однако сведения по этому вопросу весьма разнообразны. Они касаются лишь статических характеристик, в частности, статической радиальной и редко боковой жесткостей. Практически полностью отсутствуют сведения об упругих характеристиках угловой деформации и диссипативных свойствах шин. Нет исследований, связанных с определением упругости и диссипации в режиме динамического нагружения.

Для изучения этих характеристик был разработан и изготовлен стенд, который навешивался на трактор МТЗ-80. Стенд, при применении реостатных и тензопреобразователей и тензостанции на базе автомобиля ГАЗ-66, позволил определить радиальную, боковую и угловую жесткости, а также диссипацию шин Ф-2АД (15,5–38) и (12–16). Опыты проводились в режиме динамического нагружения на фиксированных частотах, соответствующих собственным частотам полученной системы. Радиальная нагрузка задавалась массой трактора при помощи гидросистемы навески орудий [1].

На хлопкоуборочных машинах применяются следующие типоразмеры шин: для междурядий 0,9 м – 18,4 L – 30 и 12,00–16,00; для междурядий 0,6 м – 13,6–38 и 12,00–16. При разработке четырехколесной машины не исключена возможность применения для управляемых колес шин 9,00–16. Поэтому исследования характеристик приводились для перестеленных размеров шин [2].

Диссипация, характеризующаяся коэффициентом демпфирования, вычислялась по формуле

$$b = \frac{S}{\pi \omega a_{\text{ш}}^2}, \quad (1)$$

где b – площадь петли гистерезиса цикла «нагрузка – разгрузка»; ω – частота циклов; $a_{\text{ш}}^2$ – деформация шины.

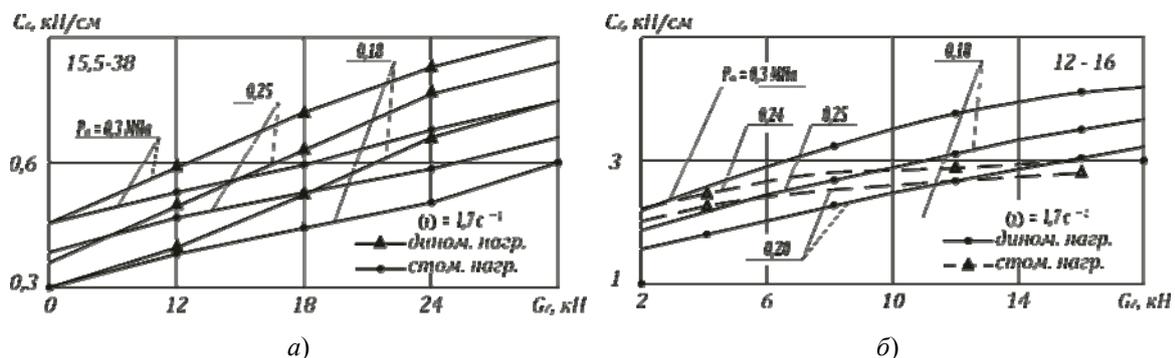


Рис. 1. Боковая жесткость шины хлопкоуборочной машины:
а – шина (12,5–38); б – шина (12–16)

Характеристики радиальной жесткости C_z при статическом нагружении, приведенные на рис. 1, взяты из [3]. Видно, что при динамическом нагружении жесткость шин больше, чем при статическом. Причем разница увеличивается с увеличением

радиальной нагрузки G_Z . В практических расчетах радиальная жесткость может приниматься линейной, но не постоянной во всем диапазоне динамического нагружения [4].

Боковая жесткость C_δ (рис. 2) нелинейная в диапазоне малых боковых сил P_δ , увеличивается с увеличением давления в лике $P_{\text{ш}}$ и радиальной нагрузки G_Z . При увеличении боковой силы P_δ жесткость падает.

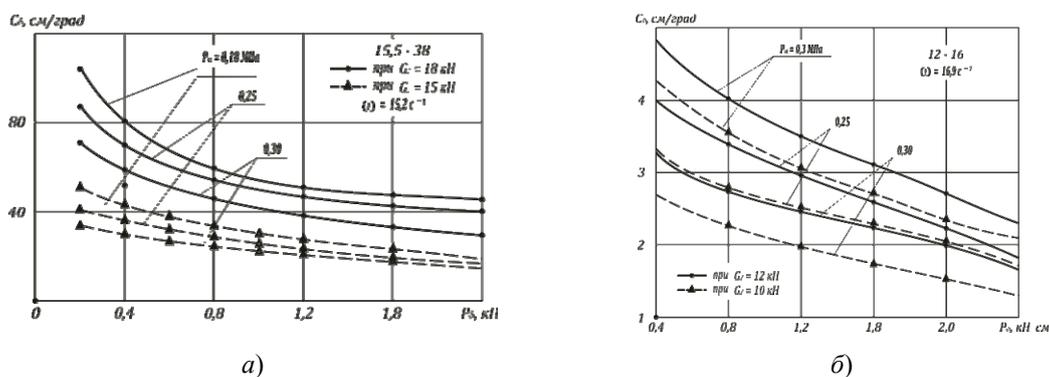


Рис. 2. Боковая жесткость шины хлопкоуборочной машины:
а – шина (12,5–38); б – шина (12–16)

Угловая жесткость C_ψ нелинейна во всем исследованном диапазоне изменения скручивающего момента M_ψ (рис. 3) обеих шин.

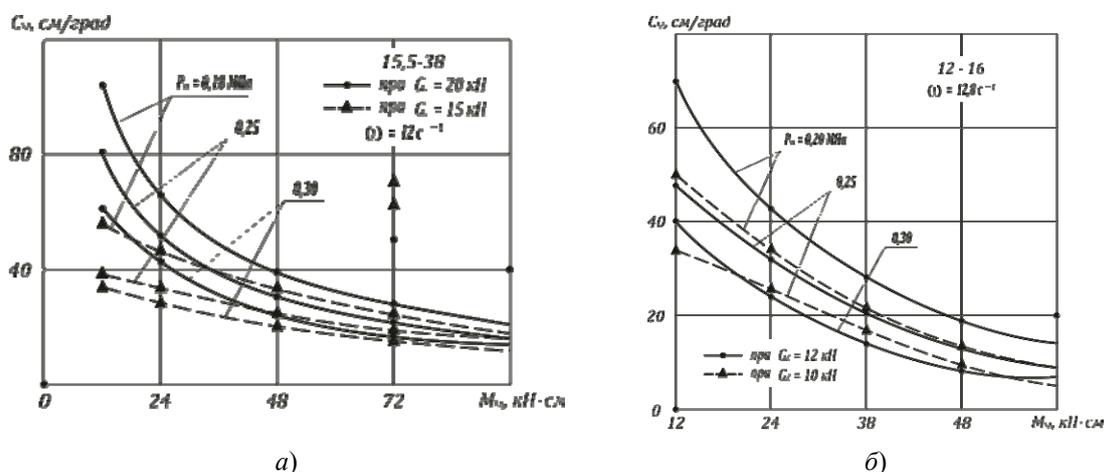


Рис. 3. Угловая жесткость шин хлопкоуборочной машины:
а – шина (12,5–38); б – шина (12–16)

Однако с увеличением давления в шине и снижением радиальной нагрузки характеристики приближаются к линейным, при этом жесткость снижается. Уменьшение жесткости может быть объяснено уменьшением площади пятна, контакта, т. е. с увеличением внутреннего давления или уменьшением радиальной нагрузки уменьшается объем деформируемой массы шины и, следовательно, уменьшается угловая жесткость.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициентов демпфирования от давления в шинах.

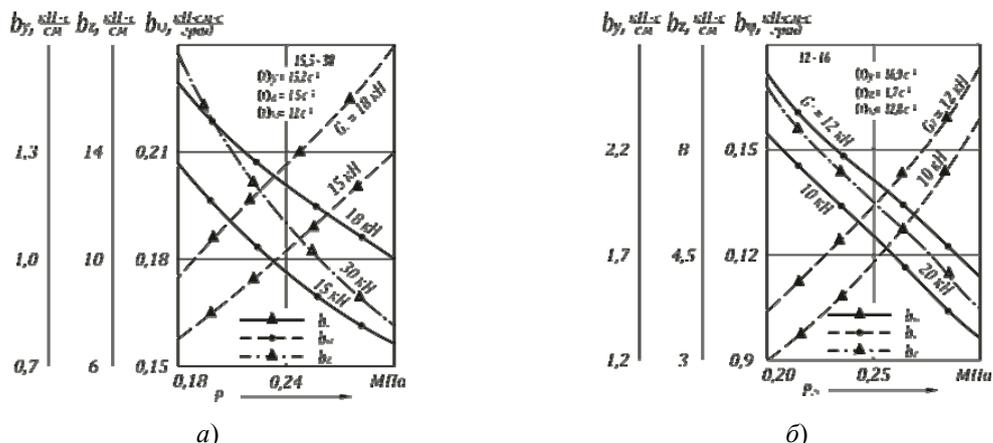


Рис. 4. Зависимость динамического коэффициента демпфирования от внутреннего давления в шине

С увеличением давления и уменьшением нагрузки на шину коэффициенты демпфирования линейных деформаций уменьшаются. Коэффициент демпфирования угловой деформации увеличивается с увеличением давления в шине и радиальной нагрузки S_z .

Приведенные графики свидетельствуют о том, что коэффициенты демпфирования не остаются постоянными при изменении нагрузки на колесо и, следовательно, в практических расчетах это следует учитывать.

Параметры упругих характеристик пневматических шин существенно нелинейны и не постоянны при изменении радиальной нагрузки.

Литература

1. Мальков, С. В. Определение координат точки приложения боковой силы, действующей на хлопкоуборочную машину в процессе движения : тр. САИМЭ / С. В. Мальков, Б. Б. Уразалиев. – Ташкент, 1989. – С. 121–125.
2. Мальков, С. В. Оценка нагрузки на водителя хлопкоуборочной машины в рабочем режиме / С. В. Мальков, Б. Б. Уразалиев // Механизация хлопководства. – 1990. – № 4. – С. 14–15.
3. Мальков, С. В. О диссипативных силах взаимодействия уборочных аппаратов с кастами хлопчатника / С. В. Мальков, Б. Б. Уразалиев // Механизация хлопководства. – 1990. – № 99. – С. 8.
4. Мальков, С. В. К задаче исследования устойчивости движения колесной системы прямым методом Ляпунова : всесоюз. конф. / С. В. Мальков, Б. Б. Уразалиев. – Ташкент, 1990.

ВЛИЯНИЕ ИНВЕРСИИ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПОГРЕШНОСТЬ ОБРАБОТКИ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

К. А. Саховский

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

Научный руководитель М. П. Кульгейко

Методология разработки технологических процессов предусматривает определенные подходы к составлению маршрута изготовления детали, базирующиеся на некоторых принципах технологического проектирования. Основные технологические

принципы проектирования процессов механической обработки изложены в учебной и справочной литературе, например, в [1], [2]. Наиболее полное описание принципов и правил разработки технологических процессов представлено в работе [3]. Здесь же сформулирован так называемый «принцип технологической инверсии». Принцип «инверсия» используется в различных областях не только инженерной, но и другой творческой деятельности. Он широко применяется в теории решения изобретательских задач [4]. Прием инверсия, или «обратная аналогия», означает выполнить что-нибудь наоборот.

В машиностроении принцип технологической инверсии предполагает инверсию различных технологических факторов и параметров. Сущность принципа заключается в обращении (изменении) функций, рабочих движений, последовательности переходов, геометрии и расположения элементов технологической системы и т. п. [3]. Например, главное движение: вращение заготовки или инструмента; движение подачи: перемещение инструмента или детали; фрезерование: встречное или попутное; обработка гильзы: от наружной поверхности или от отверстия; положение инструмента: горизонтальное или вертикальное и т. д. Задача технолога при разработке техпроцесса состоит в оценке соотношения преимуществ и недостатков инверсионных вариантов и выборе наиболее рационального из них.

Целью данной работы является анализ влияния инверсии главного движения на погрешности формы и расположения при растачивании отверстий.

Растачивание гильзы цилиндра может быть реализовано при вращении инструмента – расточной оправки (рис. 1) или при вращении заготовки (рис. 2). При обработке отверстия большой длины вследствие прогиба оправки ось инструмента отклоняется от горизонтального положения оси обрабатываемого отверстия. В результате отклонения траектории движения оправки кромка резца постепенно занимает положение на окружности большего диаметра относительно заданной оси отверстия.

При обработке по первому варианту, т. е. с главным движением – вращением оправки (рис. 1), возникает погрешность расположения отверстия – отклонение от соосности относительно базовой поверхности. То есть ось обрабатываемого отверстия отклоняется, в частности, относительно оси наружной поверхности. При растачивании с изменением (увеличением) вылета оправки в начальный момент можно считать технологическую систему практически достаточно жесткой, т. е. $r_1' = r_1'' = \frac{d_1}{2}$.

Далее в результате прогиба оправки под действием сил тяжести G ось главного движения отклоняется от заданного направления и возникает теоретическая погрешность – отклонение от соосности:

$$\Delta_e^G = f(G) = |r_2' - r_2''|, \quad (1)$$

где r_2' и r_2'' – минимальное и максимальное расчетное расстояние от образующей растачиваемого отверстия до базовой оси в результате прогиба оправки под действием сил тяжести.

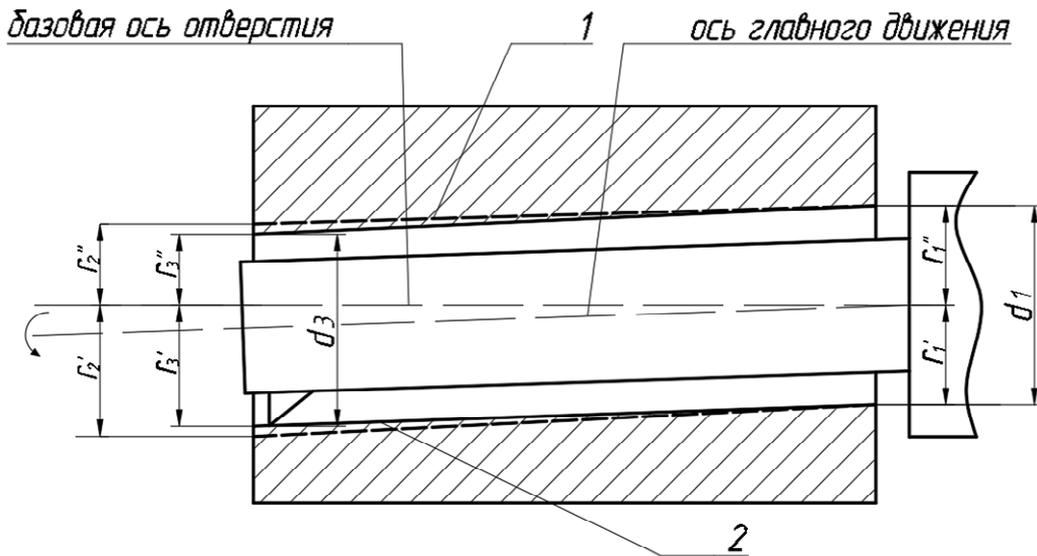


Рис. 1. Схема растачивания при вращении инструмента:
 1 – теоретическая траектория режущей кромки с учетом веса оправки;
 2 – действительная траектория режущей кромки под действием сил тяжести
 и сил резания

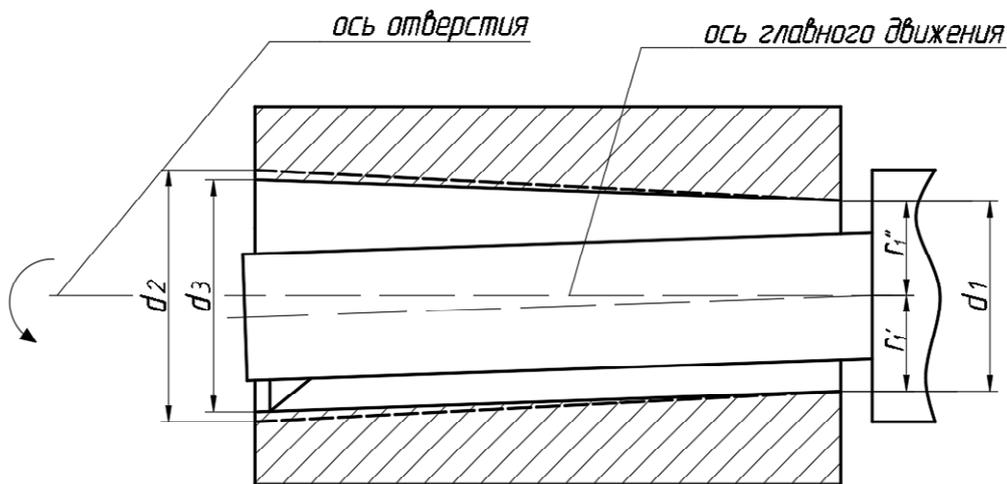


Рис. 2. Схема растачивания при вращении детали

При этом диаметр отверстия сохраняется, т. е. $d_2 = r_2' + r_2'' = d_1$. Но так как на инструмент действует сила резания P , то ее радиальная составляющая P_y вызывает деформацию оправки по направлению к оси отверстия. В результате кроме отклонения оси отверстия, возникает погрешность формы отверстия в продольном сечении. Следовательно, несоосность отверстия как функция сил тяжести и сил резания будет:

$$\Delta e = f(G, P) = |r_3' - r_3''|, \quad (2)$$

где r_3' и r_3'' – действительное минимальное и максимальное расстояние от образую-

щей расточенного отверстия до базовой оси в результате деформации оправки под действием сил тяжести и усилия резания.

Отклонение профиля продольного сечения выразится в виде конусообразности в зависимости от величины силы резания и составит:

$$\Delta_K = f(P) = |r_1' + r_1''| - |r_3' + r_3''| = |d_1 - d_3|, \quad (3)$$

где d_3 – диаметр обработанного отверстия на выходе инструмента.

При обработке по второму варианту, т. е. с главным движением – вращением детали (рис. 2), погрешность расположения оси отверстия практически равна нулю, так как ось главного движения и ось отверстия совпадают. В этом случае возникает только погрешность формы отверстия – конусообразность. Теоретически погрешность формы от прогиба оправки под действием силы тяжести будет:

$$\Delta_K^G = f(G) = |d_2 - d_1|, \quad (4)$$

где d_2 – расчетный диаметр обрабатываемого отверстия на выходе инструмента при деформации оправки под действием сил тяжести.

Результирующая погрешность формы:

$$\Delta_K = f(G, P) = |d_3 - d_1|, \quad (5)$$

где d_3 – действительный диаметр обработанного отверстия.

Величина прогиба оправки от действия сил тяжести и деформации под действием сил резания определяется по формуле механики материалов [5]. Так, прогиб оправки длиной $l = 500$ мм, диаметром $d = 50$ мм от действия силы тяжести составляет 15 мкм. Результирующая величина прогиба при обработке с глубиной резания $t = 0,1$ мм и подачей $s = 0,1$ мм/об составляет 6 мкм. Очевидно, что такие значения в определенных условиях могут быть значимыми и должны учитываться при построении маршрута и операций технологического процесса обработки точных отверстий.

Таким образом, инверсия главного движения при растачивании приводит к возникновению различных погрешностей формы и расположения оси обрабатываемых отверстий. Величина таких погрешностей может быть сопоставима с заданной точностью обработки, а следовательно, должна учитываться при разработке технологических операций. Дальнейшие исследования предполагают более подробный численный анализ точностных параметров обработки.

Л и т е р а т у р а

1. Технология машиностроения : учеб. пособие для вузов / М. Ф. Пашкевич [и др.] ; под ред. М. Ф. Пашкевича. – Минск : Новое знание, 2008. – 478 с.
3. Технология машиностроения : в 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения / Э. Л. Жуков [и др.] ; под ред. С. Л. Мурашкина. – М. : Высш. шк., 2003. – 278 с.
4. Цыплаков, О. Г. Теоретические основы проектирования технологических процессов механической обработки деталей общего и специального машиностроения. – Л. : Ленингр. механ. ин-т, 1970. – 289 с.
5. Альтшуллер, Г. С. Найти идею. Введения в ТРИЗ – теория решения изобретательских задач / Г. С. Альтшуллер – М. : Альпина Паблишер, 2010. – 392 с.
6. Старовойтов, Э. И. Механика материалов : учебник / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 380 с.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РОБОТА ДЛЯ РАБОТЫ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

А. В. Хихлуха

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

Научный руководитель М. И. Михайлов

Современное машиностроение характеризуется повышенными требованиями к геометрическим параметрам качества изготовления поверхностей деталей – точности получаемых размеров, отклонений формы, взаимного расположения поверхностей, их волнистости и шероховатости [1]–[4]. Для обработки деталей в условиях автоматизированного производства часто используются робототехнические комплексы (РТК). Программирование роботов основывается на решении обратных задач кинематики.

Для решения обратной задачи формировалась структурная схема робота (рис. 1). В каждое сочленение вводились системы координат, составляющие правые тройки.

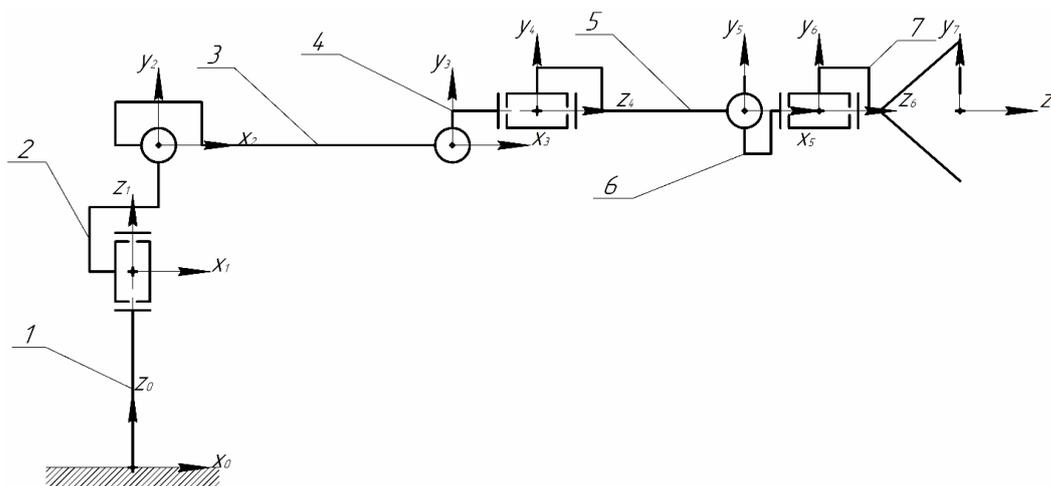


Рис. 1. Расчетная схема

Затем определялись геометрические параметры, отражающие расположения сочленений робота (табл. 1).

Таблица 1

Геометрические параметры робота

Номер звена	Номер пары	Тип	x	y	z	a	b	g
1	0,1	Качательное	0	0	228	0	0	g_1
2	1,2	Качательное	30	0	147	90	0	g_2
3	2,3	Качательное	340	0	0	0	0	g_3
4	3,4	Качательное	98	40	0	0	90	g_4
5	4,5	Качательное	0	0	240	0	-90	g_5

Окончание табл. 1

Номер звена	Номер пары	Тип	x	y	z	a	b	g
6	5,6	Вращательное	86,5	0	0	0	90	g ₆
7	6,7	Схват	0	0	205	0	0	0

Перемножив матрицы связи сочленений в соответствии с табл. 1, получим уравнение для нахождения центра схвата робота:

$$[A_{0,7}] := [A_{0,1}(g_1)][A_{1,2}(g_2)][A_{2,3}(g_3)][A_{3,4}(g_4)][A_{4,5}(g_5)][A_{5,6}(g_6)][A_{6,7}],$$

Дифференцируя полученное уравнение по каждому из обобщенных параметров, запишем систему уравнений:

$$[U_i] := \left(\frac{d}{dg_i} [A_{2,3}(g_i)] \right) [A_{0,1}(g_1)][A_{1,2}(g_2)][A_{2,3}(g_3)][A_{3,4}(g_4)][A_{4,5}(g_5)][A_{5,6}(g_6)][A_{6,7}].$$

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

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

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

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

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

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

Задаваясь обобщенными параметрами первого цикла расчетов, получим обобщенные координаты робота.

Например, для обслуживания РТК необходимо найти обобщенные параметры 21 позиции робота:

$$g_1 := 70 \frac{\pi}{180}; \quad g_2 := 15 \frac{\pi}{180}; \quad g_3 := 20 \frac{\pi}{180}; \quad g_4 := 0 \frac{\pi}{180}; \quad g_5 := 60 \frac{\pi}{180}; \quad g_6 := 0 \frac{\pi}{180}.$$

$$a := \text{find}(q_{1k}, q_{2k}, q_{3k}, q_{4k}, q_{5k}, q_{6k}) = 1.365; 0.125; 0.418; 0.047; 1.241; 0.047;$$

$$q_1 := a_{1,1} \frac{180}{\pi} = 78,185; \quad q_4 := a_{4,1} \frac{180}{\pi} = 2,681;$$

$$q_2 := a_{2,1} \frac{180}{\pi} = 7,146; \quad q_5 := a_{5,1} \frac{180}{\pi} = 71,116; \quad q_3 := a_{3,1} \frac{180}{\pi} = 23,965;$$

$$q_6 := a_{6,1} \frac{180}{\pi} = 2,681.$$

Проверка полученных результатов производилась путем подстановки их в уравнение прямой задачи:

$$g_1 := 90.017; \quad g_4 := 0.043; \quad g_2 := 11.618; \quad g_5 := 59.137;$$

$$g_3 := 19.312; \quad g_6 := 0.043.$$

$$A_{0,7} \begin{bmatrix} -1 & 0.001 & 0.001 & 0 \\ -0.001 & -1 & -0.001 & 632.069 \\ 0.001 & -0.001 & 1 & 943.011 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Аналогичным образом выполняем расчет для всех заданных позиций. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Углы поворота манипулятора в каждом из сочленений

Номер позиции схвата	Обобщенные координаты, град					
	$q1$	$q2$	$q3$	$q4$	$q5$	$q6$
Позиция 0	0	0	-20,94	0	0	0
Позиция 1	90	11,38	19,56	0	59,06	0
Позиция 2	90	26,011	-3,556	0	67,545	0
Позиция 3	90	115,521	-43,643	0	-71,878	0
Позиция 4	90	113,573	-45,249	0	-68,324	0
Позиция 5	90	115,521	-43,643	0	-71,878	0
Позиция 6	-65,547	63,064	-64,13	0	91,066	0
Позиция 7	-65,547	62,709	-58,304	0	85,595	0
Позиция 8	0	97,724	-38,153	0	-59,571	0
Позиция 9	-65,547	97,724	-38,153	0	-59,571	0
Позиция 10	-65,547	83,503	-24,307	0	-59,196	0
Позиция 11	-65,547	101,655	-64,661	0	-36,994	0

Окончание табл. 2

Номер позиции схвата	Обобщенные координаты, град					
	$q1$	$q2$	$q3$	$q4$	$q5$	$q6$
Позиция 12	90	11,38	19,56	0	59,06	0
Позиция 13	90	26,011	-3,556	0	67,545	0
Позиция 14	90	73,793	-13,234	90	-90	90
Позиция 15	81,149	71,03	-8,201	90	-81,149	90
Позиция 16	75,293	95,085	-39,357	90	-75,292	90
Позиция 17	-136,343	100,149	-119,594	0	109,445	0
Позиция 18	-136,343	101,365	-103,238	0	91,873	0
Позиция 19	-61,074	73,851	-10,122	90	-118,926	0
Позиция 20	-70,731	80,798	-21,205	90	-109,269	0
Позиция 21	-70,731	98,358	-60,036	90	-109,269	0

Литература

1. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 375 с.
2. Фельдштейн, Е. Э. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Минск : Новое знание ; М. : Инфа-М, 2011. – 263 с.
3. Основы автоматизации машиностроительного производства / Ковальчук [и др.] ; под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк., 1999. – 312 с.
4. Базров, Б. М. Расчет точности машин на ЭВМ / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 1984. – 256 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ОТВЕРСТИЙ НА ТОКАРНОМ СТАНКЕ С ЧПУ**С. И. Воробей***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. И. Михайлов

Анализ литературы по обработке поверхностей [1]–[5] позволяет заключить, что все авторы выделяют схемы резания, которые классифицируют в основном для обработки протягиванием.

Целью данной работы является повышение точности обработки сложных поверхностей.

Характер номинальной обрабатываемой поверхности детали позволил заключить, что для формообразования необходима согласованность двух движений – перемещения суппорта с инструментом в продольном и поперечном направлениях (рис. 1).

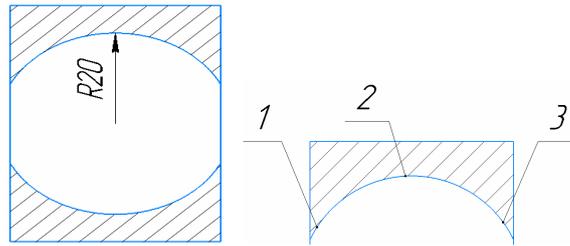


Рис. 1. Эскиз сечения обрабатываемой поверхности (а) и расположение критических точек (б)

Для обеспечения постоянной шероховатости движение по окружности требует переменной подачи на всей ее длине. Локальная шероховатость образуется за счет поступательного перемещения кромки резца из положения 1А1 в положение 2С2. Опуская вычисления, высоту гребешка шероховатости определим из $\triangle ABC$ (рис. 2):

$$h = \left(\sqrt{\left(\frac{s \cdot \cos(\alpha - \beta)}{\sin \alpha} \right)^2 + \rho^2 + \frac{2\rho \cos(\alpha - \beta) \sin\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)}{\sin \alpha}} \right) - \rho.$$

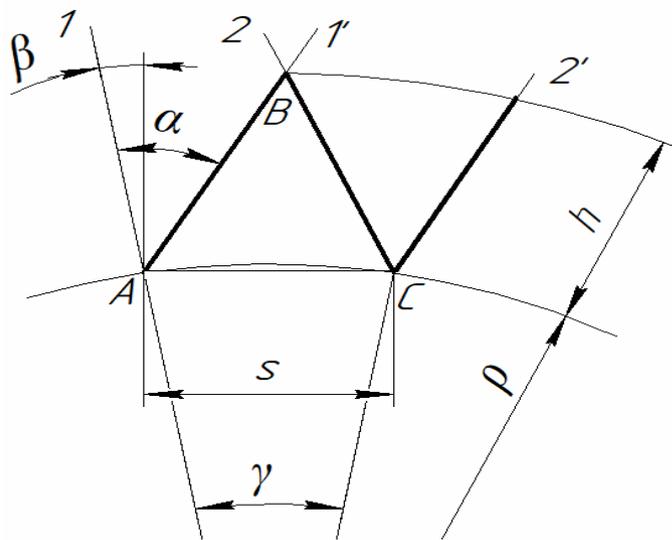


Рис. 2. Геометрическая погрешность при обработке резцом

Используя методику твердотельного моделирования, была получена геометрическая образующая обработанной поверхности (рис. 3).

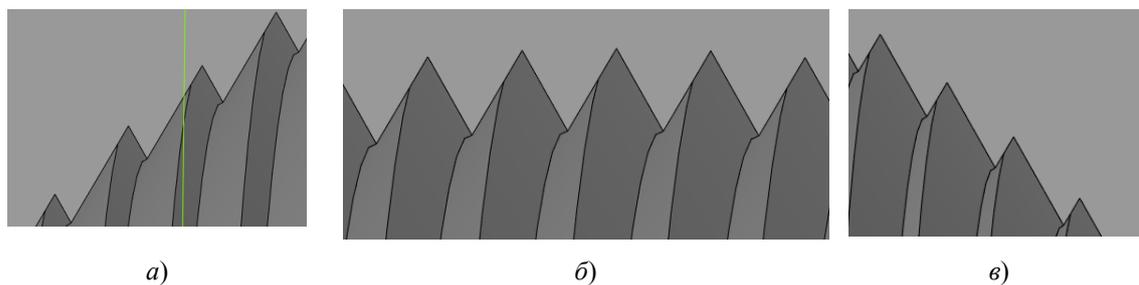


Рис. 3. Вид поверхности обработки в точках 1 (а), 2 (б), 3 (в)

Результаты анализа параметров на шероховатость представлены на рис. 4–7.

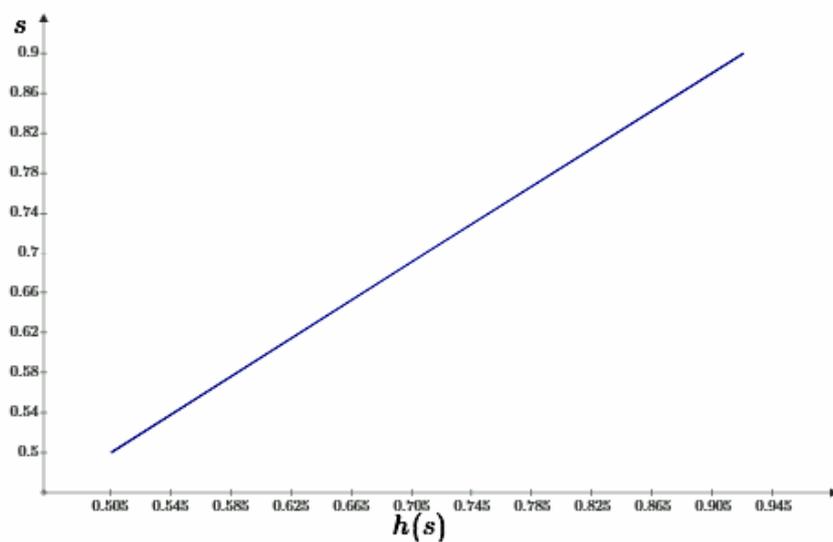


Рис. 4. График зависимости высоты h от величины подачи

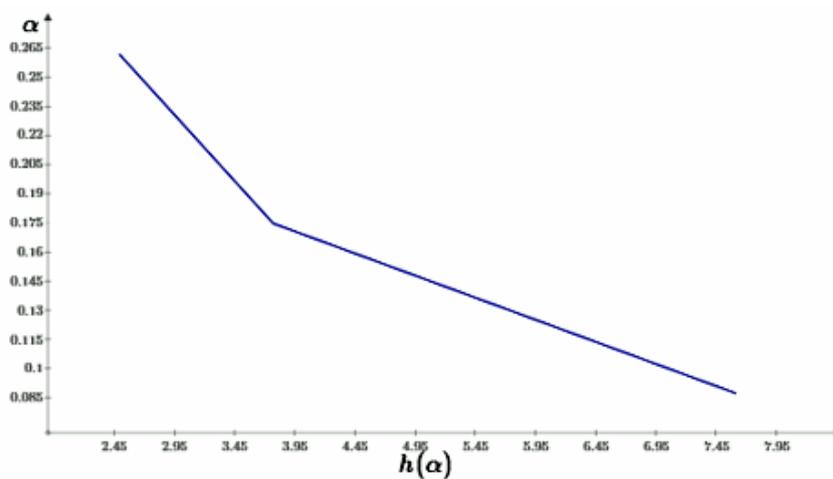


Рис. 5. График зависимости высоты h от величины угла α

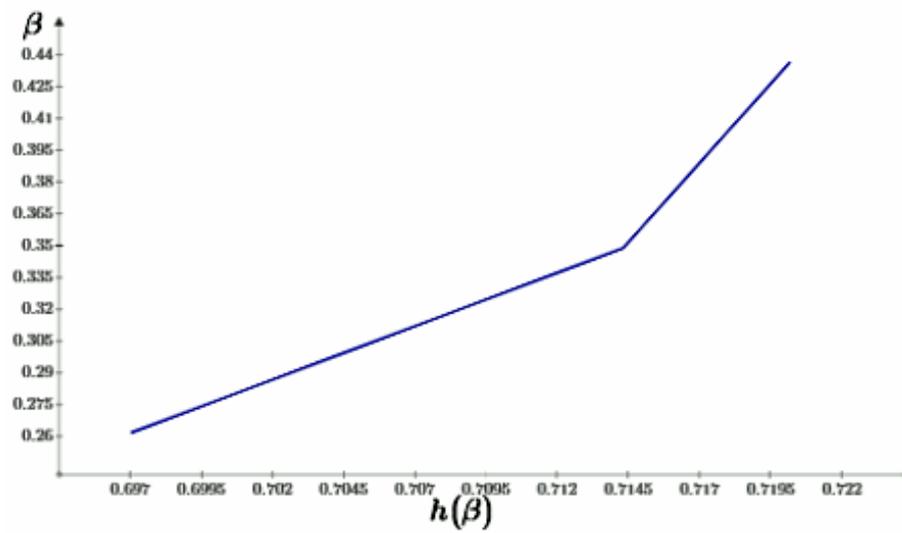


Рис. 6. График зависимости высоты h от величины угла β

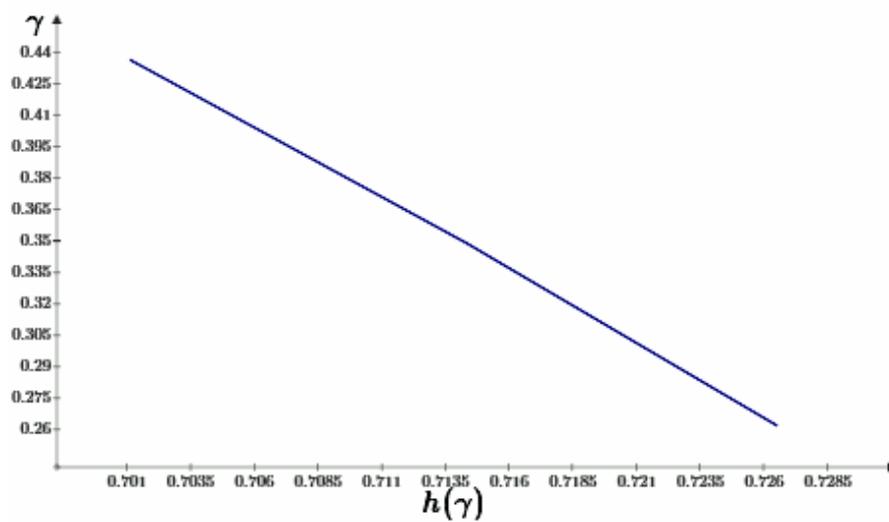


Рис. 7. График зависимости высоты h от величины угла γ

На рис. 8 представлены твердотельные модели обработанных поверхностей при различной подаче.

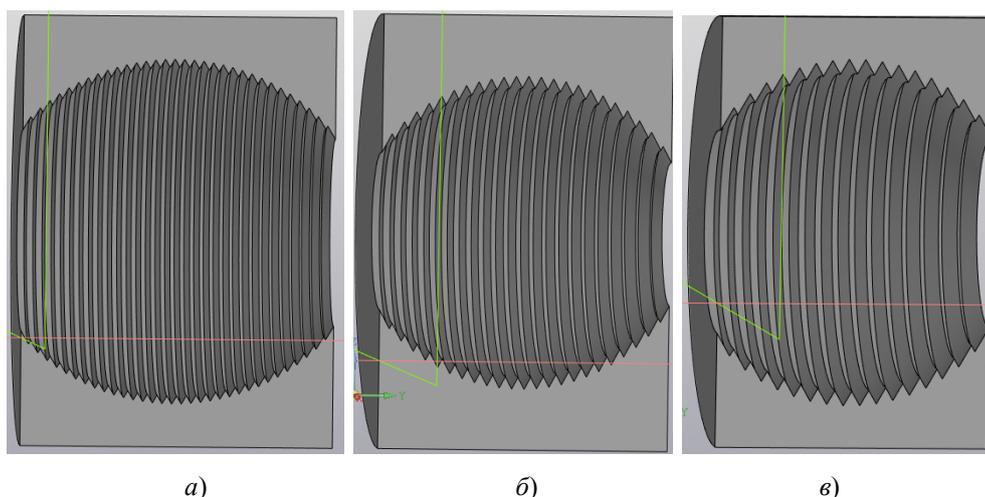


Рис. 8. Твёрдотельные модели обработанной поверхности:
 $a - s = 0,5$ мм; $б - s = 0,7$ мм; $в - s = 1$ мм

Полученная модель позволяет автоматизировать процесс формообразования сложных поверхностей.

Литература

1. Лашнев, С. И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ / С. И. Лашнев, М. И. Юликов – М. : Машиностроение, 1980. – 208 с.
2. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 264 с.
3. Родин, П. Р. Обработка фасонных поверхностей на станках с ЧПУ / П. Р. Родин, Г. А. Линкин, В. Н. Татаренко. – Киев : Техника, 1976. – 198 с.
4. You, S. Y. Scallop Removal in Die Milling by Tertiary Cutter Motion / S. Y. You, K. F. Eman // Journal of Engineering for Industry. – 1989. – № 3. – P. 213–215.
5. Bedi S. Chernoff W., Vickers G. Computer-aided Fairing and Direct Numerical Controlled Machining of Ship Hull Hydrodynamic Testing Models // CSME Transactions. – 1988. – Vol.12, № 1. – P. 43–48.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕЕЗДА МОБИЛЬНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО АГРЕГАТА

М. А. Власов

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

Научный руководитель В. Б. Попов

Целью работы является формирование функциональной математической модели и алгоритма решения задачи транспортного переезда МЭС, представленного универсальным энергетическим средством УЭС 290/450.

Неровности опорной поверхности, представленные ее микропрофилем, являются основным источником низкочастотных колебаний как УЭС, так и МСХА. При этом основное влияние на плавность хода оказывают вертикальные поступательные и продольные угловые колебания. От колес колебания передаются на корпус УЭС 290/450.

С одной стороны, это влечет за собой колебания нагрузки в агрегатах МЭС, а с другой – снижение уровня управляемости МЭС.

Геометрия неровностей микропрофиля опорной поверхности представляет собой случайный процесс, в котором, как правило, присутствуют гармонические составляющие. Так, сельскохозяйственный фон в виде стерни кукурузы после уборки на силос (движение поперек направления уборки) описывается корреляционной функцией с малой случайностью и большой периодичностью, т. е. представляет процесс близкий к обычному гармоническому. В этом случае профиль поля в первом приближении можно представить изменяющимся по гармоническому закону. Результаты исследований показывают, что периодические неровности можно рассматривать как непрерывное повторение единичных неровностей.

К микропрофилю относятся неровности с длиной волны от 0,1 до 100 м, вызывающие значительные колебания МЭС, но не содержащие длительных подъемов и спусков, влияющих на ее динамику. Микропрофиль вызывает колебания и оказывает существенное влияние на основные свойства МЭС: плавность хода, быстроходность, устойчивость и управляемость. Комплексное воздействие микропрофиля опорной поверхности определяет нагруженность узлов и агрегатов МЭС, ограничивает возможность реализации максимальной скорости, маневренности и т. п. Неровности, расположенные на отрезке пути менее 0,1 м, называются шероховатостями, сглаживаемыми шинами. Эти шероховатости вызывают незначительные колебания МЭС, но существенно влияют на работу шин (сцепные свойства, износ и т. п.).

Микропрофиль считается стационарным случайным процессом и основными его характеристиками являются: корреляционная функция, спектральная плотность и максимальная высота неровностей.

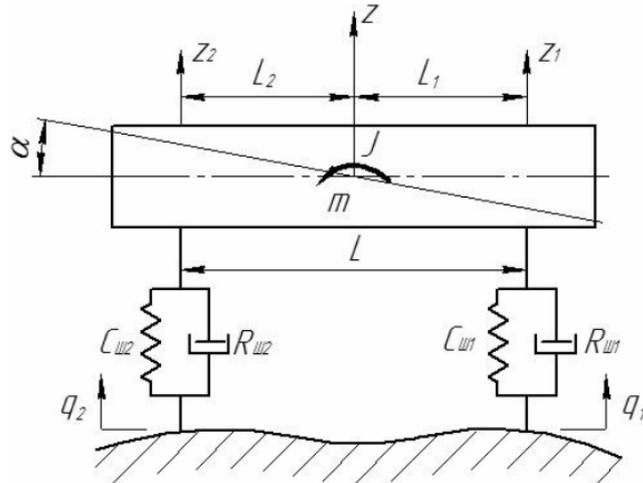


Рис. 1. Расчетная схема динамической модели УЭС (МСХА)

Для вывода уравнений движения, описывающих колебания УЭС и МСХА в вертикальной плоскости, используем уравнения Лагранжа второго рода в виде:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial E_K}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial E_{II}}{\partial x_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} = 0,$$

где E_K и E_{II} – кинетическая и потенциальная энергии системы; Φ – функция рассеивания; x_i – i -я обобщенная координата.

За обобщенные координаты на схеме (рис. 1) приняты вертикальные перемещения центра тяжести z и угловые колебания α относительно центра упругости УЭС. Обобщенные координаты связаны с вертикальными перемещениями его осей через выражения:

$$z = \frac{z_1 L_2 + z_2 L_1}{L}; \quad \operatorname{tg} \alpha = (z_2 - z_1) / L.$$

При малых угловых перемещениях $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$. В этом случае кинетическая энергия УЭС определяется как:

$$E_k = \frac{1}{2} M z_2^2 + \frac{1}{2} J \alpha_2^2 = \frac{1}{2} M \left(\frac{z_1 L_2 + z_2 L_1}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} J \left(\frac{z_2 - z_1}{L} \right)^2 = \frac{1}{2} m_1 z_1^2 + \frac{1}{2} m_2 z_2^2 + m_3 z_1 z_2,$$

где $m_1 = M \frac{L_2^2 + \rho^2}{L^2}$; $m_2 = M \frac{L_1^2 + \rho^2}{L^2}$; $m_3 = M \frac{L_1 L_2 - \rho^2}{L^2}$.

Навеска на УЭС 290/450 вызывает перераспределение масс по осям УЭС (m_1 и m_2), при этом появление массы m_3 свидетельствует об отличии коэффициента ε от единицы. Приняв за начало отсчета положение статического равновесия УЭС (МСХА), получим выражение для его потенциальной энергии:

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2} 2c_{\text{ш1}}(z_1 - q_1)^2 + \frac{1}{2} 2c_{\text{ш2}}(z_2 - q_2)^2.$$

Следует отметить, что высота неровностей изменяется в зависимости от времени, причем воздействие, вызванное неровностью поверхности, поступает на заднее колесо с запаздыванием τ относительно переднего колеса. Следовательно:

$$q_1 = q(t); \quad q_2 = q(t - \tau); \quad \tau = \frac{L}{v}.$$

Диссипативная функция, характеризующая рассеяние энергии в шинах, имеет вид:

$$\Phi = \frac{1}{2} 2k_{\text{ш1}}(\dot{z}_1 - \dot{q}_1)^2 + \frac{1}{2} 2k_{\text{ш2}}(\dot{z}_2 - \dot{q}_2)^2.$$

Далее, выполнив необходимые дифференцирования выражений для кинетической и потенциальной энергии, а также диссипативной функции, подставим производные в уравнения Лагранжа. После алгебраических преобразований уравнения вынужденных колебаний МСХА можно записать как:

$$\begin{cases} m_1 z_1 + k_{\text{ш1}} z_1 + c_{\text{ш1}} z_1 + m_3 z_2 = k_{\text{ш1}} q_1 + c_{\text{ш1}} \dot{q}_1; \\ m_2 z_2 + k_{\text{ш2}} z_2 + c_{\text{ш2}} z_1 + m_3 z_2 = k_{\text{ш1}} q_1 + c_{\text{ш1}} \dot{q}_1. \end{cases}$$

Разделим первое и второе уравнения системы уравнений на m_1 и m_2 соответственно, в результате получим:

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 + 2h_1\dot{z}_1 + \omega_{\kappa 1}^2 z_1 + \eta_1 \ddot{z}_2 = 2h_1\dot{q}_1 + \omega_{\kappa 1}^2 q_1; \\ \ddot{z}_2 + 2h_2\dot{z}_2 + \omega_{\kappa 2}^2 z_2 + \eta_2 \ddot{z}_1 = 2h_2\dot{q}_2 + \omega_{\kappa 2}^2 q_2, \end{cases}$$

где $2h_1 = \frac{2k_{\text{ш1}}}{m_1}$; $2h_2 = \frac{2k_{\text{ш2}}}{m_2}$; $\omega_{\kappa 1}^2 = \frac{2c_{\text{ш1}}}{m_1}$; $\omega_{\kappa 2}^2 = \frac{2c_{\text{ш2}}}{m_2}$.

На основе разработанной ФММ транспортного переезда МСХА, состоящего из универсального энергетического средства УЭС 290/450, был сформирован алгоритм расчета отдельных характеристик плавности его хода, а также математическая модель, учитывающая распределение масс на передние и задние оси, их взаимное влияние друг на друга. Разработан алгоритм решения системы ДУ методами операционного исчисления.

Литература

1. Попов, В. Б. Расчет грузоподъемности подъемно-навесного устройства универсального энергетического средства третьего поколения / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 43–48.
2. Попов, В. Б. Аналитические выражения кинематических передаточных функций механизмов навески энергоносителей / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2000. – № 2. – С. 25–29.
3. Попов, В. Б. Анализ навесных устройств универсального энергосредства «Полесье250» / В. Б. Попов // Тракторы и с.-х. машины. – 1990. – № 12. – С. 11–14.
4. Попов, В. Б. Математическое моделирование мобильного сельскохозяйственного агрегата в режиме транспортного переезда / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2005. – № 3 – С. 13–18.
5. Попов, В. Б. Влияние параметров мобильного сельскохозяйственного агрегата на некоторые характеристики плавности его хода в режиме транспортного переезда / В. Б. Попов, С. Ф. Андреев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 1. – С. 39–44.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СО СТОРОНЫ ПОЧВЫ ПРИ ЕЁ ПАХОТЕ ПЛУГОМ ПЯТИКОРПУСНЫМ НАВЕСНЫМ ПЛН-5-35

А. О. Найдин

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

Научный руководитель В. Б. Попов

Академик В. П. Горячкин для определения силы тяги плуга предложил формулу, раскрывающую закономерности и физическую связь между основными факторами рабочего процесса плуга и общим сопротивлением, возникающим при его работе. Эти зависимости записаны в рациональном виде, поэтому и формула получила название *рациональной*. Она имеет вид:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = fG + kab + \varepsilon rabv^2,$$

где f – коэффициент, аналогичный коэффициенту трения; G – сила тяжести плуга, Н; k – коэффициент удельного сопротивления, Па; ab – размеры сечения пласта, м; ε – безразмерный коэффициент, зависящий от формы отвала и свойств почвы; ρ – плотность почвы; v – скорость, м/с.

Первый член формулы P_1 – неизбежное, всегда сопутствующее работе плуга «мертвое» сопротивление. Оно учитывает трение полевых досок и колес о почву, корпусов о дно борозды и т. д.

Член P_2 учитывает деформацию пласта в пределах применяемых скоростей. Третий член P_3 представляет сопротивление, возникающее при сообщении «живой силы», т. е. кинетической энергии пласту почвы. В течение каждой секунды через отвал проходит объем почвы, равный abc , что при плотности ρ соответствует секундной массе ρabc .

Скорость v частицы, отбрасываемой почвы пропорциональна скорости плуга:

$$v' = \varepsilon v.$$

Следовательно:

$$P_3 = \varepsilon \rho abv^2.$$

Формула В. П. Горячкина находится в полном соответствии с понятием силы:

$$P = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt}.$$

В этом выражении первый член определяет затрату усилия на сообщение постоянной массе m некоторого ускорения $\frac{dv}{dt}$, а второй – затраты усилия на сообщение постоянной скорости v некоторому количеству массы, поступающей на отвал в единицу времени $\frac{dm}{dt}$.

Принимая во внимание, что секундная масса

$$m' = \frac{dm}{dt} = \rho abv,$$

будем иметь

$$v = \frac{dm}{dt} = \rho abv^2.$$

Следовательно:

$$P = m \frac{dm}{dt} + \rho abv^2,$$

что соответствует записи формулы Горячкина в двучленном виде:

$$P = (fG + kab) + \rho \varepsilon abv^2.$$

При этом КПД плуга

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{P - P_1}{P} = 1 - \frac{fG}{P},$$

или

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{(k' + \varepsilon \rho v^2)ab}{fG + (k' + \varepsilon \rho v^2)ab}.$$

Подсчитанный по этой формуле КПД будет несколько завышен, так как не учитывает сопротивления полевых досок корпусов и затупления лезвий лемехов. Среднее значение $\eta_{\text{пл}}$ с учетом указанных факторов колеблется в пределах от 0,7 до 0,8.

Расчет силы тяги по формуле Горячкина для плуга пятикорпусного навесного ПЛН 5-35 представлен ниже:

$$f = \frac{P_1}{G}, \quad P = fG + (kab + \varepsilon abv^2), \quad P = 19770 \text{ Н};$$

$$k = \frac{ql - mr}{nl - m^2}, \quad \eta_{\text{пл}} = \frac{(kab + \varepsilon abv^2)}{fG + (kab + \varepsilon abv^2)}, \quad \eta_{\text{пл}} = 0,704;$$

$$\varepsilon = \frac{nr - qm}{nl - m^2}, \quad v = 1,5, \quad P_{\text{ст}} = Pv, \quad P_{\text{ст}} = 29950 \text{ Н} = 29,95 \text{ кН}.$$

Литература

1. Теоретические основы земледельческой механики по В. П. Горячкину.
2. Руководство по эксплуатации плуга пятикорпусного ПЛН 5-35.
3. Руководство по эксплуатации МТЗ 1523.
4. Попов, В. Б. Влияние параметров механизма навески и плуга на тягово-энергетические показатели пахотного агрегата / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого – 2013. – № 4. – С. 59–64.

СЕКЦИЯ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНОГО СЫРЬЯ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А. Агаджанов, С. Батыров

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

В литейном производстве машиностроение связано с технологическими особенностями, многие дефекты в отливках зависят от качеств формовочных материалов, т. е. от состава кварцевых песков.

При получении отливки прежние привозимые формовочные и стержневые смеси сравнивались с местными кварцевыми песками.

Широкое внедрение в промышленных отраслях достижений научно-технического прогресса является в настоящее время одним из основных требований современности. Основным направлением в развитии экономического и социального благосостояния страны является повышение качества производимой продукции машиностроения и снижение ее себестоимости.

В настоящее время в литейном производстве при получении образцов чугунных отливок и формовки внешних и внутренних полостей основные трудности связаны с изменением свойства используемого местного песка. Чтобы понять причины этих изменений, необходимо изучить состав кварцевого песка, используемого для формовки отливок.

Различные уголки Туркменистана обладают большими запасами местного сырья для изготовления формовочного материала, используемого для получения чугунных отливок. К ним можно отнести кварцевый песок из Мянинского и Бахарлынского месторождений [1].

На основе данных из справочных руководств по составу песка, пригодного для формовки образцов отливок из чугуна, следует [2]:

1. Кварцевый песок 2К025Б – 0,5%-е содержание глинистой составляющей; содержание кремнезема – 98 %; вредных примесей 1,15 %, размеры 0,315–0,16 мм; ТДС 2138–93.

2. Огнеупорный состав ТДС3226–93. ФПВ1, ФПВ2 – содержат каолинит и другие минералы, также являются прочно связывающими при влажном условии. Огнеупорность 1350–1580 °С. Вредные примеси: сернистый сульфид – 0,2–0,3 %; CaO + MgO – 0,2–0,3 %; K₂O + Na₂O – 0,3 %.

В результате исследования кварцевого песка на отдельном участке месторождения Мяне-Чяче в зависимости от его толщины по результатам химического анализа и размере зерен (гранулометрического) выявлены следующие элементы количественного распределения: состав оксида кремния (SiO₂) – 93,76 %; оксида алюминия (Al₂O₃) – 1,93 %; оксида железа (Fe₂O₃) – 0,66 %. Толщина части кварцевого песка при количественном распределении размера зернистости составляет от толщины рабочей фракции (0,1–0,5 мм) 83,3 % [3]. В лаборатории Марыйского машиностроительного завода проводились анализы местных кварцевых песков при помощи влаги (TDS23409 5–93), газопроницаемости (TDS23409 6–93), глинистой составляющей (TDS23409 18–93) и гранулометрического состава (TDS23409 24–93).

По глубине и распространению площади карьера химический состав кварцевого рудного песка месторождения Мянэ-Чяче характеризуется улучшенным составом Fe_2O_3 [4].

Лабораторные анализы дают обоснование использовать Мяннинское и Бахарлынкское месторождение кварцевых песков для формовочных и стержневых смесей в литейном производстве.

Есть возможность использовать местное сырье в литейном производстве в виде облицовочной (смесь для изготовлений рабочего слоя формы) смеси. Это дает перспективные возможности использовать местное сырье не только в машиностроении, но и в других отраслях промышленности.

Возможность снижения до некоторой степени содержания оксидов железа и алюминия и увеличить состав основного вещества (кремнезема) удалось с помощью применения метода измельчения кварцевого рудного песка и очищения его от ила и соли. Полученный результат показан в табл. 1 [4].

Таблица 1

**Содержание оксидов железа и алюминия после применения
метода измельчения кварцевого рудного песка**

Химический состав	В процентах
Оксид кремния SiO_2	92–94
Оксид алюминия Al_2O_3	3,7
Оксид железа Fe_2O_3	0,14
Оксид кальция CaO	0,44
Оксид магния MgO	0,87
Оксид калия K_2O	0,1
Оксид натрия Na_2O	0,1
Оксид титана TiO_2	0,04

Из них Fe_2O_3 , CaO , (Al_2O_3) и TiO_2 считаются вредными примесями.

Физико-механические свойства:

- плотность – 2,64 г/см³;
- водопоглощение – 8,24 %.

Состав минералов:

- кварц 72–92 % (0,1–05 мм);
- наиболее распространенная группа минералов, образующих земную кору, – 5,7–19,1 %;
- кальцит – 0,2–1,5 %;
- слой почвы (слюда), образованный минералами калия, магния, железа, лития, а в некоторых случаях и группы минералов алюмосиликата натрия, – 3,2–3,5 %.

Общая глубина площади кварцевого песка месторождения Бахарлы составляет 60–65 м. Объемная масса кварцевого песка месторождения составляет 1,82 т/м³. Естественная влажность 5,6 % [1]. Результаты проведенного химического анализа показаны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Средний химический состав песка

Составные части	В процентах
Оксид кремния SiO ₂	89,18
Оксид алюминия Al ₂ O ₃	3,7
Оксид железа Fe ₂ O ₃	0,25
Оксид кальция CaO	2,07
Оксид магния MgO	0,49
Общее количество оксида серы SO ₃	1,65
Общее количество	97,34

Таблица 3

Примеси железа в месторождении

Составные части	В процентах
Оксид кремния SiO ₂	85,68
Оксид алюминия Al ₂ O ₃	4,39
Оксид железа Fe ₂ O ₃	0,45
Оксид кальция CaO	2,34
Оксид магния MgO	0,61
Оксид магния Na ₂ O + K ₂ O	1,38
Общее количество оксида серы SO ₃	1,78
Общее количество	96,63

На основании результатов опытов, проведенных в производстве, можно отметить, что при испытании 20 г образцов смеси, проведенной с соответствующей последовательностью, было получено 5,7–6,5 % влаги (ГОСТ 23409 5–93).

При возвращении газопроницаемости к естественной влажности (5,6 %), определенной по формуле $K = 509,5/PT$ (см/мин), были получены величины 30–37 см/мин согласно ГОСТ 23409 6–93.

Глинистые вещества в составе песка определяются методом промывки. TDS 23409 18–93 [2]. Результаты эксперимента составляют 5–7 %.

Результаты определения размера зернистости, просеянной в сухом состоянии на сите, проведенные методом количественного распределения, соответствуют требованиям TDS 23409 24–93.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Для формовки образцов чугуна требуется песок, содержащий 3,5–4 % влажности [3]. Учитывая, что существует возможность содержания 3,5–4 % влажности местного песка в соответствии с требованиями TDS23409 5–93, можно отметить, что данный песок пригоден для использования.

2. В соответствии с требованиями литья при получении газопроницаемости (10–60 см/мин) приготовленного песка можно применять отливки, сделанные из

цветных металлов. Появляется возможность использования его для производства чугуна при соблюдении соответствующих требованиях технологии.

3. Основываясь на результатах анализа состава песка из месторождения Бахарлы, можно сделать вывод, что данный песок может быть использован не только для формовки внешней полости отливки, но и для формовки его внутренней полости.

4. Если представить, что для производства отливок возможно использование местного сырья, состав которого будет соответствовать требованиям TDS3226–93, то можно будет использовать его при приготовлении огнестойких покрытий. Это даст возможность снизить себестоимость отливок.

Литература

1. Результаты анализа «Türkmengeologiya» (Рапорт № 0/1900).
2. База нормативной документации : ГОСТ 3594.7–93.
3. Невогатов, Ю. У. Специальные виды литья / Ю. У. Невогатов, В. И. Тамаровский. – М., 2005.
4. Ефимова, В. А. Специальные способы литья / В. А. Ефимова. – М., 2001.
5. Фишкин, Ю. Е. Наладка и эксплуатация формовочного и стержневого оборудования / Ю. Е. Фишкин, В. Г. Крымов, О. А. Лавренко, 2006.
6. Сварика, А. А. Формовочные материалы и смеси : справ. техника / А. А. Сварика, 2003.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОПЛАЗМЕННОГО АНОДИРОВАНИЯ

А. Г. Речиц

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

Научный руководитель И. И. Злотников

Технология микроплазменного анодирования (МПА) основана на анодном окислении таких металлов, как алюминий, титан, магний и их сплавов в растворе электролита (щелочном или кислотном) при условии протекания на поверхности анода микроплазменных разрядов. Под действием высокого напряжения на поверхности металла возникают мигрирующие точечные разряды, под действием которых поверхностный слой окисляется с образованием оксидно-керамического покрытия, прочно сцепленного с основой и состоящего из кристаллических оксидов металлов (для чистого алюминия – это оксид алюминия Al_2O_3). Согласно литературным данным [1], [2], разряды, происходящие при МПА, являются газовыми электрическими разрядами, которые возникают в результате электрического пробоя парогазовых «пробок» в микропорах формирующегося пористого оксидного слоя. Такие покрытия обладают комплексом ценных свойств: высокая механическая прочность и термостойкость, высокие диэлектрические свойства, коррозионная стойкость, абразиво- и износостойкость, хорошие декоративные качества. Регулируя составы электролита и токовые режимы проведения оксидирования, можно получать покрытия различного функционального назначения.

Если используются не чистый алюминий, а алюминиевые сплавы, то атомы легирующих металлов способны внедряться в кристаллическую решетку оксидов алюминия, изменяя структуру и свойства керамического покрытия [1], [2]. Но такой способ управления структурой покрытия имеет ограниченное применение. Из тех же источников известно, что при МПА возможен переход ионов металлов и неметаллов

из электролита в оксидный слой, что изменяет его строение и физико-механические свойства. Например, переход ионов кремния при использовании щелочных электролитов, содержащих силикаты натрия или калия. Поэтому, изменяя составы электролита и токовые режимы проведения анодирования, можно целенаправленно изменять нужные свойства получаемых оксидно-керамических покрытий. Однако в настоящее время еще не разработан общий механизм направленного регулирования кристаллической структуры и свойств покрытий методом внедрения ионов из электролитов.

Целью данной работы является изучение технологии МПА алюминия в силикатно-щелочных электролитах, исследование влияния составов электролитов на декоративные и оптические свойства получаемых покрытий и получение образцов с черными светопоглощающими покрытиями.

Интерес к черным светопоглощающим покрытиям связан с тем, что они широко применяются в деталях оптики для снижения рассеянного светового фона, тепловых излучателях, а также для преобразования солнечного излучения в тепло в солнечных коллекторах. В последнем случае в качестве удобного конструкционного материала солнечных коллекторов, на который наносят такие покрытия, часто является алюминий и его сплавы. Черное покрытие кроме высокой светопоглощающей способности должно обладать высокой адгезией к алюминиевой основе, стойкостью к воздействию солнечного света, а также обеспечивать защиту металлической поверхности от коррозии и атмосферного воздействия. В научно-технической литературе есть сообщения о возможности использования технологии МПА для получения черных светопоглощающих покрытий на алюминиевых сплавах, в частности этого можно достигнуть, вводя в электролит ионы молибдена [3]. Однако есть определенные технические сложности в применении МПА для получения черных покрытий с высоким коэффициентом поглощения солнечного света.

Для достижения поставленной цели была изготовлена лабораторная установка для реализации технологии МПА алюминиевых сплавов. В качестве образцов для исследований использовали алюминиевую фольгу марки АД1 толщиной 100 мкм, из которой вырезали прямоугольные электроды площадью 10 см². Процесс МПА проводили одновременно на двух одинаковых образцах в симметричном анодно-катодном режиме с использованием промышленного переменного тока частотой 50 Гц при постоянной плотности тока, равной $j \approx 6$ А/дм², которую поддерживали, повышая в ручном режиме напряжение по мере роста толщины покрытия, начиная с нескольких вольт до 250 В. Такого конечного напряжения было достаточно для получения покрытий толщиной до 50 мкм. После завершения процесса нанесения покрытия образцы извлекали из электролита, промывали проточной водой и сушили до полного удаления влаги.

Основываясь на литературных данных [1], [2], в качестве базового электролита использовали водный раствор, содержащий натриевое жидкое стекло (ЖС), представляющее собой раствор силикатов натрия – 50 г/л и гидроксид калия (КОН) – 2 г/л. Для придания покрытиям черного цвета в электролит добавляли калий молибденовокислый (K₂MoO₄), в количестве 0,4–1,0 г/л. При использовании электролитов с более высоким содержанием ЖС и КОН покрытия формируются более быстро, но их поверхностный слой состоит из чистого очень рыхлого оксида кремния, который плохо окрашивается в черный цвет. Применение электролитов с меньшей концентрацией ЖС и КОН приводит к тому, что начало искрения начинается только при напряжении более 200 В и получить покрытия заметной толщины не удалось.

Динамика процесса МПА образца из алюминиевой фольги в базовом электролите в течение первых 20 мин показана на рис. 1. На образцах хорошо виден процесс зарождения и роста количества микроплазменных разрядов на поверхности алюминия.

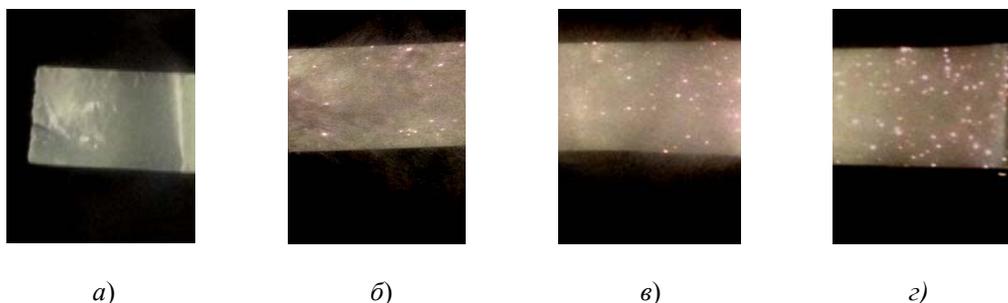


Рис. 1. Динамика процесса МДО на образце из алюминиевой фольги:
а – 1 мин; б – 10 мин; в – 15 мин; з – 20 мин

В результате проведенных опытов на образцах их алюминиевой фольги марки АД-1 в базовом электролите были получены оксидно-керамические покрытия толщиной примерно 50 мкм почти белого цвета.

Дальнейшие исследования показали, что ведение K_2MoO_4 в состав базового электролита не оказывает заметного влияния на характер протекания процесса МПА, только немного снижается напряжение начала микроискрового процесса, что связано с увеличением проводимости раствора. Но при этом скорость роста толщины покрытия увеличивается и при одном и том же времени проведения процесса обработки толщина получаемого покрытия примерно на 20 % больше, чем у покрытий, полученных в базовом электролите. Покрытия, полученные в электролитах, содержащих K_2MoO_4 , приобретают черную окраску, причем не только в поверхностном слое, но и по всей толщине покрытия. Это свидетельствует о том, что ионы молибдена встраиваются в кристаллическую структуру оксида алюминия. Согласно патенту [3] черная окраска оксидно-керамического покрытия обусловлена образованием в его составе высокодисперсных оксидов молибдена и соединений типа $Al_2(MoO_4)_3$. Для подтверждения возможности внедрения ионов других металлов в структуру оксидно-керамического покрытия были проведены опыты, в которых в базовый электролит вводили такие соли, как сульфат меди ($CuSO_4$) и хлорид железа ($FeCl_3$). В обоих случаях получали покрытия с характерным цветом – синим для ионов меди и желто-коричневым для ионов железа.

На рис. 2 приведен типичный вид поверхности получаемых оксидно-керамических покрытий; хорошо видна высокая шероховатость поверхности. На рис. 3 показана последовательность приобретения черного цвета покрытиями, при их МПА в электролитах, содержащих различное количество молибденовокислого калия. Полученные покрытия очень прочны и имеют хорошие декоративные качества.

Измерения, проведенные с помощью фотометра ФО-1, показали, что коэффициент поглощения света (отношение величины поглощенной световой энергии к величине световой энергии, падающей на поверхность) полученных черных покрытий составляет 90–92 %. Высокий коэффициент поглощения достигается не только потому, что покрытие имеет черный цвет, но и потому, что поверхность покрытия имеет выраженную шероховатую структуру, что способствует диффузному рассеянию света.

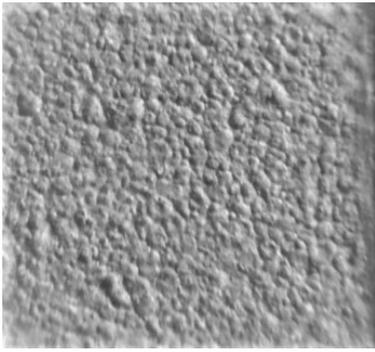


Рис. 2. Микрофотография поверхности покрытия на алюминиевой фольге (увеличение ≈ 100 раз)

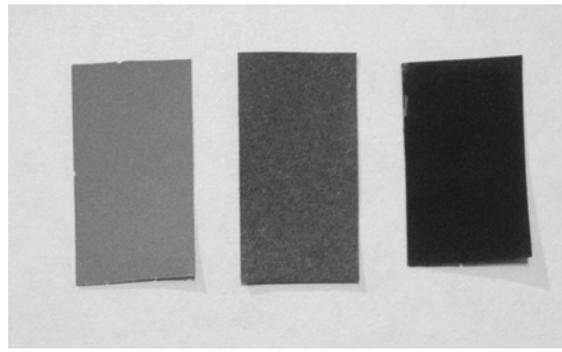


Рис. 3. Фотография покрытий, полученных на алюминиевой фольге при содержании K_2MoO_4 в составе базового электролита 0,4 г/л, 0,7 г/л и 1 г/л. Время обработки – 15 мин

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

– МПА алюминия в щелочно-силикатных электролитах, содержащих соли металлов, сопровождается внедрением ионов металлов в оксидно-керамическое покрытие, что приводит к изменению цвета покрытия;

– регулируя состав электролита, можно получить на поверхности алюминия прочные керамические покрытия черного цвета с высоким коэффициентом светопоглощения и хорошими декоративными качествами.

Литература

1. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление / Е. В. Парфенов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2014. – 380 с.
2. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов : в 2 т. / под ред. И. В. Суминова. – М. : Техносфера, 2011. – Т. 2. – 511 с.
3. Способ получения оптически черного оксидно-керамического покрытия на поверхности алюминия и его сплавах : пат. РФ 2459890 : МПК С 25D 11/14, С 25D 15/00 / Беспалова Ж. И., Паненко И. Н. ; опубл. 27.08.2012 // Офиц. бюл. – 2012. – № 24.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ SCRATCH TEST

Р. Е. Гутман, П. В. Асвинова

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

Научный руководитель И. Н. Степанкин

На сегодняшний день самыми распространенными способами получения данных о статических упруго-прочностных свойствах горных пород являются стандартные лабораторные методы одноосного и многоосного сжатия, а также бразильский тест. Главным недостатком стандартных методик является то, что в ходе исследований образец разрушается и таким образом отсутствует возможность проведения дальнейших исследований, к тому же данные методы не могут предоставлять результаты во всем интервале, а лишь точечно [1].

Достаточно надежным и дешевым методом оценки прочностных свойств горных пород и получения данных, необходимых для инженерных расчетов, является

метод скрэтчирования. Метод позволяет получать профиль прочностных свойств во всем интервале зерна [2].

Методика скрэтчирования заключается в создании неглубокой бороздки на поверхности исследуемого образца с помощью резца. В процессе скрэтчирования обычно контролируются такие кинематические параметры, как глубина резания и скорость, направленная тангенциально к поверхности образца. Датчиками измеряются значение и направление действия сил на резец.

Целью данной работы являлась разработка методики проведения Scratch Test применительно к образцам кернового материала нефтяных месторождений Республики Беларусь, а также установление корреляционных зависимостей между результатами, полученными с помощью Scratch Test и стандартными методами.

При участии авторов данной статьи была разработана установка, позволяющая неразрушающим методом определять механические свойства горных пород во всем интервале отбора зерна. Общий вид установки показан на рис. 1.

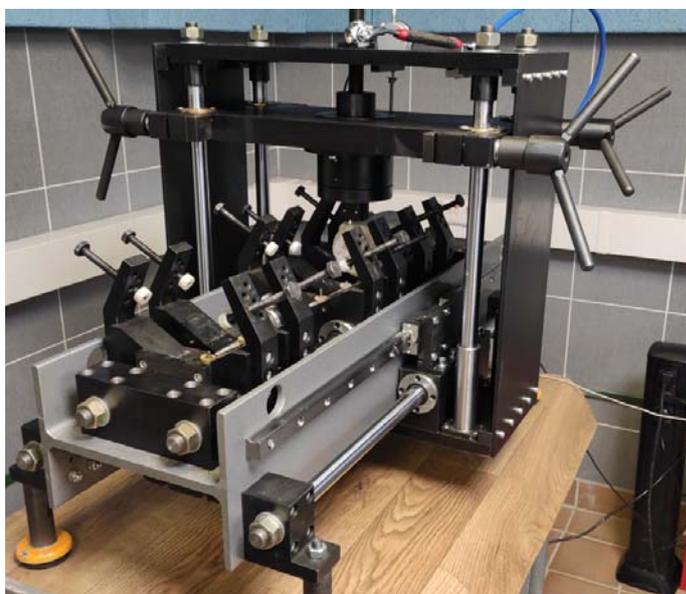


Рис. 1. Общий вид установки Scratch Test

Для верификации метода Scratch Test с другими методиками определения прочностных характеристик горных пород были подготовлены образцы из тампонажного цемента, применяемого при строительстве скважин. Образцы готовили по ГОСТ 1581–96. Состав: Портландцемент ПЦТ I-G-CC-1, вода пресная, водоцементное отношение 0,44.

При проведении исследований глубина резания варьировалась в диапазоне 0,1–0,7 мм. Разработанное программное обеспечение, входящее в комплект установки, позволяет в режиме реального времени выводить на экран монитора значения вертикальной F_x и тангенциальной F_z сил, их геометрической суммы F_n , а также величину нормальных напряжений σ_n , принимаемых за предел прочности при одноосном сжатии. Пример регистрации измерений показан на рис. 2.

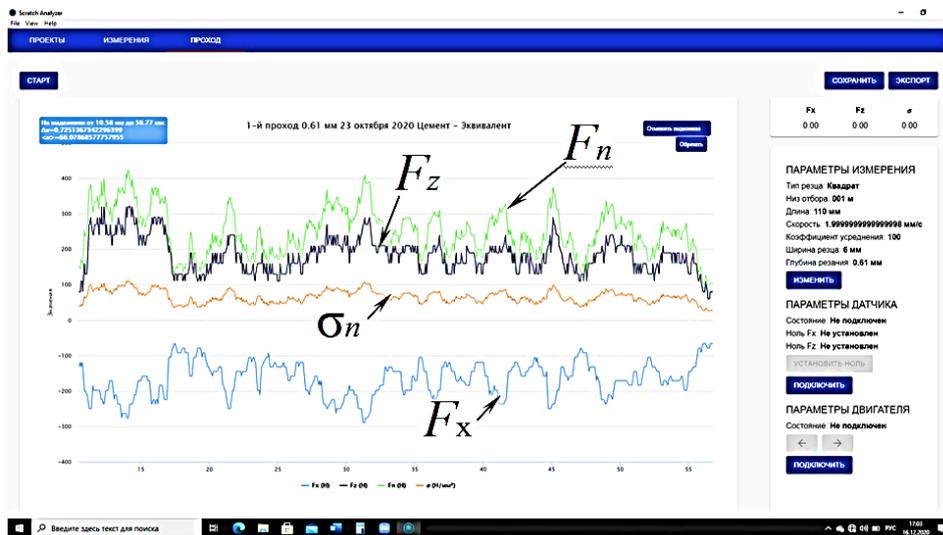


Рис. 2. Результат скрэтчивания цементного образца при глубине резания 0,6 мм

Анализ распределения величин среднего значения нормального напряжения σ_n в зависимости от глубины резания показывает, что именно в области значения глубины резания 0,5 мм зарегистрированы минимальные величины нормального напряжения (рис. 3). Для выявления пригодности полученных результатов к определению механических характеристик горных пород были проведены альтернативные исследования.

В одном из случаев стандартные образцы подвергали сжатию на испытательных стендах «Instron» и ИП1250М. По результатам испытаний полученное значение составило 62,5 МПа. Оно нанесено на диаграмму, приведенную на рис. 3, треугольным маркером.

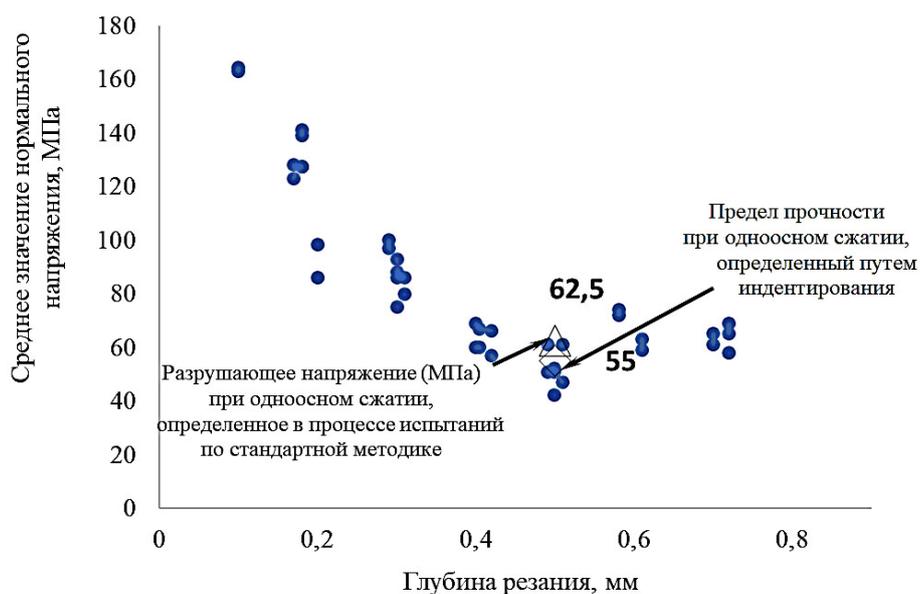


Рис. 3. Результаты оценки прочностных характеристик цементных образцов:
● – Scratch Test; Д – одноосное сжатие; ◇ – индентирование

Третьим методом определения предела прочности материала являлся метод индентирования [3], [4]. Значение искомой величины, определенное методом индентирования, составило 55 МПа (рис. 3). Для оценки степени корреляции между тремя задействованными методиками указанная величина отмечена на рис. 3 ромбическим маркером.

Как видно из результатов, приведенных на рис. 3, наблюдается корреляция между тремя примененными способами испытаний, что говорит о высокой степени достоверности результатов, получаемых методом Scratch Test. Тестовый образец цемента, изготовленный специально для отработки методики скрэтчирования, несмотря на известный состав и рецептуру, все же имеет некоторую неоднородность в поверхностном слое и в объеме материала, этим можно объяснить некоторый разброс данных, представленных на рис. 3.

Актуальность практического применения по методу Scratch Test представляется следующими аспектами:

- неразрушающий контроль кернового материала извлеченного из определенного горизонта скважины;
- многократные испытания одного и того же материала обеспечивают формирование статистически опосредованной выборки данных для получения достоверной информации о прочности материала с минимальным коэффициентом вариации;
- технические характеристики установки обеспечивают возможность исследования всех литологических образований Республики Беларусь с прочностью до 400 МПа и при диаметрах кернов в диапазоне 45–120 мм;
- конструктивные особенности установки обеспечивают возможности непрерывного мониторинга нескольких материалов в рамках одного рабочего прохода (составной керн).

Литература

1. Fjaer, E. Petroleum Related Rock Mechanics: Developments in Petroleum Science / E. Fjaer, R. M. Holt, P. Horsrud. – 2008. – 515 p.
2. McPhee, C. Core Analysis a Best Practice Guide / C. McPhee, J. Reed, I. Zubizarreta, 2015. – 829 p.
3. Способ определения предела прочности на сжатие образца горной породы : пат. ВУ 23260 / Степанкин И. Н., Халецкий А. В., Ткачев В. М., Гутман Р. Е. – Оpubл. 30.12.2020.
4. Способ определения прочности материала : пат. RU 2721089 / Степанкин И. Н., Халецкий А. В., Ткачев В. М., Гутман Р. Е. – Оpubл. 15.05.2020.

ВОДОРОД КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВИД ТОПЛИВА

Н. Ю. Дорошко

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

За последние годы водород рассматривается как безграничный и экологически чистый источник энергии. Уникальные свойства этого элемента позволяют внедрять его в различные сферы жизнедеятельности человека, благодаря чему есть шанс отказаться от традиционных и небесконечных видов топлива и снизить уровень загрязнения окружающей среды. В свободном состоянии на Земле водород встречается сравнительно редко – содержится в нефтяных и горючих газах, присутствует в виде включений в некоторых минералах, но во Вселенной он очень распространен [1].

К достоинствам этого элемента можно отнести его возобновляемость, высокую удельную теплоту сгорания (140 кДж/кг) в сравнении с углем и углеводородом, высокую детонационную устойчивость при высоких температурах, а самое главное – отсутствие выхлопных загрязнений, так как в ходе реакций образуется вода или водяной пар.

Целью настоящего исследования является демонстрация водорода в качестве альтернативного вида топлива.

Прежде чем приступить к созданию водородных топливных элементов, необходимо выбрать рациональный способ его получения. На сегодняшний день существуют несколько основных способов получения водорода: из ископаемого сырья, путем электролиза воды, пиролизом органических и неорганических веществ и плазменная конверсия. Технологически освоенным методом является обработка ископаемого сырья. Это экономически выгодная технология, но ей присущи минусы: для получения чистого водорода необходимы технологии улавливания углерода (carbon capture&storage, CCS) [2]. Перспективные методы получения водорода (пиролиз, электролиз и конверсия) имеют положительные стороны: отсутствуют выбросы CO₂, водород излучается в больших количествах, присутствует возможность получения побочной продукции. Однако в то же время эти способы не выгодны в финансовом плане и плане энергозатратности. В настоящее время с большим энтузиазмом начинают осваиваться данные методы получения водорода для снижения затрат и увеличения эффективности. Диапазон затрат на производство водорода различными методами предоставлен на рис. 1. Чувствительность на данном графике означает меру его реакции на уровень предлагаемой ему цены и, соответственно, его готовности совершить покупку.



Рис. 1. Диапазон затрат на производство водорода различными методами: CAPEX и OPEX – затраты на оборудование и расходы на обеспечение работы предприятия соответственно; WACC – средневзвешенная стоимость капитала компании

После получения водорода возникает необходимость в его хранения и транспортировки, поскольку водород обладает уникальными свойствами. Существует множество способов его транспортировки в различных состояниях. Респектабельными методами являются хранение водорода в химических соединениях и в гидридном состоянии (в жидкой форме). Преимущество хранения и транспортировки водо-

рода в соединениях (аммиак, метанол, этанол и др.) заключается в том, что его можно отправлять на дальние расстояния по трубопроводу с высокой плотностью содержания. Однако в этих формах хранения водорода среда хранения используется однократно, и необходимы дорогостоящие в изготовлении баллоны для хранения. Если хранить водород в гидридной форме, то нет необходимости в громоздких баллонах и специальных сосудах, а объем системы уменьшается в 3 раза. Снижаются расходы на конверсию и сжижение водорода [4].

Водород по энергоёмкости в массе опережает все традиционные виды топлива (рис. 2). Что обуславливает высокий КПД двигателей и большое выделение тепла при сгорании?

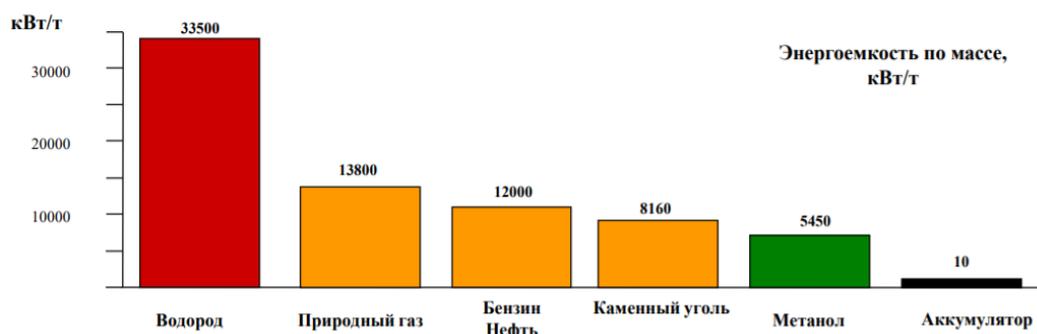


Рис. 2. Энергоёмкость различных видов топлива в массе [3]

С высокой теплопроводностью ($7,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$) водород внедряют в магистрали системы отопления, что позволяет уменьшить расходы природного сырья (уголь, древесина, керосин и т. п.) на отопление. Изотопы водорода используют в ракетном топливе, так как они обладают еще большей энергоёмкостью. Водород в качестве топлива используют автомобильные концерны: Honda, Toyota, Ford, Hyundai и др. В автомобильной индустрии водород особенно ценится по ряду причин: никаких токсичных выхлопов, никакого шума, высокий КПД, возобновляемость данного источника энергии. Водород – не опаснее природного газа. Он взрывается только при скоплении в закрытых местах, но в отличие от природного газа вероятность скопления водорода ничтожно мала: в силу его легкости он мгновенно поднимается в верхние слои атмосферы. Причем на разрабатываемых водородных автомобилях предусматриваются аварийные клапаны, которые в случае нарушения целостности бака открываются и спускают водород для предотвращения взрыва.

Таким образом, водород является отличным источником энергии, имеющим массу полезных свойств. Его можно использовать в различных отраслях жизнедеятельности человека, но интерес к водородным топливным элементам возрастает только тогда, когда цены на традиционные виды топлива увеличиваются. В ближайшее время будут разработаны варианты внедрения водорода как топлива, поскольку во всем мире проходят исследования по его получению, хранению и использованию.

Л и т е р а т у р а

1. Режим доступа: <https://www.chem21.info/info/1177251/>.
2. Режим доступа: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/energo_oct_2020.pdf.
3. Режим доступа: <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149860616/%D0%A2%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%91.%D0%92.pdf>.
4. Режим доступа: https://studme.org/152661/tehnika/gidridnaya_sistema_hraneniya_vodoroda.

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАУГЛЕРОЖЕННЫХ СЛОЕВ
КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 42CrMoS4****Е. П. Поздняков, А. В. Рабков, Н. С. Коноваленко***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь***А. В. Радионов***ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Республика Беларусь*

Научный руководитель И. Н. Степанкин

В условиях усталостного изнашивания деталей машин и инструмента одним из основных параметров является износоустойчивость материалов. Для деталей, изготавливаемых из сталей, основным параметром повышения износостойкости является твердость, которая повышается с увеличением углерода в ней. При выборе инструментальных сталей для изготовления различных деталей, работающих в условиях воздействия пульсирующих нагрузок, необходимо учитывать их пониженную технологическую обрабатываемость и дороговизну. Немаловажным фактором является и низкая вязкость сердцевины деталей из этих материалов, которая не оказывает сопротивления продвижению трещин в более глубокие слои материала. Одним из возможных путей решения этой проблемы является применение улучшаемых сталей с диффузионным упрочнением поверхности [1].

Целью работы является установление влияния длительности цементации на износостойкость науглероженных слоев стали 42CrMoS4.

Объектом исследований являлись термодиффузионно-упрочненные слои стали 42CrMoS4. 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. Окончательная термическая обработка предполагала проведение закалки в масле с температуры 860 °С и низкотемпературного отпуска при 200 °С в течение 1 часа. Исследования микроструктуры и особенностей разрушения упрочненных слоев проводились на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление микрошлифов проводилось в 2,5–5%-м спиртовом растворе HNO₃. Распределение микротвердости термодиффузионно-упрочненных слоев определяли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 2Н. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое инструмента при многократном контактом воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [2]. Установка обеспечивает контактное нагружение торцевой поверхности плоской части образца за счет его прокатывания по рабочей поверхности подпружиненного дискового контртела. Регистрация значений износа заканчивалась при достижении глубины лунки износа 0,6 мм или $30 \cdot 10^3$ циклов нагружения. Испытания проводились при контактных напряжениях с амплитудами 1100 и 1300 МПа.

Структура металлической матрицы термоупрочненных науглероженных слоев стали 42CrMoS4 состоит из мартенсита отпуска и остаточного аустенита с присутствием карбидной фазы. Включения карбидной фазы распространяются на глубину 0,6–0,7 мм и отличаются морфологически. В образце после 8-часового науглероживания отдельные включения достигли размера 10 мкм (рис. 1, в). При увеличении длительности цементации до 12 часов обнаружена коагуляция карбидов (рис. 1, г).

Размер отдельных конгломераций достигает 30 мкм. Объем карбидной фазы при изменении длительности ХТО увеличивается с 25–30 до 35–40 %.

Анализ графиков распределения микротвердости науглероженных слоев показал, что микротвердость на поверхности образца после 8-часовой цементации составляет 8000–8200 МПа, а в сердцевине – около 6000 МПа (рис. 1, в). Увеличение времени насыщения углеродом приводит к снижению этих показателей по всему сечению слоя – микротвердость поверхности не превышает 7300 МПа, а сердцевины не более 5600 МПа. Отличительной особенностью слоя после 12-часового упрочнения является наличие площадки равной твердости – 6500–6700 МПа, отмеченной на глубине 0,25–1,15 мм. Общая толщина диффузионных слоев составила 1,8–2,0 мм.

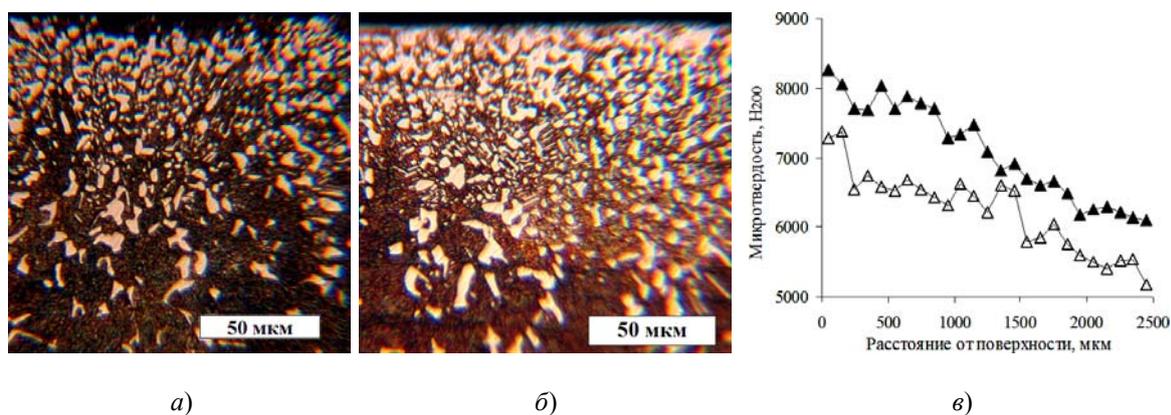


Рис. 1. Структура заэвтектоидной зоны диффузионных слоев стали 42CrMoS4 после цементации в течение 8-ми (а) и 12-ти (б) часов, распределение микротвердости слоев: ▲ – 8-часовая цементация; Д – 12-часовая цементация

На рис. 2 приведен график интенсивности износа цементованных слоев стали 42CrMoS4 в зависимости от числа циклов нагружения в условиях воздействия на поверхностный слой образцов контактных напряжений с различными амплитудами – 1100 МПа и 1300 МПа.

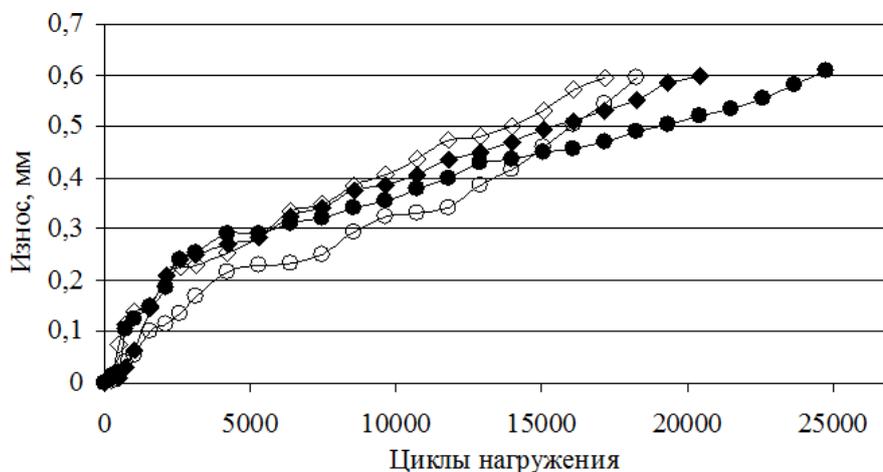


Рис. 2. Зависимости износа от числа циклов нагружения диффузионных слоев стали 42CrMoS4 после 8-часовой (◇, ◆) и 12-часовой (○, ●) цементации: ●, ◆ – 1100 МПа; ○, ◇ – 1300 МПа

Анализ кривых показал, что зависимости износа диффузионных слоев имеют близкое распределение (рис. 2). Отчетливо выделяются два этапа изнашивания. На первом этапе происходит приработка контактирующих поверхностей образцов и контртела с высокой интенсивностью износа. За первые 1000–1500 циклов нагружения глубина лунки износа достигает 0,1 мм. Второй этап отличается снижением интенсивности изнашивания.

Проведенные испытания на контактную усталость при величине контактной нагрузки 1300 МПа показали, что увеличение длительности насыщения углеродом с 8-ми до 12-ти часов незначительно повысило стойкость слоя стали 42CrMoS4 к усталостному изнашиванию – количество циклов нагружения возросло с 17200 до 18280 при достижении глубины лунки износа 0,6 мм. При снижении величины контактных напряжений до 1100 МПа диффузионный слой повел себя закономерно – повысилась стойкость. После 8-часовой ХТО количество циклов нагружения составила 20440, а после 12-часовой – 24760.

Механизм разрушения всех науглероженных слоев также оказался одинаковым. После этапа приработки образцов с контртелом наблюдается интенсивный рост трещин контактной усталости на глубине 0,2–0,3 мм. Он связан с величиной воздействующих на материал напряжений. На данной глубине присутствует карбидная фаза в виде цементитной сетки (рис. 3). В межфазной области между зернами цементита и мартенсита происходит продвижение трещин контактной усталости, которые достигают критических размеров, формируя крупные питтинги (рис. 3). Наличие остаточного аустенита в пакетах мартенсита мало влияет на продвижение трещин, так как их распространение происходит по межфазной области цементита и мартенсита.

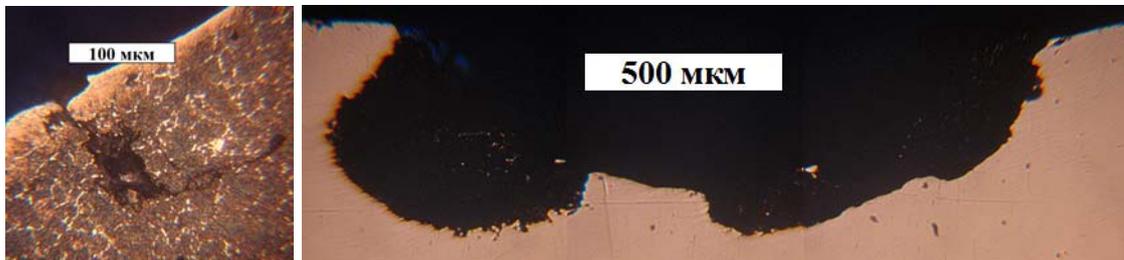


Рис. 3. Особенности разрушения науглероженных слоев стали 42CrMoS4

Исследовано структурообразование и свойства термоупрочненных науглероженных слоев стали 42CrMoS4. Анализ данных позволил сделать следующие выводы:

1. Толщина заэвтектоидной зоны после увеличения длительности цементации с 8-ми до 12-ти часов не возросла и составила 0,6–0,7 мм. Однако увеличение времени насыщения углеродом привело к возрастанию объемной доли карбидной фазы с 25–30 % до 35–40 %, а также к коагуляции карбидов, максимальный размер которых увеличился с 10 до 30 мкм.

2. Увеличение времени насыщения углеродом привело к снижению микротвердости по сечению науглероженных слоев. Микротвердость на поверхности образца после 8-часовой цементации составляет 8000–8200 МПа, а после 12-часовой – 7300 МПа. Микротвердость сердцевины составила 5600–6000 МПа, начинающаяся на глубине 1,8–2,0 мм.

3. Испытаниями на контактную усталость определено, что при увеличении науглероживания с 8-ми до 12-ти часов, а также при снижении величины контактных

напряжений с 1300 до 1100 МПа, износостойкость слоя стали 42CrMoS4 возрастает. Максимальная износостойкость (24760 циклов нагружения) отмечена у слоя, сформированного посредством 12-часовой цементации, и испытанного при величине контактных напряжений с амплитудой 1100 МПа.

Литература

1. Степанкин, И. Н. Применение конструкционных сталей с диффузионным упрочнением поверхности для производства мелкогабаритного штампового инструмента / И. Н. Степанкин, Е. П. Поздняков, О. Г. Девойно // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–8 апр. 2016 г. / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2016. – С. 142–144.
2. Устройство для испытания на контактную усталость и износ : пат. ВУ 7093 / Степанкин И. Н., Кенько В. М., Панкратов И. А. – Опубл. 28.02.2011.

МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТЕРМОДИФФУЗИОННО-УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 16CrMnS5

М. Е. Буйко, Н. С. Коноваленко, Е. П. Поздняков, А. В. Рабков

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

А. В. Радионов

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

Научный руководитель И. Н. Степанкин

Во многих случаях эксплуатационные свойства деталей машин зависят от механических свойств поверхностного слоя материала. Для повышения свойств сталей используют различные способы поверхностного упрочнения. Наиболее распространенными являются высокотемпературные процессы диффузии углерода в поверхностный слой детали – цементация и нитроцементация. Их применение направлено на получение высокой твердости и износостойкости поверхностного слоя сплавов при сохранении вязкой сердцевины. В качестве упрочняемых материалов традиционно используют низкоуглеродистые стали марок 18ХГТ, 12ХНЗА, 20Х, 20ХНЗА и др. В настоящее время на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга БМК» отлажена технология плавки новой марки стали 16CrMnS5 в соответствии с DIN EN 10084, экспортируемой в страны Европейского Союза. Однако на территории Республики Беларусь, а также стран СНГ, она не получила широкого распространения, что связано с низкой информативностью о ее механических и эксплуатационных свойствах. В работах [1], [2] приведены исследования цементованных и нитроцементованных слоев стали 16CrMnS5, сформированных в атмосферах низкого давления. Общая толщина слоя, в данных случаях, не превысила 0,8 мм. Технология получения диффузионного слоя в вакууме требует применения дорогостоящего оборудования и высокой квалификации специалистов и применяется в условиях массового и крупносерийного производств. Актуальной является задача исследования влияния структурных и фазовых составляющих на свойства цементованных и нитроцементованных слоев стали 16CrMnS5, полученных в твердых карбюризаторах.

Целью работы является установление влияния продолжительности цементации и нитроцементации на структурообразование и микротвердость модифицированных слоев стали 16CrMnS5.

Объектом исследований являлись термодиффузионно-упрочненные слои конструкционной стали 16CrMnS5. Диффузионное насыщение поверхности образцов осуществлялось двумя способами. Первый способ предполагал проведения цементации при температуре 920 °С в течение 8-ми и 12-ти часов в древесно-угольном карбюризаторе с добавлением углекислого бария. Второй способ заключался в проведении нитроцементации при температуре 850 °С в течение 6-ти и 8-ми часов в древесно-угольном карбюризаторе с добавлением карбамида. Окончательная структура и свойства слоев придавались путем проведения закалки с температуры 860 °С в масле и низком отпуске при температуре 200 °С в течение 1 часа. Исследование микроструктуры осуществлялось на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Травление микрошлифов проводилось в 2,5–5%-м спиртовом растворе азотной кислоты. Распределение микротвердости по сечению модифицированных слоев определялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 2Н. Определение объемной доли карбидной фазы в заэвтектоидном слое определялось методом Розивалля.

С целью установления влияния химико-термической обработки (ХТО) на сплав 16CrMnS5 были исследованы его структура и свойства в состоянии поставки и после объемной закалки (860 °С) с низким отпуском. Исходная структура стали представляет собой неравномерно распределенную феррито-перлитную смесь (рис. 1, *а*), твердостью 170–174 НВ. После закалки и отпуска структура сплава представляет мелкозернистую феррито-цементитную смесь (рис. 1, *б*). Твердость образца оказалась низкой – 30–33 HRC.

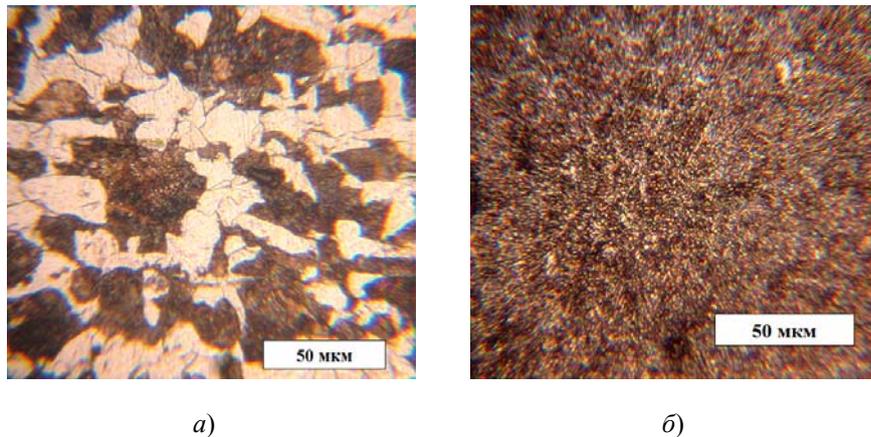
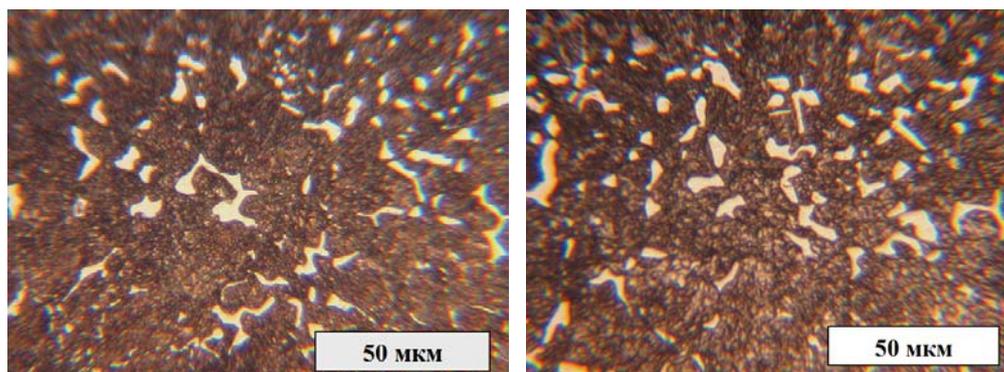


Рис. 1. Микроструктура стали 16CrMnS5 в состоянии поставки (*а*) и после закалки с низким отпуском (*б*)

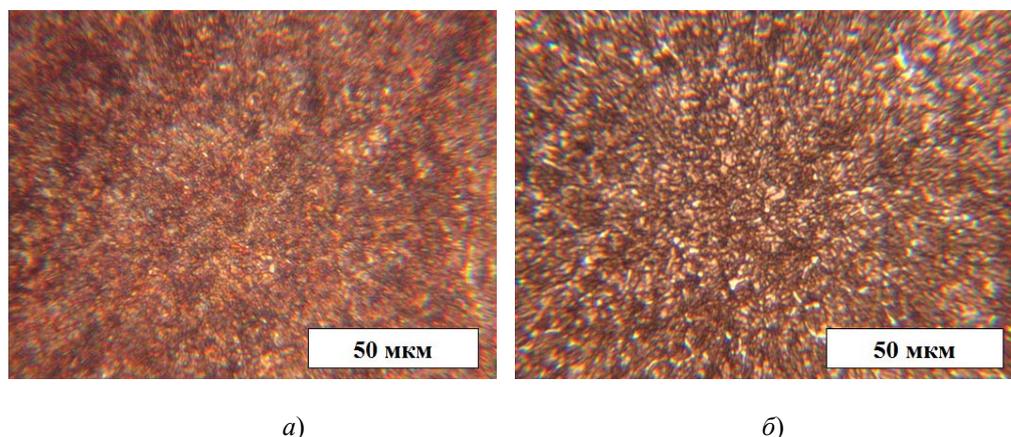
После проведения ХТО с последующей термической обработкой микроструктура и твердость модифицированных слоев кардинально изменились. Структура поверхности науглероженных слоев представляет мартенситно-аустенитную матрицу с карбидными включениями (рис. 2, *а, б*). При увеличении длительности цементации с 8-ми до 12-ти часов не выявлено различий в морфологии карбидной фазы. Карбиды представлены в виде отдельных сферических и продолговатых включений с максимальными размерами не более 20 мкм. Такое равномерное распределение и морфология карбидов, которые не образуют сплошную карбидную сетку, может способствовать повышению стойкости сплава к изнашиванию в условиях воздействия пульсирующих контактных напряжений. При увеличении длительности цементации немного возросла объемная доля карбидной фазы в металлической матрице – с 18 до 26 %. Толщина заэвтектоидной зоны составила около 0,15–0,20 мм от поверхности.



а) б)
Рис. 2. Морфология карбидной фазы в поверхностном термодиффузионно-упрочненном слое стали 16CrMnS5 после проведения цементации в течение 8-ми (а) и 12-ти (б) часов

Микроструктура нитроцементованных (рис. 3) слоев стали 16CrMnS5 значительно отличается от цементованных (рис. 2). Структура нитроцементованного слоя, сформированного после 6-часовой ХТО, состоит из мартенсита и остаточного аустенита (рис. 3, а). После увеличения длительности ХТО до 8-ми часов (рис. 3, б) в поверхностном слое обнаружены мелкодисперсные включения предположительно карбонитридного типа. Их размер не превышает 5 мкм. Важным отличием нитроцементованного слоя от цементованного является образование дефектной структуры с большей толщиной (до 0,1 мм), появление которой характерно после термической обработки нитроцементованных слоев [3].

Изучение графиков распределения микротвердости по сечению науглероженных слоев оказалось, что их зависимости имеют достаточно близкое распределение (рис. 4, а). Микротвердость поверхности составила 7000–7500 МПа. Далее следует плавное снижение к сердцевине твердостью 3500–4000 МПа. Небольшим отличием является повышенное значение твердости слоя, сформированного в течение 12-часовой цементации, на глубине 1,2–1,5 мм от поверхности. Общая толщина диффузионного слоев достигла 1,9–2,1 мм.



а) б)
Рис. 3. Морфология поверхности термодиффузионно-упрочненного слоя стали 16CrMnS5 после проведения нитроцементации в течение 6-ти (а) и 8-ми (б) часов

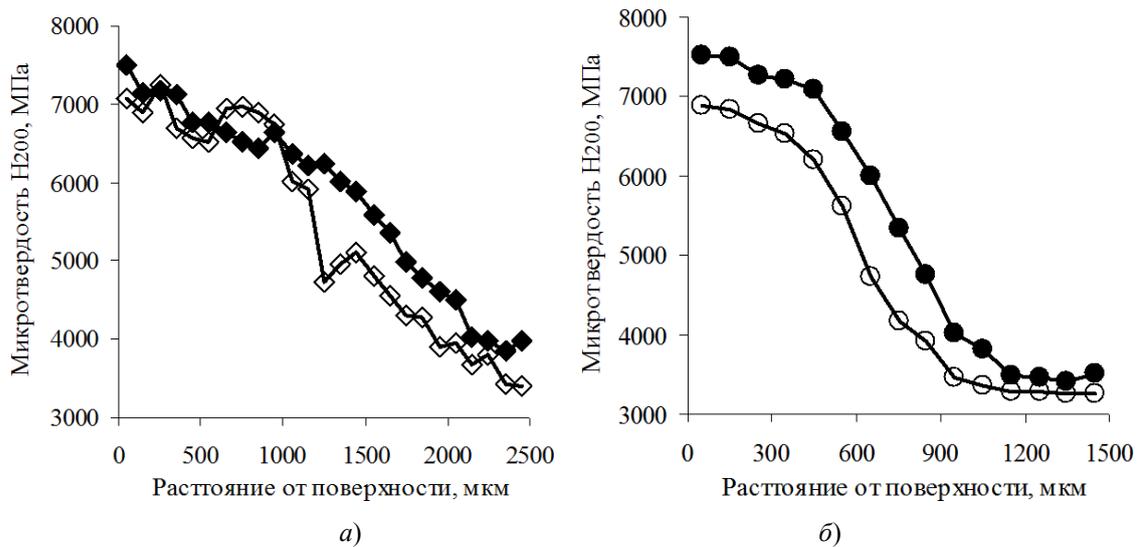


Рис. 4. Распределения микротвердости науглероженных (а) и нитроцементованных (б) слоев стали 16CrMnS5:
 ◇ – 8-часовая цементация; ◆ – 12-часовая цементация;
 ○ – 6-часовая нитроцементация; ● – 8-часовая нитроцементация

Проведение нитроцементации позволило сформировать сходные зависимости распределения микротвердости по сечению слоев (рис. 4, б). У слоя, сформированного при 8-часовой ХТО, микротвердость на 300–500 МПа выше по сравнению со слоем после 6-часовой. Как и у науглероженных слоев, твердость поверхности составила 7000–7500 МПа, а сердцевины – около 3500 МПа. Главным отличием нитроцементованных слоев от цементованных оказалось, что общая толщина составила 1,0–1,1 мм.

Проведенные исследования термообработанных диффузионных слоев стали 16CrMnS5 позволили установить следующее:

- Проведение цементации в обоих случаях формирует мартенситно-аустенитную матрицу, в которой расположены разрозненные карбиды сферической и продолговатой формы длиной не более 20 мкм. Их объемная доля при увеличении цементации с 8-ми до 12-ти часов возросла с 18 до 26 %. Обнаружено, что в слое после 8-часовой нитроцементации начали формироваться мелкодисперсные карбонитриды, которые не обнаружены в слое после 6-часовой нитроцементации.

- Установлено, что на поверхности нитроцементованных слоев после проведения закалки и низкого отпуска сформировалась дефектная зона толщиной около 0,1 мм.

- Определено, что распределение микротвердости по сечению слоев имеют сходные зависимости. Микротвердость поверхности всех исследованных слоев составила 7000–7500 МПа, а сердцевины – 3500–4000 МПа. Общая толщина цементованных слоев примерно в 2 раза больше, чем нитроцементованных – 1,9–2,1 мм и 1,0–1,1 мм соответственно.

- Исследованные особенности микроструктуры, микротвердости и морфологии частиц термодиффузионно-упрочненных слоев, а также дефект поверхности нитроцементованных слоев, может сказаться на их контактной усталости.

Литература

1. Влияние содержания остаточного аустенита и размера зерна на сопротивление усталости при изгибе стали, подвергнутой цементации в атмосферах низкого давления / П. Куля [и др.] // Материаловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 8. – С. 40–43.

2. Термодинамические и экспериментальные исследования низколегированных сталей после нитроцементации в атмосферах низкого давления / Т. Моррэй [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 8. – С. 34–39.
3. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОГО ВОЛОЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПРОВОЛОКЕ

Ю. В. Мартьянов, И. А. Цырганович

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

В современном производстве тонкой проволоки важно правильно определять скоростные режимы волочения для повышения производительности процесса. Однако увеличение скорости приводит к структурным изменениям в проволоке, что может изменить эксплуатационные характеристики готового изделия [1]. В данной работе произведены исследования влияния скоростных параметров тонкого волочения на структурные изменения в проволоке при различных скоростях волочения (1–10 м/с).

Для анализа микроструктуры тонкой проволоки используется метод выявления и определения величины зерна, установленным в ГОСТ 5639–82 [2]. Для выявления границ зерен был выбран метод травления сетки перлита. Выбор метода связан с тем, что сталь 80 является эвтектоидной и состоит преимущественно из перлита.

Цель работы – определить влияния скоростных параметров тонкого волочения на структурные изменения в проволоке.

Используемый метод: экспериментальный анализ микротвердости образцов.

На рис. 1 представлен образец № 1 (скорость волочения 1 м/с). Используя метод сравнения с эталонной шкалой, был определен балл зерна.

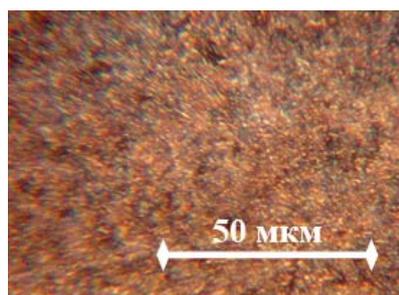


Рис. 1. Микроструктура образца № 1

На рис. 1 балл зерна равен 11. Структура мелкозернистая и однородная по всей поверхности микрошлифа. Грубые риски отсутствуют, нарушения структуры в процессе травления отсутствуют. Имеются незначительно малые неметаллические включения, которые распределены равномерно по всему сечению проволоки.

На рис. 2 представлен образец № 2 (скорость волочения 4 м/с).

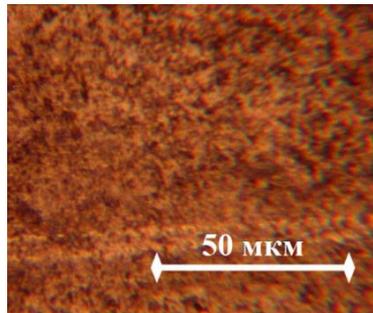


Рис. 2. Микроструктура образца № 2

На рис. 3 представлен образец № 3 (скорость волочения 6 м/с).

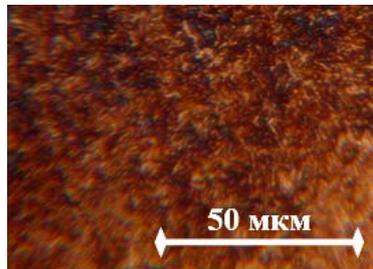


Рис. 3. Микроструктура образца № 3

На рис. 3 балл зерна равен 12. Структура зерна более мелкая по сравнению с предыдущими образцами, но имеющая зоны с увеличенными зернами ближе к центру сечения проволоки. Грубые риски отсутствуют, нарушения структуры в процессе травления отсутствуют. Имеются незначительно малые неметаллические включения, которые распределены по всему сечению проволоки. Наблюдается движение включений ближе к центру сечения проволоки.

На рис. 4 представлен образец № 4 (скорость волочения 8 м/с).

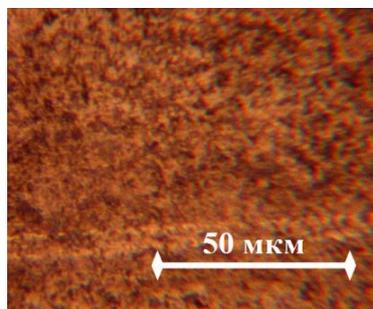


Рис. 4. Микроструктура образца № 4

На рис. 4 балл зерна равен 12. Величина зерна сходная по сравнению с проволокой, полученной при скорости волочения 6 м/с, но более однородная по всей поверхности сечения проволоки. Грубые риски отсутствуют, нарушения структуры

в процессе травления отсутствуют. Имеются неметаллические включения, которые распределены по всему сечению проволоки. Наблюдается локализация неметаллических включений ближе к центру проволоки.

На рис. 5 представлен образец № 5 (скорость волочения 10 м/с).

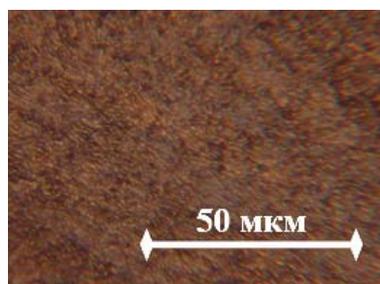


Рис. 5. Микроструктура образца № 5

На рис. 5 балл зерна равен 12–13. Структура мелкозернистая и однородная по всему сечению проволоки. Грубые риски отсутствуют, нарушения структуры в процессе травления отсутствуют. Имеются неметаллические включения, которые распределены ближе к центру сечения проволоки, по периферийным слоям сечения проволоки включения практически отсутствуют.

Средние численные значения площади зерна, количество зерен на площади 1 мм², а также другие параметры, соответствующие эталонным шкалам определенных баллов зерна, приведенные в ГОСТ5639–82, представлены в таблице.

Параметры микроструктуры образцов

Скорость волочения, м/с	Балл зерна G	Средняя площадь сечения зерна a , мм ²	Число зерен на площади 1 мм ²			Среднее число зерен в 1 мм ³	Средний диаметр зерна d_m , мм	Средний условный диаметр зерна d_u , мм
			минимальное	среднее	максимальное			
1	11	0,000061	12288	16384	24576	2097152	0,0079	0,0069
4	11	0,000061	12288	16384	24576	2097152	0,0079	0,0069
6	12	0,000030	24576	32768	49152	5931008	0,0056	0,0049
8	12	0,000030	24576	32768	49152	5931008	0,0056	0,0049
10	13	0,000015	49152	65536	98304	16777216	0,0039	0,0032

Из таблицы видно, что при увеличении скорости волочения балл зерна увеличивается, структура становится более равномерной и мелкозернистой. Следовательно, увеличение скорости деформации при волочении благоприятно сказывается на микроструктуре тонкой проволоки. Мелкозернистая структура более пластична и, следовательно, менее подвержена трещинам. Однако путь получения такой микроструктуры с помощью увеличения скорости деформации приводит к увеличению деформационного старения металла. Поэтому необходимо выбирать такой скоростной режим деформации, который обеспечит благоприятную структуру тонкой проволоки и высокий уровень технологичности производства. Также необходимо учитывать последующую обработку полученной проволоки, такую как свивка металлокорда и получение других изделий из тонкой проволоки.

Обнаружено явление перераспределения неметаллических включений в поперечном сечении проволоки при увеличении скорости волочения. С увеличением скорости волочения неметаллические включения распределяются ближе к центру сечения проволоки. Это происходит предположительно из-за увеличения интенсивности деформации. Осевые слои металла, которые при волочении вытягиваются наиболее сильно, из-за дробления зерна стягивают все включения в зону наиболее интенсивной деформации.

Л и т е р а т у р а

1. Фетисов, В. П. Деформационное старение стали при волочении проволоки / В. П. Фетисов. – Минск : Белорганкипроиздат, 1996. – 121 с.
2. Сталь и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна : ГОСТ 5639–82. – М. : М-во черной металлургии СССР : Изд-во стандартов, 2003.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СВИВКИ
МЕТАЛЛОКОРДА НА ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ**

Ю. В. Мартьянов, И. А. Цырганович

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

На сегодняшний день существует несколько видов испытаний механических свойств металлов для определения их свойств [1]–[3]. В текущей работе используются механические испытания на разрыв.

Для изучения изменения свойств свивки проведены механические испытания на разрыв для тонкой проволоки до свивки, тонкой проволоки после свивки (выплетена из металлокорда) и цельной конструкции металлокорда. В случае испытаний металлокорда такой разрыв называется агрегатным. Отличие от классической схемы испытаний на разрыв заключается в витой конструкции металлокорда, нагрузки при этом воспринимаются всеми проволоками металлокорда одновременно.

Цель работы – определить влияние режимов свивки металлокорда на изменение свойств тонкой проволоки.

Используемый метод исследования: лабораторные механические испытания тонкой проволоки.

Для испытания тонкой проволоки и металлокорда на разрыв были отобраны образцы с различными скоростями волочения, произведенные из стали 80. Выбранные образцы имеют одинаковый диаметр в 0,35 мм и класс прочности НТ. Металлокорд класса прочности ШНТ изготавливают из такой же стали. Отличие в прочности достигается за счет режима вытяжек на этапе тонкого волочения проволоки.

Из пяти мотков проволоки с различными скоростями волочения было получено по десять отрезков проволоки для каждого мотка проволоки длиной 300 мм. После полученные образцы проволоки были скручены на лабораторном стенде в металлокорд конструкции $2 \times 0,35\text{НТ}$, количество витков равно 21, шаг свивки равен 14 мм. Свивка происходила с дополнительным перекручиванием в пять оборотов. Итого финальная схема свивки равна 21 ± 5 оборотов. После свивки получилось по пять образцов металлокорда для каждой из скоростей волочения. Далее образцы металлокорда были оставлены на трехдневную релаксацию для снятия остаточных напряжений после свивки. Три первых по порядку образца металлокорда для каждой из скоростей были расплетены на отдельные проволоки для дальнейших прочностных испытаний.

На основе полученных данных были построены диаграммы зависимости средних значений предела прочности от скорости волочения проволоки, а также зависимости средних значений относительного удлинения от скорости волочения проволоки (рис. 1 и 2).

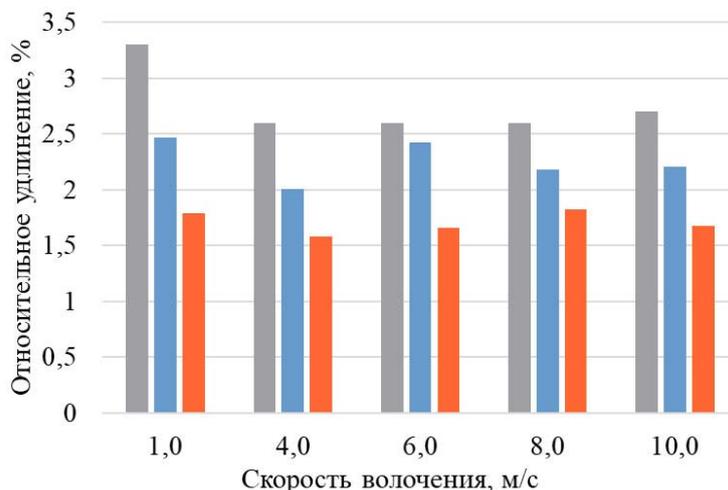


Рис. 1. Средние показатели предела прочности проволоки до свивки, проволоки после свивки и металлокорда от скорости волочения проволоки: ■ – проволока до свивки; ■ – проволока после свивки; ■ – металлокорд

Согласно рис. 1 наблюдается небольшое снижение предела прочности металлокорда, обусловленное наличием касательных напряжений и крутящих деформаций в проволоке. Формирование объемной спирали при свивке металлокорда влияет на механические свойства проволоки, снижает предел прочности в среднем на 10 %. Также на снижение предела прочности влияет возможное наличие микротрещин, которые раскрываются в большей степени при изменении вектора нагрузки с касательного на угловой, имеющего проекцию нормальной нагрузки на трещину. Большее раскрытие трещин интенсивнее уменьшает полезное сечение проволок. Это приводит к снижению предела прочности металлокорда по сравнению с проволокой.

Изменение предела прочности по скоростям волочения проволоки и металлокорда обусловлено квадратичной зависимостью предела прочности от скорости волочения. Это может быть вызвано изменением свойств смазки и условиями трения при увеличении скорости тонкого волочения, а также изменением сопротивления пластической деформации при увеличении скорости волочения. Из-за того, что зависимость квадратичная, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние вызывает изменение условий трения в волоке.

Согласно рис. 2 наблюдается общее снижение относительного удлинения после свивки металлокорда вне зависимости от скорости волочения. Среднее уменьшение относительного удлинения соответствует около 21 %. Уменьшение относительного удлинения металлокорда по сравнению с проволокой может означать значительное изменение деформированного состояния проволоки после свивки. Форма объемной спирали изменяет направление вектора нагрузки при растяжении на локальном участке шага металлокорда. Также при разрыве проволока приобретает форму прямого цилиндра. Это означает, что перед разрывом проволока подвергается дополнительной деформации при изменении формы объемной спирали, что может быть дополнительным фактором снижения прочности и относительного удлинения.

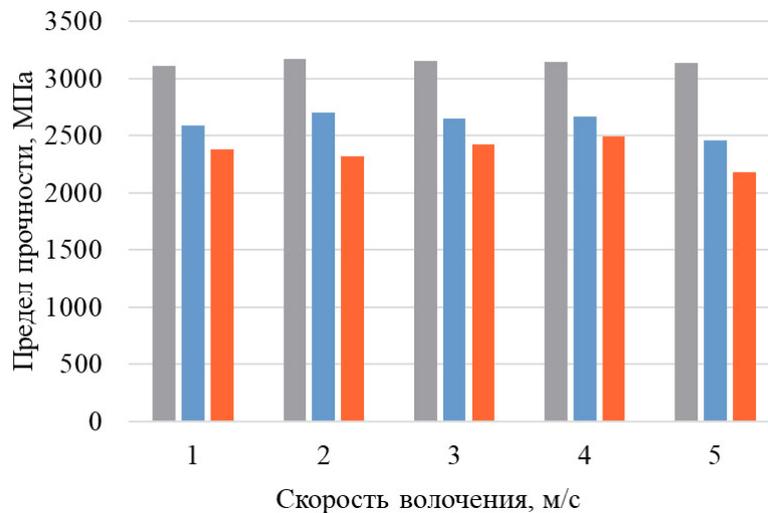


Рис. 2. Средние показатели предела прочности проволоки до свивки, проволоки после свивки и металлокорда от скорости волочения проволоки:
 ■ – проволока до свивки; ■ – проволока после свивки; ■ – металлокорд

Таким образом, отметим следующее:

– общее снижение механических свойств проволоки после свивки может быть вызвано избыточным знакопеременным кручением, которое обеспечивает торсионный блок канатной машины, который обеспечивает условие нераскручиваемости конструкции металлокорда;

– сложная знакопеременная крутящая и растягивающая нагрузка на тонкую проволоку при ее свивке приводит к дополнительной пластической деформации, что снижает комплекс механических свойств.

Л и т е р а т у р а

1. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу : ГОСТ 2999–75. – М. : Изд-во стандартов, 1987.
2. Федосов, С. А. Определение механических свойств материалов микроиндентированием. Современные зарубежные методики / С. А. Федосов, Л. Пешек. – М. : Физ. фак. МГУ, 2004.
3. Мильман, Ю. В. К вопросу определения пластичности материалов методом индентирования / Ю. В. Мильман, С. И. Чугунова, И. В. Гончарова.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОКАТКИ ПО «СЛИТТИНГ-ПРОЦЕССУ» В КОНТРОЛЬНОМ КАЛИБРЕ СТАНА 320 ОАО «БМЗ»

Д. С. Барановский

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Цель работы – исключить кантовку до и после контрольной клетки № 12 (13) для повышения качественных характеристик получаемого проката и снижения энергозатрат на его производство.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- 1) определение и анализ деформационно-кинематических и энергосиловых параметров прокатки в контрольной клети;
- 2) моделирование по МКЭ прокатки по «слиттинг-процессу» в контрольном калибре для арматурных профилей № 10–20 на стане 320 СПЦ-1 ОАО «БМЗ»;
- 3) определение и разработка конструктивных мероприятий установки вместо контрольной клети № 12 (13) трайб-аппарата WD2526.

Процесс прокатки стана 320 по «слиттинг-процессу» имеет следующие особенности. Главная линия стана (рис. 1) состоит из 20 клеток, имеющих горизонтальную компоновку, за исключением клеток № 17 и 19. Клетки № 1–8 черновой группы имеют универсальную калибровку «овал-круг» с получением из непрерывнолитой заготовки квадратного профиля 140 мм на выходе из клетки № 8 круглого профиля 46 мм. В промежуточной группе обжатие осуществляется в калибрах «гладкая бочка» с последующей кантовкой раската перед контрольным калибром в клети № 13. Для этого за 12 клетью установлена кантующая проводка для упругопластического поворота полосы на угол 90°. Для прокатки арматурного профиля № 20 вместо 9 и 10 клетки ставится транспортировочный стол [1].

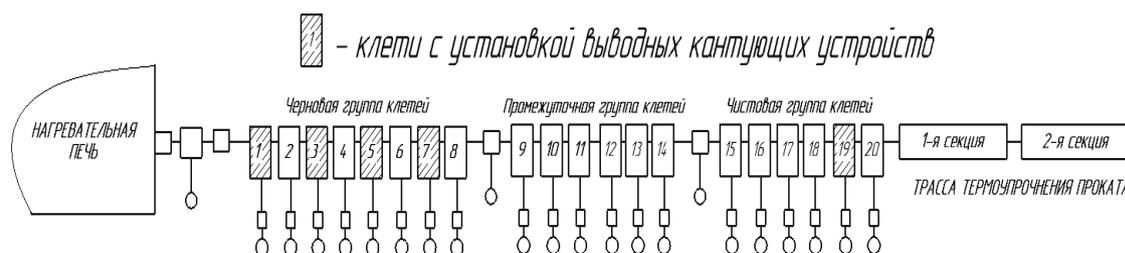


Рис. 1. Главная линия стана 320

Характерными проблемами кантовки полосы являются [1], [2]:

- кантовка полосы определяет общую геометрию для калибров валков и для роликов кантующей коробки;
- кантовка приводит к неравномерному износу калибра за счет кручения полосы и скольжения по дну калибра;
- быстрый неравномерный износ калибра приводит к изменению геометрической формы прокатываемой полосы;
- увеличение числа переточек и глубины съема металла при переточке, что приводит к снижению ресурса прокатных валков.

Также необходимо отметить, что при глубоком термоциклическом износе калибра съем металла при переточке достигает 20 мм. На выпусках переточка сильно ограничена шириной калибра [3]–[5]. Поэтому валки после 2-й или 3-й переточки приходится списывать.

Характерная особенность прокатки по «слиттинг-процессу» – прокатка на «гладких бочках» в 1–3 клетях перед контрольным калибром, необходимость в котором обусловлена выравниванием ширины полосы перед прокаткой в специальных калибрах, формирующих места перемычек для разделения. Основная проблема контрольного калибра – значительное уширение переднего и заднего концов полосы, а также кантовка раската до и после него.

Перечисленные ниже проблемы значительно осложняют работу стана. Исследование энергосиловых параметров прокатки в контрольном калибре и влияния кантовки на очаг деформации будет состоять из нескольких этапов.

На первом этапе была построена базовая численная модель в соответствии с действующим технологическим процессом без кантовки.

Исходные данные параметров технологического процесса представлены в табл. 1. Материал валков в клети № 12 и 13 – чугуны с шаровидным графитом СШХН50.

Таблица 1

Исходные данные численного эксперимента процесса прокатки в клетях № 12, 13

Технологические параметры	Клеть № 12	Клеть № 13
Диаметр валков D_v , мм	335	335
Катающий диаметр валков D_k , мм	272,5	233
Ширина вреза калибра $B_{вр}$, мм	141,3	117,4
Высота вреза калибра $h_{вр}$, мм	29	46,5
Межвалковый зазор S , мм	9	18
Высота калибра H , мм	67	111
Ширина полосы в калибре B , мм	138	115
Относительное обжатие полосы ε_n , %	25	25,1
Скорость прокатки v , м/с	4,515	4,603
Частота вращения валков n , об/мин	184,2	244,7

Моделирование проводилось в программном пакете SimufactForming 15 с наложением на заготовку сетки конечных элементов с размером ячейки 2 мм.

По результатам численного эксперимента были получены данные по энергосиловым параметрам прокатки в контрольном калибре для максимального сечения плоской полосы, соответствующей калибровке № 20 × 2 (табл. 2). Геометрия раската в клетях № 12 и 13, а также калибра валков для клети № 13 представлены на рис. 2.

Таблица 2

Энергосиловые и скоростные параметры процесса прокатки в клети № 13

Параметр	N , кВт	M , кН · м	P , кВт	n , об/мин	v , м/с
Телеметрия стана	1,08–1,75 (по факту)	38–45 (по факту)	9,2–10,5 (расчет)	244 (по факту)	4,603 (по факту)
Результаты моделирования	0,9–1,5	39–42	9,5–9,7	244	4,603

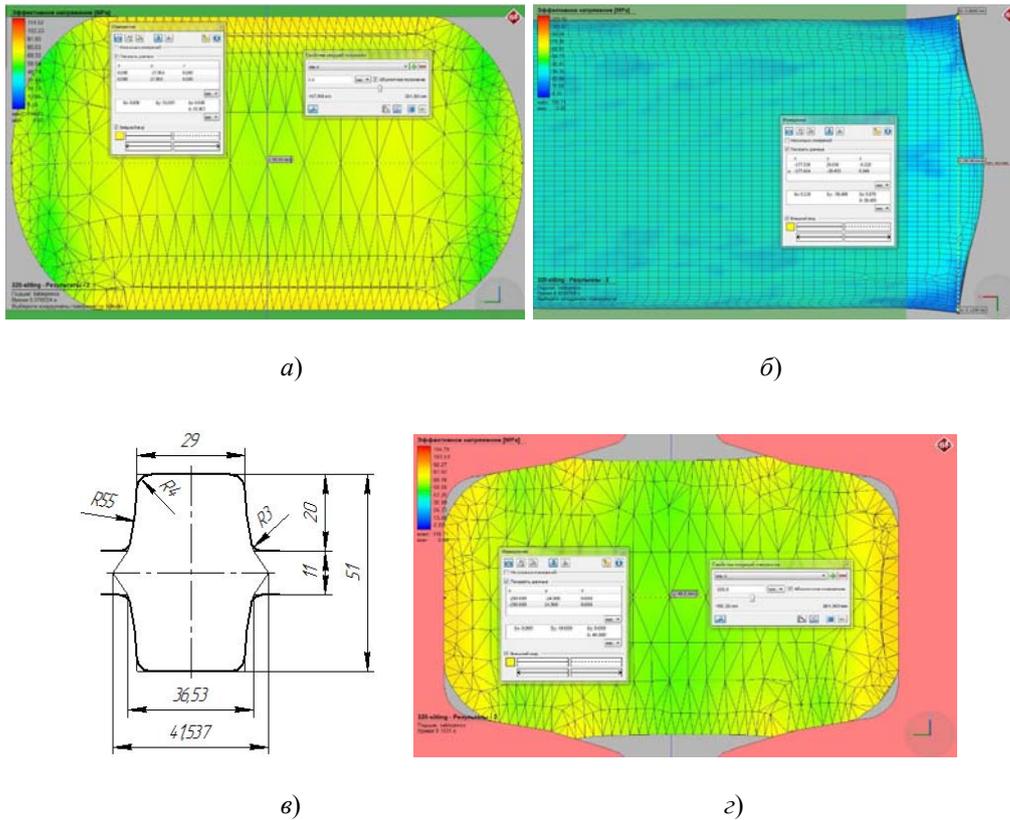


Рис. 2. Форма и геометрия очага деформации в клетях № 12 и 13:
 а – сечение на выходе из клетки № 12; б – передний конец на выходе из клетки № 12;
 в – геометрия калибра в клетке № 13; г – сечение на выходе из клетки № 13

Анализ результатов числительных экспериментов позволяет сделать вывод о возможности замены 13 клетки стана 320 трайб-аппаратом WD2526 вследствие соответствия мощности его привода энергосиловым процессам прокатки в самом нагруженном контрольном калибре (рис. 3). Также была установлена возможность нарезки всех контрольных калибров на валковых шайбах WD2526.

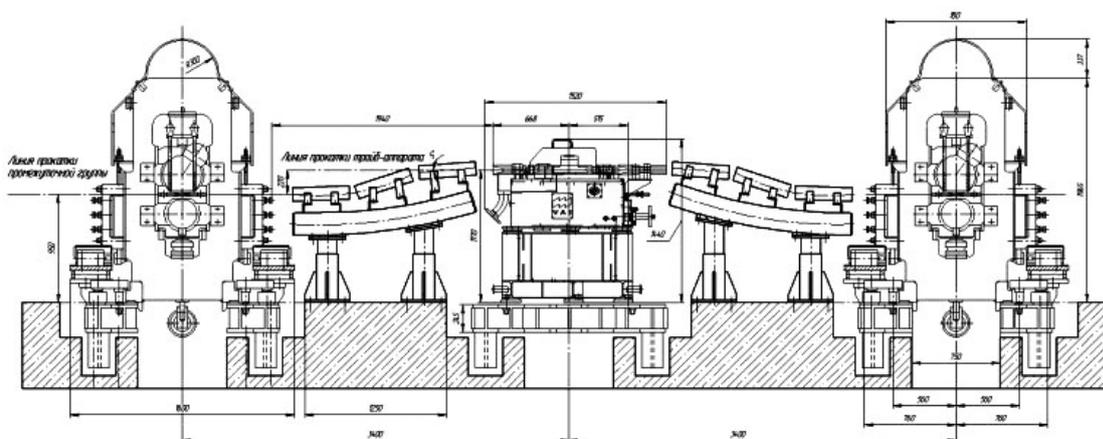


Рис. 3. Конструктивные изменения по установке трайб-аппарата WD2526 в главной линии стана 320 вместо клетки № 13

В заключение следует отметить:

1. Установлены энергосиловые параметры процесса прокатки в калибрующей клетки № 13.
2. Разработан проект установки трайб-аппарата WD2526 вместо калибрующей клетки № 13, что позволит исключить кантовку до и после контрольного калибра.
3. По результатам численных экспериментов установлено, что отсутствие кантовок до и после контрольного калибра положительно сказывается на стабильности процесса прокатки по слиттинг-схемам и стойкости калибров валков.
4. При сравнительном анализе установлено снижение энергозатрат на производство проката за счет уменьшения мощности привода на контрольном калибре.

Л и т е р а т у р а

1. Васильков, Д. М. Совершенствование конструкции роликовой неприводной кантовочной прокатки / Д. М. Васильков, 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. 255–258.
2. Васильков, Д. М. Анализ влияния процесса поворота полосы в неприводном кантовочном устройстве на энергосиловые параметры привода клетки / Д. М. Васильков, 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. 75–79.
3. Стрельченко, А. В. Исследование влияния геометрии ящичных калибров валков на образование термоциклических трещин в условиях мелкосортно-проволочного стана горячей прокатки 370/150 ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «БМК» / А. В. Стрельченко, И. А. Зуев, И. В. Астапенко // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2019. – Т. 75, № 1. – С. 80–86.
4. Астапенко, И. В. Особенности горячей прокатки высоких полос в ящичном калибре / И. В. Астапенко, Д. М. Васильков // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 114–117.
5. Васильков, Д. М. Исследование параметров очага деформации полосы при прокатке в валках с ящичными калибрами черновой группы клетей стана 370/150 ОАО «БМЗ» / Д. М. Васильков, И. В. Астапенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 26–27 апр. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 178–182.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ УГЛОВОЙ СТАЛИ В ЧИСТОВЫХ КАЛИБРАХ СТАНА 320 ОАО «БМЗ»

Д. С. Барановский

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Цель работы – определить и оптимизировать кинематические параметры прокатки угловой стали в чистовых калибрах стана 320 моделированием по методу конечных элементов (МКЭ).

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- 1) расчет деформационно-кинематических и энергосиловых параметров прокатки углового равнополочного профиля $45 \times 45 \times 5$ по аналитическим методикам;
- 2) моделирование по МКЭ прокатки в чистовых калибрах клетей № 18 и 20 углового равнополочного профиля $45 \times 45 \times 5$ на стане 320 СПЦ-1 ОАО «БМЗ»;
- 3) сравнение результатов и оптимизация кинематических параметров прокатки и расчетной методики.

Проектирование новых и модернизация существующих технологических процессов прокатки и прокатного оборудования в современных условиях предполагает высокую степень научной и экономической обоснованности принимаемых решений. Для достижения указанных требований необходимо соответствующее программное обеспечение и математический аппарат, позволяющий учесть достаточное количество факторов, влияющих на показатели процесса прокатки, и определить последние с достаточной степенью точности в необходимом объеме [1].

Прокатка угловых профилей, в отличие от симметричных, является значительно более сложным процессом с точки зрения расчета основных параметров процесса. Это связано с отсутствием симметрии при прокатке в очаге деформации по всей его длине и ширине. Вертикальная симметрия также является достаточно условной [2].

На первом этапе исследования были выполнены расчеты калибровки валков для стана 320 и деформационно-кинематических параметров прокатки углового равнополочного профиля $45 \times 45 \times 5$ по ГОСТ 8509–93 для стана 320 по принятым методикам [3], [4].

На втором этапе была построена базовая численная модель в соответствии с действующим технологическим процессом. Исходные данные параметров представлены в табл. 1.

По результатам численного эксперимента были внесены изменения в расчетные методики кинематических и энергосиловых параметров и выполнен контрольный численный эксперимент.

Таблица 1

Исходные данные для численного эксперимента

Технологические параметры	Подкат изклетей № 16	Клеть № 18	Клеть № 20
Высота полосы h , мм	7,5	6,2	5
Ширина полосы b , мм	73,8	74,2	76,4
Обжатие полосы Δh , мм	–	1,3	1,2
Вытяжка, л	–	1,199	1,249
Площадь F , мм ²	632	527	422
Температура полосы на входе в клеть T_0 , °С	992,86	995,05	995,66

Геометрия калибров для клетей № 18 и 20 представлена на рис. 1. Моделирование проводилось в программном пакете SimufactForming 15 с наложением на заготовку сетки конечных элементов 2 мм.

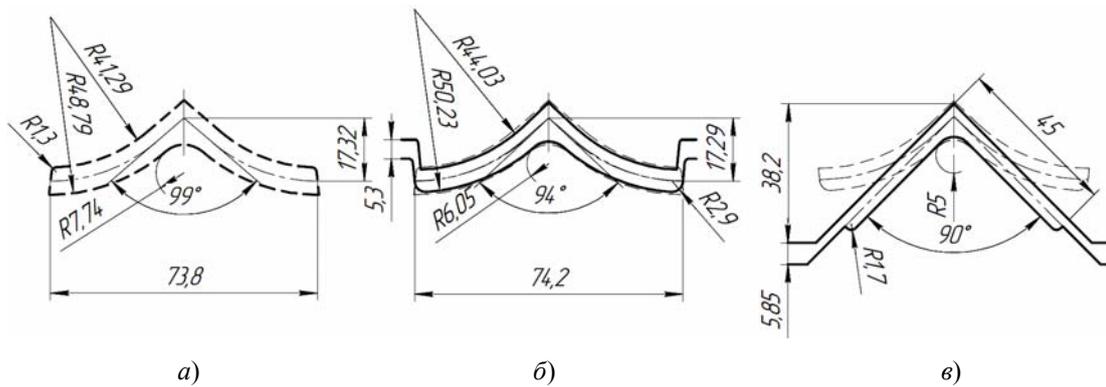


Рис. 1. Геометрия сечения подката из клетки № 16 (а) и калибров валков в клетях № 18 (б) и № 20 (в)

Экспериментальные данные получаем путем установки двух контрольных точек в поверхностном слое модели прокатываемой полосы (первая на расстоянии 100 мм, а вторая в 300 мм от оси валков). Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты контрольного численного эксперимента

Технологические параметры	Клеть № 18	Клеть № 20
Скорость прокатки на входе в калибр v , м/с	9,33	11,28
Скорость прокатки на выходе v , м/с	11,30	14,06
Обороты валков n , об/мин	653,07	825,25
Вытяжка, л	1,1997	1,2481
Площадь F , мм ²	526,522248	421,916547
Усилие прокатки P_i , кН	210	286
Момент прокатки M_i , кН · м	2,70	6,80

Результаты заполнения калибров при данных технологических параметрах представлены на рис. 2.

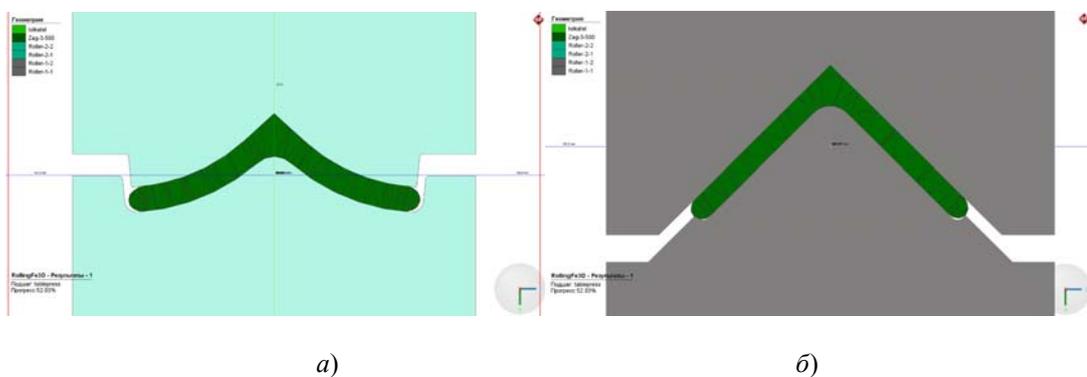


Рис. 2. Результаты заполнения калибров при данных технологических параметрах:
а – калибр 18 клетки; б – калибр 20 клетки

По результатам контрольного численного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- калибры в клетях № 18 и 20 заполнены полностью без недокатов и перекатов;
- расчетная скорость прокатки близка по значениям к экспериментальной. Подкат поступает в клетку № 18 со скоростью 9,7 м/с, прокатывается в ней со скоростью 9,33 м/с и выходит со скоростью 11,3 м/с. Далее раскат поступает в клетку № 20 со скоростью 11,28 м/с и выходит из нее со скоростью 14,06 м/с. Также наблюдается согласование скоростей выходящего из клетки раската и поступающего в следующую клетку (9,07 м/с и 9,33 м/с, 11,3 м/с и 11,28 м/с);
- момент прокатки расчетный и экспериментальный для клетки № 18 сходен (3,98 кН·м и 3,7 кН·м соответственно), а для клетки № 20 есть расхождение (4,37 кН·м и 6,8 кН·м соответственно);
- усилие прокатки расчет/эксперимент для клетки № 18: 276,92 кН/210 кН соответственно; для клетки № 20: 316,36 кН/286 кН;
- на экспериментальных графиках видно отсутствие резких перепадов значений.

Таким образом, рассчитанные по оптимизированным аналитическим методикам калибровка, деформационно-кинематические и энергосиловые параметры процесса имеют практически полное соответствие параметрам численного моделирования по МКЭ. Это подтверждает правильность и эффективность выбранных расчетных методик и возможность реализации принятых решений при освоении производства угловых профилей в условиях прокатного стана 320 ОАО «БМЗ – УКХ «БМК».

Литература

1. Смолякова, В. В. Численное математическое моделирование точности геометрических характеристик сортовых профилей при горячей прокатке в чистовых рабочих клетях / В. В. Смолякова // Науч. вестн. Донбас. гос. машиностр. акад. – 2011. – № 1. – С. 20–26.
2. Сатонин, А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей сортовой прокатке угловых профилей // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия / А. В. Сатонин, В. В. Смолякова, П. М. Стежкин. – 2010. – № 11. – С. 16–21.
3. Штернов, М. М. Калибровка угловой стали / М. М. Штернов. – М. : Металлургиздат, 1961. – 57 с.
4. Чекмарев, А. П. Калибровка прокатных валков / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. – М. : Металлургия, 1971. – 509 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВОЛОКИ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ СТАЛИ

В. А. Петрусевиц

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Цель работы – провести энергосиловой анализ процесса волочения в условиях волочильного стана UDZSA 2500/6 ОАО «Речицкий метизный завод» для определения и оптимизации силовой нагрузки на инструмент путем применения вращающихся волок.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- 1) определение характерных особенностей пластического течения металла в действующем калибре стана UDZSA 2500 методом конечных элементов;
- 2) определение энергосиловых параметров волочения в первом проходе при помощи аналитического расчета и численного моделирования;

3) моделирование процесса волочения в первом проходе стана UDZSA 2500/6 для определения влияния скоростного режима вращения волоки на энергосиловые параметры волочения его оптимизация.

На ОАО «РМЗ» для получения волок используются твердосплавные заготовки производства Кировоградского завода твердых сплавов, которые затем обрабатываются в заводской мастерской в соответствии с действующей технологической инструкцией. На заводе принята практика использования волок с одной геометрией основных зон рабочего канала для всего маршрута волочения проволоки. Требуемые углы рабочих зон волок обеспечиваются шлифованием отверстий специальными иглами с абразивным порошком.

Анализ работы волочильного инструмента показал, что основными причинами такого большого разброса стойкости инструмента являются [1], [2]:

1) недостаточное качество шлифовки рабочих поверхностей новых волок, в результате чего качество поверхности отработавшей волоки оказывается выше, чем у новой. Это приводит к повышению трения в очаге деформации, усилия волочения, увеличению температуры проволоки и твердосплавной волоки и соответственно к повышенному расходу инструмента и снижению качества проволоки;

2) недостаточное охлаждение волок, что приводит к эксплуатации твердосплавного инструмента на повышенных температурах и соответственно к повышенному износу рабочих поверхностей;

3) качество и точность геометрии (наплывы, заусеницы, овальность и т. п.) исходной катанки, что приводит к увеличению усилия волочения, повышению неравномерности износа инструмента и овальности готовой проволоки;

4) зависание смазки в мыльнице, что приводит к неравномерности смазки и соответственно повышению трения в очаге деформации и повышенному износу твердосплавного инструмента.

Применение в конструкции стана UDZSA 2500/6 устройства вращающейся волоки предположительно даст возможность снизить ресурсо- и энергопотребление проволочного стана. Анализ причин многократного увеличения стойкости твердосплавного инструмента и снижения энергопотребления двигателя тянущего барабана позволяет сделать следующие выводы относительно причин, их вызвавших:

– применение активного охлаждения рабочей волоки позволило интенсифицировать теплообмен в узле деформации, что привело к снижению рабочей температуры волоки и соответственно многократному увеличению ее стойкости;

– применение вращения рабочей волоки позволило полностью ликвидировать такой дефект готовой проволоки, как овальность;

– применение активного перемешивания смазки в мыльнице волоки позволило улучшить смазку проволоки, что, в свою очередь, совместно с применением вращения деформирующего инструмента позволило снизить трение в узле деформации и соответственно уменьшить усилие волочения. Это привело к снижению энергопотребления двигателем тянущего барабана и увеличению стойкости волоки.

Исследование влияния вращения волоки на очаг деформации будет состоять из следующих этапов:

1. Разработка базовой численной модели процесса волочения исходной заготовки на первом проходе без вращения волоки.

2. Проведение численных экспериментов процесса волочения с разной частотой вращения волоки в первом проходе.

3. Анализ полученных результатов моделирования, сопоставление данных с реальным процессом и предложения по усовершенствованию процесса.

На первом этапе была построена базовая численная модель в соответствии с действующим технологическим процессом без вращения по исходным данным параметров действующего технологического процесса, представленным в табл. 1. Геометрия волокни первого перехода представлена на рис. 1.

Таблица 1

Исходные данные численного эксперимента процесса волочения на первом проходе стана UDZSA 2500/6

Номер	Частота вращения n , об/мин	Параметр							
		$d_{\text{нач}}$, мм	$d_{\text{кон}}$, мм	$N_{\text{ЭД}}$, кВт	$D_{\text{бара}}$, мм	V , м/м	μ_1	ЧО, %	Марка стали
1	Базовый (без вращения)	6,5	5,7	55	550	3,5	1,3	23,1	Ст 1 сп
2	20, 100, 500								

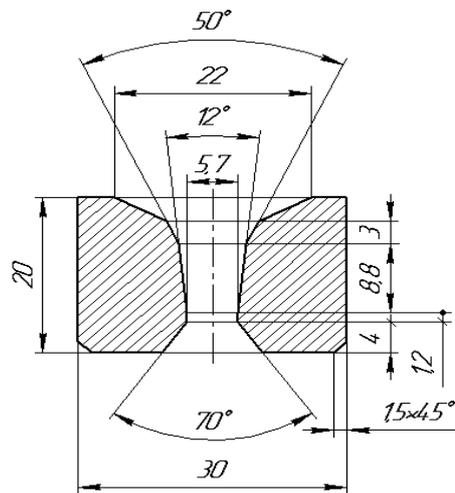


Рис. 1. Геометрия волокни ГОСТ 9453–75, форма 12, калибр 1980-0155

Шестикратный волочильный стан блочного типа модели UDZSA 2500/6 с максимальным усилием волочения на первом черновом блоке, равным 25 кН (2500 кг), предназначен для волочения стальной углеродистой проволоки при диаметре заготовки до 12 мм.

Моделирование проводилось для первого прохода в программном пакете SimufactForming 15 с наложением на заготовку сетки конечных элементов с размером ячейки 2 мм.

После построения и выполнения расчетов численной модели волочения получены результаты, представленные на рис. 2, 3 и в табл. 2.

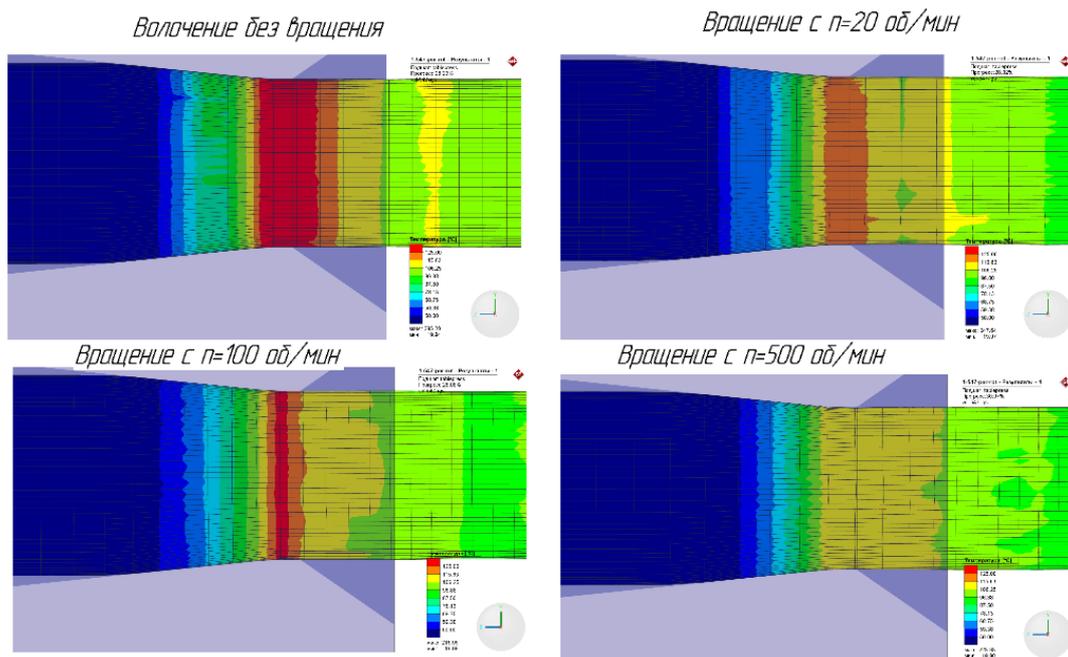


Рис. 2. Результаты влияния частоты вращения волокна на температуру контактной поверхности в первом проходе стана UDZSA 2500/6

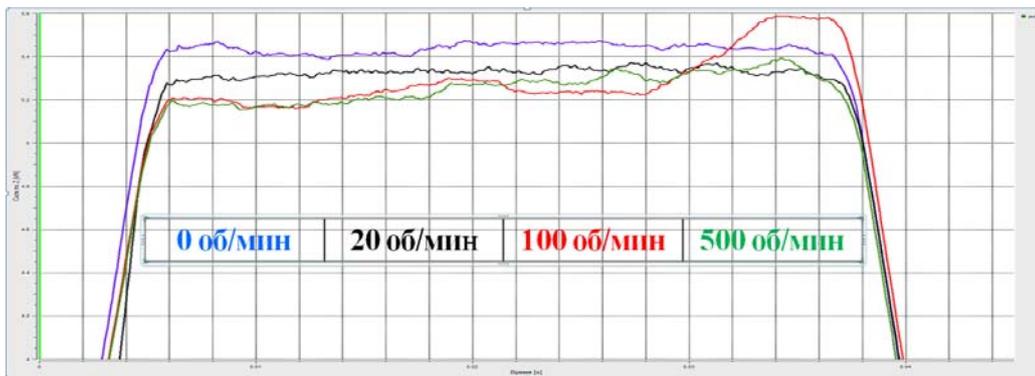


Рис. 3. Результаты влияния частоты вращения волокна на усилие в первом проходе стана UDZSA 2500/6

Таблица 2

Результаты численного эксперимента процесса волочения на первом проходе стана UDZSA 2500/6

Эксперимент, об/мин	0	20	100	500
Усилие волочения Р, кН	5,47	5,33	5,23	5,17
Температура на контактной поверхности, °С	295,20	347,64	216,95	223,33

Проведенный выше анализ позволяет констатировать:

1. Применение вращения волокна позволяет обеспечить равномерный износ рабочей поверхности инструмента и увеличить ресурс эксплуатации.

2. Для больших диаметров волочения вращение волок позволяет существенно снизить температуру контактной поверхности, при этом снижение усилия волочения незначительно.

3. Наибольший интерес применение вращения волок с частотами 100–500 об/мин может представлять для снижения температуры поверхности проволоки при волочении из высокоуглеродистых кордовых сталей для предотвращения самоотпуска.

4. Наибольший интерес применение вращения волок с частотами 100–500 об/мин может представлять для снижения температуры поверхности проволоки при волочении из высокоуглеродистых кордовых сталей для предотвращения самоотпуска.

5. Применение вращающихся волок для снижения усилия волочения малоперспективно из-за необходимости вращаться на высоких (более 3000 об/мин) оборотах.

Литература

1. Астапенко, И. В. Оборудование волочильных и канатных цехов : пособие по курсу «Оборудование метизных цехов» для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» направления специальности 1-42 01 01-02 «Металлургическое производство и материалобработка (материалобработка)» специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка материалов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 55 с.
2. Применение вращающейся волоки в метизном производстве РУП «Речицкий метизный завод» / В. И. Тимошпольский [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2-2 (38).

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ГОМОГЕНИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПОДШИПНИКОВЫХ МАРОК СТАЛЕЙ НА УРОВЕНЬ КАРБИДНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ

С. А. Савченко

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

Цель работы – определить оптимальные технологические режимы гомогенизирующего отжига непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) на качество структуры готового проката из ШХ-сталей.

Предметом исследования в работе является технологический процесс высокотемпературного отжига с последующим прокатом подшипниковых сталей в условиях стана 370/150 СПЦ-2 ОАО «БМЗ» для устранения карбидной ликвации.

Как известно, методы устранения карбидной ликвации лежат в основе технологии выплавки и разливки, в прокатном же производстве и 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]–[4]. 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 [5]–[8].

Для отработки технологии гомогенизирующего отжига было выбрано два основных маршрута: маршрут 1 – отжиг на стане 850; маршрут 2 – отжиг на стане 370/150 (табл. 1) [9]–[11].

Таблица 1

Температурный режим в нагревательных печах станов 850 и 370/150

Размер НЛЗ, мм	Температура в печи стана 850 по зонам, °С						
	1, 2	3	4	5	6		
250×300×2900±5500	1100–1190	1100–1190	1100–1190	1100–1190	1100–1190		
<i>Примечания: 1. Продолжительность нагрева НЛЗ в печи не менее 10 ч. – 2. Соотношение расхода газа и воздуха устанавливается в диапазоне от (1 : 9,5) до (1 : 10,5).</i>							
Температура в печи стана 370/150 по зонам (НЛЗ 250 × 300 × 2900±5900 мм), °С							
Верхняя зона предварительного нагрева 1	Нижняя зона предварительного нагрева 2	Верхняя зона основного нагрева 3	Нижняя зона основного нагрева 4	Верхняя левая зона томления	Верхняя центральная зона томления 6	Верхняя правая зона томления 7	Нижняя торцевая зона томления 8
<i>Примечания: 1. Минимальное время нагрева 500 мин в зонах 3–8. – 2. Рекомендованное время нахождения блюмов по зонам: в зонах 3, 4 – 140 мин; в зонах 5–8 – 360 мин (контроль по системе слежения).</i>							

Основным отличием маршрута 1 от маршрута 2 является возможность планирования отжига на стане 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. Также была отработана технология гомогенизирующего нагрева в печи стана 370/150 (рис. 1) [5].

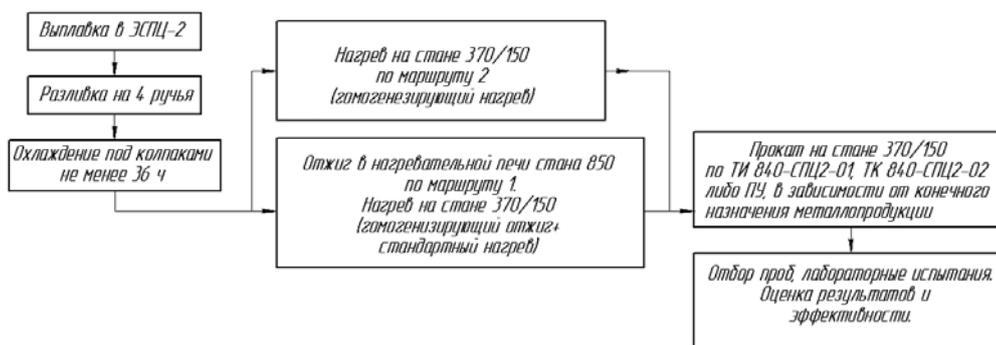


Рис. 1. Схема технологических операций производства прутка с гомогенизирующим отжигом

Главным критерием оценки эффективности принята степень влияния процесса гомогенизации на уровень карбидной неоднородности в готовом сорте CZ6 (не более 6,3) и CZ7 (не более 7,4). Результаты металлографических испытаний горячекатаного прутка, произведенного из непрерывнолитых заготовок, прошедших гомогенизацию на 850 стане и на стане 370/150, сведены в табл. 2.

Результаты металлографических испытаний

Гомогенизирующий отжиг блюмов на стане 850			Гомогенизирующий нагрев блюмов на стане 370/150		
Профиль, мм	Карбидная ликвация сомкнутая, CZ6	Карбидная ликвация раздробленная, CZ7	Профиль, мм	Карбидная ликвация сомкнутая, CZ6	Карбидная ликвация раздробленная, CZ7
38–80	6,1–6,3	7,2–7,4	36–60	6,1–6,3	7,1–7,3

По данным табл. 2 видно, что оба варианта – термообработка малотоннажных партий 850 стана и крупнотоннажных партий стана 370/150 – позволяют достигнуть требуемые значения карбидной неоднородности на готовом прутке CZ6 не более 6,3 и CZ7 не более 7,4.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

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

2. По результатам оценки эффективности внедрения гомогенизирующего отжига за период с 2017 по 2020 г. выход годной продукции в подшипниковых марках сталях, прошедших гомогенизацию, увеличился по карбидной неоднородности на 10 % с 87 % в 2017–2019 гг. до 97 % в 2019–2020 гг.

Литература

1. Бокштейн, Б. С. Атомы блуждают по кристаллу / Б. С. Бокштейн. – М. : Наука, 1984. – 208 с.
2. Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик, С. В. Добаткин, Л. М. Капуткина. – 3-е изд. – М. : Металлургия, 2005. – 432 с.
3. Чередниченко, В. С. Материаловедение / В. С. Чередниченко. – М. : Омега-Л, 2008. – 752 с.
4. Влияние факторов нагрева на формирование карбидной сетки в стали ШХ15СГ / А. Б. Стеблов [и др.] // Литье и металлургия. – 2015. – № 2 (34). – С. 77–80.
5. Оптимизация нагрева заготовок из стали ШХ15СГ перед прокаткой / А. Б. Стеблов [и др.] // Сталь. – 2005. – № 5. – С. 58–61.
6. Снижение карбидной сетки в стали ШХ15СГ / П. И. Ящерицын [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – Минск, 2004. – Т. 48. – № 3. – С. 117–121.
7. Investigation of recovery and recrystallization during hot rolling of stainless steels with high laboratory mill / Kenzo Kato, Yoshihiro Saito, Tetsuo Sakai // Transactions ISIJ. – 1984. – Vol. 24. – P. 1050–1054.
8. Hot deformation of Austenitic stainless steel Type 316 up to strain rates of 100 s⁻¹ / J. A. DeALMEIDA and R. Barbosa // ISIJ International. – 2005. – Vol. 45, № 2. – P. 296–298.
9. 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.
10. Савченко, С. А. Совершенствование технологического процесса горячей прокатки шарикоподшипниковых сталей в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ» УКХ «БМК» / С. А. Савченко // Тезисы докладов 19-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых работников «Металл 2019», Жлобин, 3–6 июля 2019 г. – Жлобин : ОАО «БМЗ» УКХ «БМК», 2019. – С. 37–38.

11. Астапенко, И. В. Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката / И. В. Астапенко, С. А. Савченко // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 100–102.

РАЗРАБОТКА АТЛАСА ИНДЕНТИФИКАЦИИ ТОКСИЧНЫХ И ПОЖАРООПАСНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Н. Г. Малашков

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

Полимерными материалами сейчас называют все то, что является по сути высокомолекулярным веществом, но с добавками в виде стабилизаторов, смазок и пластификаторов. Иными словами пластмассы и пластик, адаптированные под современный быт и промышленность, производство полимерных изделий, как правило, базируется на таких компонентах, как полипропилены, полиамиды, поликарбонаты и полиэтилен. Все это обрабатывается специальными механизмами и машинами, а впоследствии, с помощью определенных добавок, полимерным материалам придается форма, вид и структура. Результатами такого производства активно пользуются и промышленные предприятия, и люди как в быту, так и на работе.

В пищевой промышленности использует полимеры, наверное, наиболее активно. Взять к примеру, транспортные ленты. Они позволяют сохранить цвет и вкус продуктов питания, кроме того, их плотность высока, а каррозия им не страшна. Полимерные антиадгезионные покрытия позволяют избежать налипания продуктов на металлические конструкции.

В быту мы часто сталкиваемся с такими стройматериалами, как пластик, органическое стекло, виниловые обои и трубы из полиэтилена. Все это используется как при масштабных стройках, так и при обычном ремонте в домашних условиях. Невроятное количество кухонных принадлежностей сделано из полимерных материалов.

В медицине на базе полимеров производится техника, которая позволяет изготавливать стерильную мебель или посуду, что в условиях больницы крайне важно. Кроме того, именно такие вещи принято называть устойчивыми к зараженной среде – полимер очень устойчив к атакам вирусов, тем более, что каждый из них предварительно проходит специальные тестирования.

Полимеры можно обнаружить в составе буквально каждого чистящего средства. Химические свойства находятся на очень высоком уровне и, в зависимости от выбранной пропорции, полимерный материал может превратиться как в лакокрасочное изделие, так и в стиральный порошок или моющее средство.

Распознавание пластмасс следует начать с внешнего осмотра (цвет, твердость, эластичность и т. д.). Обратите внимание на то, что образцы из полиэтилена жирны на ощупь, полупрозрачны, эластичны, механически прочны, могут иметь различную окраску. Образцы из поливинилхлорида эластичны, механически прочны, могут иметь различную окраску. Полистирольные образцы прозрачны, хрупки, различной окраски. Образцы из органического стекла прозрачны, жестки, различной окраски,

механически прочны. Фенолформальдегидные пластмассы темных тонов (от коричневого цвета до черного) жестки, прочны. Изделия из целлулоида эластичны, различной окраски, имеют характерный рисунок (под мрамор, малахит).

Среди особо вредных веществ можно назвать карбамидные, эпоксидные и фенолформальдегидные смолы, которые выделяют значительное количество вредных и опасных веществ в воздух. Одним из вредных веществ считается повсеместно используемые ПВХ-пластики, которые не только обладают общей токсичностью, но и создают высокие напряженности статических электрических полей. Однако при этом известно, что ПВХ, используемый для плиток, например, значительно вреднее, чем используемый для производства оконных профилей. И при этом германские ПВХ-пластики оказываются одними из самых безопасных в мире, правда и одними из самых дорогих. Следующими вредными веществами можно назвать стиролсодержащие резиновые линолеумы и нитролинолеумы, которые не рекомендуются для использования в жилых помещениях. Содержащие свинец, медь и кадмий лакокрасочные материалы тоже никак не относятся к безопасным, к тому же они часто выделяют толуол, ксилол и т. п.

Атлас идентификации токсичности и распознавания полимерных материалов в быту

Название	Токсичные выделения при горении	Распознавание	Применение в быту
Полиэтилен	Углекислый газ	Горит спокойным синеватым пламенем, запах горячей парафиновой свечи	Бутылки, мусорные мешки, трубы, контейнеры
Полиэтилентерефталат	Углекислый газ, сурьма, канцерогены	Специфический запах с копотью	Косметика, бутылки, волокна для ткани
Поливинилхлорид	Углекислый газ, канцерогены, свинец	Горит с зеленоватая окраска у основания пламени, резкий запах хлористого водорода	Пластиковые окна, занавески, скатерти, двери
Мочевинформальдегидная смола	Углекислый газ, Пласкон	Загорается с трудом, запах нашатыря (аммиак), запах новой мебели (формальдегид)	Фаеры, специальные бумаги и картон
Фенолформальдегидная смола (фенопласт)	Углекислый газ, фенол, формальдегид	Загорается с трудом, запах гуаши (фенол), запах новой мебели (формальдегид)	Клеи, лаки, розетки, электросчетчики, электроутюги, корпус телефонов, ручки для ножей
Полистирол	Углекислый газ, Стирол	Запах сладковатый, цветочный (гиацинтов)	Одноразовая посуда, упаковки, детские игрушки
Полиуретан	Фенолформальдегид, углекислый и угарный газ	Пламя желтоватое, запах острый, миндальный	Подошвы обуви, клеи, матрасы

Окончание

Название	Токсичные выделения при горении	Распознавание	Применение в быту
Поликарбонат	Углекислый газ	Запах цветочный, горит с трудом	Линзы, очки, банки большого объема
Полиметилметакрилат (органическое стекло)	Углекислый газ	Запах сладковато-плодовый	Контейнеры, линзы, светильники
Капрон	Углекислый газ, сургуч	Запах сургуча, желтое пламя с белым дымом	Одежды, ткани, гитарные струны, подошвы обуви
Вискоза	Сероуглерод, окись углерода	Запах жженной бумаги, желтое пламя	Искусственный шелк, целлофаны, пленки
Нейлон	Окись углерода	Горит вспышками с черной копотью	Струны, ткани, одежда, ковры
Полиэфирное волокно	Углекислый газ	Медленно горят	Спецодежда, детские игрушки, одежда, утеплитель
Лавсан	Углекислый газ	Сначала плавится, потом горит желтоватым пламенем с черной копотью, после образуется черный шарик	Ткани, нитки, искусственный мех, одежду

Литература

1. Исследование применение полимеров в быту. – 2014. – Режим доступа <https://nsportal.ru/ap/library/drugoe/2014/09/14/issledovanie-primeneniya-polimerov-v-bytu>.
2. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести быту. – 2009. – Режим доступа: <https://plastinfo.ru/information/articles/259/>.
3. Определение свойств полимеров. – 2015. – Режим доступа <https://e-plastic.ru/specialistam/polimernie-materiali/opredelenie-svoistv-polimerov/>.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ НИСХОДЯЩЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОНОВОЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

А. В. Сарнавский

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

Научный руководитель С. Н. Целуева

Современный этап развития технологий компьютерного проектирования сложных технических систем с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР), интегрированных с системами управления проектными данными, требует от проектировщиков применения таких методик и подходов к проектированию сложных систем, которые позволяют вести коллективное проектирование и работать в команде. Одним из наиболее распространенных подходов, применяемых при коллективном проектировании в САПР, является блочно-иерархический подход,

имеющий две методики конструкторского проектирования: «снизу вверх» (восходящее проектирование) и «сверху вниз» (нисходящее проектирование). Методика нисходящего проектирования позволяет применять при проектировании новый инструмент, который упорядочивает процесс проектирования, создает возможность коллективной работы над проектом и повышает качество проектирования – технологию компоновочной геометрии.

Данная работа демонстрирует на примере разработки станочного приспособления для фрезерования вариант реализации методики нисходящего проектирования сложных систем с использованием технологии компоновочной геометрии.

В качестве программной среды для выполнения работы выбрана система КОМПАС-3D, которая является универсальной и содержит мощный функционал для выполнения работ конструкторского характера, основанных на создании трехмерных моделей проектируемых объектов, а также различные приложения для выполнения математического моделирования и анализа, визуализации объектов и создания анимаций, демонстрирующих работу объектов в интерфейсе программного продукта.

Следуя методике нисходящего проектирования, на первом этапе работы над проектом разработана компоновочная геометрия для станочного приспособления (рис. 1, а), представляющая собой файл сборки, который создается с помощью простых геометрических объектов: точек, отрезков, окружностей, плоскостей и т. п., которые не нагружают файл информационно. Компоновочная геометрия разрабатывается с целью показать основные элементы (точки, линии, плоскости) расположения и привязки деталей в сборке, а также основные формообразующие элементы для создания 3D-моделей деталей.

3D-компоновка приспособления, выполненная в системе КОМПАС-3D, состоит из одной сборочной единицы, двадцати двух деталей и двадцати одного стандартного изделия. После создания компоновочной геометрии были созданы 3D-модели деталей приспособления, модели стандартных изделий добавлены из библиотеки КОМПАС-3D. Затем на основе компоновочной геометрии проектировалась сборочная 3D-модель приспособления. Результат проектирования представлен на рис. 1, б.

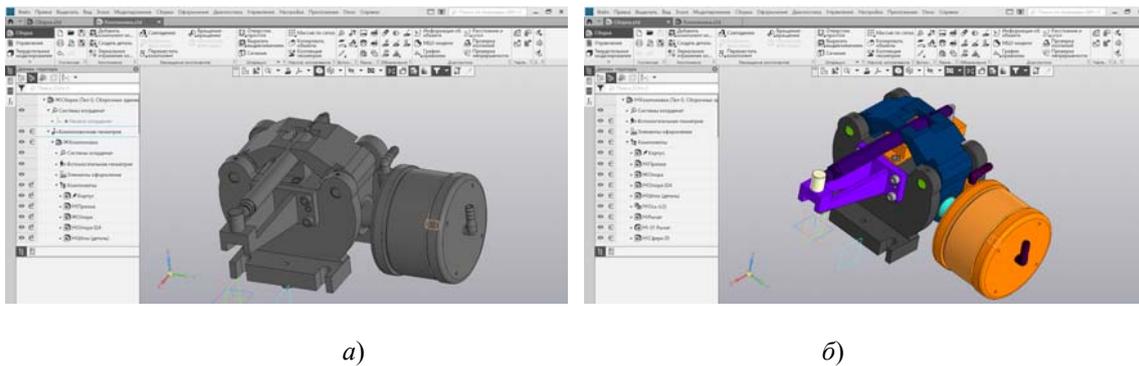


Рис. 1. Компоновочная геометрия (а) и сборочная 3D-модель станочного приспособления, выполненная на основе компоновочной геометрии (б)

Проверка спроектированного приспособления на прочность выполнялась в приложении КОМПАС-3D для САЕ-анализа – АРМ FEM. Для этого назначены закрепления, приложены нагрузки, действующие на приспособление, и сформирована конечно-элементная сетка (рис. 2). Результаты расчета модели приспособления представлены на рис. 3.



Рис. 2. Модель для анализа в APM FEM

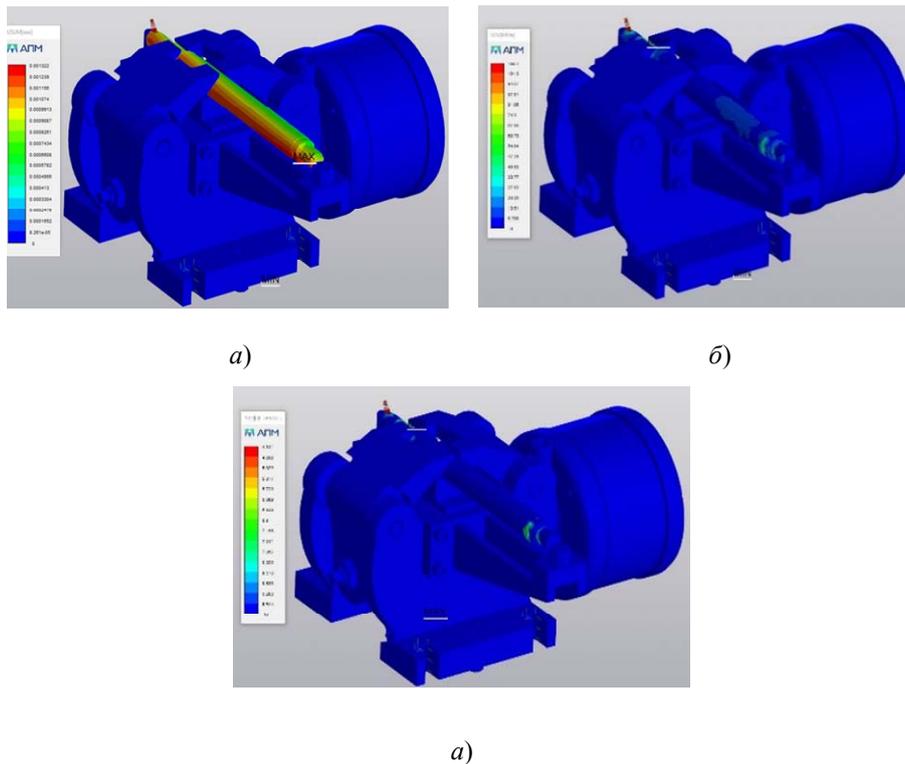


Рис. 3. Результаты расчета модели приспособления:
 а – расчет на точность; б – расчет необходимого усилия зажима;
 в – расчет на прочность

Анализируя полученные результаты расчетов, можно сделать вывод, что приспособление обеспечивает необходимую точность при рабочих нагрузках, причем допуск на полученный размер $15_{(-0.43)}$ на порядок больше получаемых перемещений приспособления. Полученный вариант симуляции подразумевал расчет максимальных и минимальных напряжений по Мизесу в особо опасных зонах приспособления и обрабатываемой детали, который показал, что при рабочих нагрузках на элементы станочного приспособления действуют допустимые напряжения. Анализ значений коэффициента запаса текучести показал, что при рабочих нагрузках прочность приспособления отвечает необходимым условиям точности обработки детали, так как в опасном сечении коэффициент запаса текучести больше 1.

На следующем этапе работы в приложении Artisan Rendering системы КОМПАС-3D выполнен фотореалистичный рендеринг сборочной 3D-модели станочного приспособления.

Artisan Rendering – это инструмент создания высококачественных фотореалистичных изображений изделий, спроектированных в КОМПАС-3D. С помощью приложения можно комбинировать материалы и освещение, фон и сцену и быстро создать высококачественное изображение 3D-модели. Результат создания фотореалистичного изображения спроектированного станочного приспособления представлен на рис. 4.

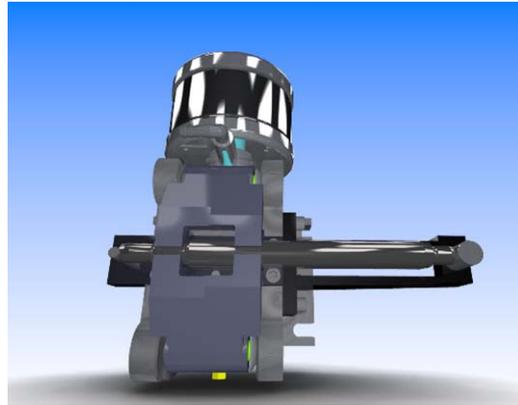


Рис. 4. Фотореалистичное изображение приспособления, выполненное в приложении Artisan Rendering

Система КОМПАС-3D также содержит в своем составе библиотеку создания анимаций, которая позволяет имитировать движения различных устройств и механизмов, смоделированных в системе, процессы сборки-разборки изделий, выполнять проверку соударений компонентов в процессе движения деталей, создавать видеоролики, демонстрирующие работу еще не существующих устройств, для презентаций, создавать двухмерные кинограммы (последовательные кадры) для подробного исследования движения механизмов.

На основе 3D-модели станочного приспособления в виртуальной среде системы КОМПАС-3D создан прототип, имитирующий движение элементов приспособления при его работе, который продемонстрировал высокое качество 3D-модели приспособления, спроектированной на основе компоновочной геометрии. Прототип в статичном состоянии, демонстрирующий внутреннюю конструкцию приспособления, представлен на рис. 5.

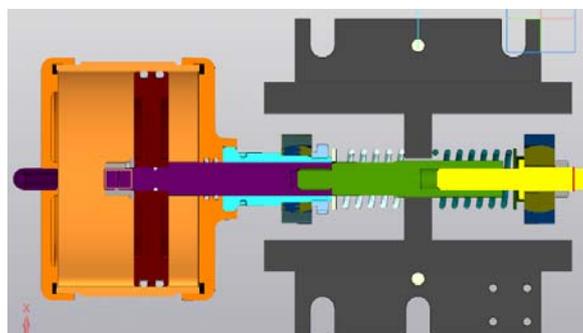


Рис. 5. Прототип станочного приспособления, полученный с использованием библиотеки создания анимаций

Выполненный проект демонстрирует очевидные преимущества использования технологии компоновочной геометрии при проектировании сложных технических систем, а именно:

- 1) возможность гибкого редактирования объектов;
- 2) распределение работ, ускорение работы и сокращение сроков разработки изделия;
- 3) сокращение количества ошибок, связанных с увязкой компонентов в изделии, и легкость внесения изменений в проект на любой стадии готовности;
- 4) возможность использования 3D-модели, созданной по технологии компоновочной геометрии, для выполнения анализа в CAE-системе, для создания ее фотореалистичного и анимированного представлений, что существенно сокращает количество ошибок при проектировании и повышает качество проектных работ.

**ФОТОРЕНДЕРИНГ И КОМПЛЕКСНАЯ АНИМАЦИЯ МОДЕЛИ
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ – НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
3D CAD PTC CREO ВЕРСИЯ 7.0**

Н. В. Грудина, С. В. Стельмашонок, Д. Г. Пацай

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

И. А. Кольцова

*Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь*

Научный руководитель В. И. Козлов

Сегодня 3D-модели с заполненными атрибутами требуются на этапах всего жизненного цикла изделия, поэтому силу трехмерности трудно переоценить. Она вносит большой реализм в компьютерное искусство и компьютерные игры, революционизирует способы нашего общения с машиной. Компьютерное проектирование и работа с трехмерными объектами практикуется уже в течение нескольких десятилетий, однако лишь в последние два-три года, когда даже базовые модели домашних компьютеров стали достаточно мощными, был достигнут настоящий прогресс в 3D-графике.

3D-модели используются как при концептуальном, так и при рабочем проектировании для компьютерного инженерного анализа принимаемых конструкторских решений. Сравнение возможностей Creo Parametric с возможностями любой другой 3D CAD-системы приводит к пониманию причин выбора данной графической системы 500000 конструкторами и инженерами в более чем 40000 компаниях во всем мире. Ни одна из CAD-систем не имеет таких возможностей, качеств, как та совокупность достоинств, которую предоставляет Creo Parametric.

Например, полнофункциональная CAD-система NX, одна из ведущих 3D-модellers, предлагает при работе со сборкой загрузить ее в облегченном формате (происходит автоматически) и нарисовать окно вокруг необходимых для проектирования деталей. Таким образом создается рабочая зона, не нужно разработчику хранить в памяти названия компонентов. Затем загружаются CAD-данные, необходимые для проектирования. Одновременная работа над проектом большого количества конструкторов пока возможна только для кораблестроительных решений.

CAD-система КОМПАС-3D – одна из лучших российских графических систем, предназначена для проектирования таких трехмерных твердотельных моделей:

валов, втулок, цилиндрических прямозубых шестерен внутреннего и внешнего зацепления (рис. 1). При этом система предоставляет возможность оформления проектной и конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД. Простота работы с меню САД-системы, сохранность файла в любом из форматов (CDW, JPEG, CAD) и открытие его в других программах – все это объясняет выбор ее многими пользователями.

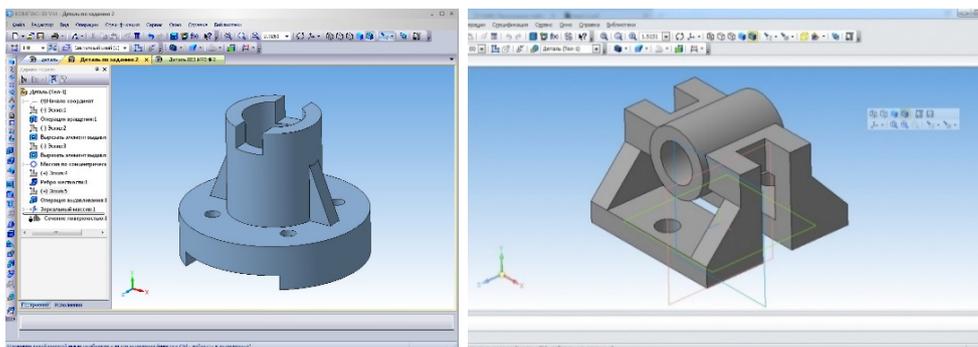


Рис. 1. 3D-объекты, спроектированные в системе КОМПАС-3D

В SolidWorks для создания объемных изображений деталей и компоновок сборок в виде трехмерных моделей применяется принцип трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования.

Для получения трехмерной модели детали в системе SolidWorks используются комбинации трехмерных примитивов. Основой большинства элементов служит плоский эскиз, и уже по нему создается базовый трехмерный объект (рис. 2). Последовательное наращивание 3D-объектов позволяет в итоге получить желаемый результат.



Рис. 2. Получение 3D-объекта в системе SolidWorks

Система автоматизированного проектирования SolidWorks позволяет создавать сборку, руководствуясь одним из основных методов: «сверху вниз», «снизу вверх», сочетанием этих методов. Способ «сверху вниз» характеризуется тем, что процесс проектирования начинается со сборки, что позволяет создавать ссылки на геометрию исходной модели.

В системе T-FLEX CAD используется единая объектная параметрическая модель. Это позволяет единообразно управлять параметрами любых объектов. Принцип устройства параметризации можно представить следующим образом. Там, где пользователь вводит численное или текстовое значение параметра, он может использовать переменную или выражение, зависящее от переменных, что позволяет связывать значения между собой, рассчитывать их по формулам в зависимости от входных параметров модели, изменять их извне (считывая из файла параметров, задавая программно и т. д.).

PTC Creo является набором приложений для проектирования: Creo Parametric, Creo Direct, Creo View, Creo Simulate и Creo Sketch. Разбивка большого CAD приложения на меньшие является одним из направлений, по которым PTC отличается от конкурентов. Приложения спроектированы так, что могут работать и независимо, и совместно. Каждое из них оптимизировано для выполнения конкретной функции: инженер, промышленный дизайнер, концептуальный инженер, аналитик, рецензент проекта.

В Creo объединены два подхода – параметрическое моделирование Pro/ENGINEER и прямое моделирование CoCreate. Параметрическое моделирование основано на упорядочении конструктивных элементов в соответствии с последовательностью их добавления, что делает этот процесс похожим на последовательность обработки детали. При добавлении нового конструктивного элемента для указания его местоположения достаточно сделать ссылку на уже существующий конструктивный элемент – так создается связь «родитель – потомок».

Поэтому PTC приобрела технологию прямого моделирования CoCreate для обеспечения большей гибкости моделирования. Любые поверхности можно вдавливать или вытягивать независимо от последовательности их создания, и изменения можно делать очень быстро.

Для получения доступа к прямому моделированию необходимо выбрать «Flexible Modeling» и можно работать с этими «гибкими» функциями. Конструктивные элементы или их группы редактируются способом «перетащить и положить». При перетаскивании конструктивного элемента в дереве добавляется новый «передвинутый» элемент.

При необходимости использования только одного метода – прямого моделирования, без входа в параметрическую среду, применяется модуль PTC Creo Direct, основанный на технологии от CoCreate. При этом модели, созданные в PTC Creo Parametric, могут быть перенесены в PTC Creo Direct без трансляции или подчистки поверхностей и наоборот. В версии Creo 2.0 появились два новых приложения – Creo Layout и Creo Options Modeler. Creo Layout служит для синхронизации двумерных и трехмерных представлений изделий. С помощью этой программы в ходе эскизного проектирования можно использовать плоские эскизы для создания сложных 3D-моделей, быстро прорабатывать разные варианты исполнения изделий. «Сначала с помощью бесплатного приложения Creo Sketch можно создать эскиз, потом из него либо посредством Creo Layout построить 2D-чертеж и затем перейти на 3D-проектирование, либо сразу передать эскиз в системы Creo Direct или Creo Parametric».

Приложение Creo Options Modeler является конфигуратором структур для создания и проверки модульных конструкций изделия в 3D в начале цикла разработки. При объединении Creo Options Modeler с Windchill – платформой для управления данными можно визуально представлять общую архитектуру изделия, его состав и варианты исполнения, добавлять и изменять отдельные модули.

На предприятиях часто применяются различные инструменты проектирования, и возникает проблема переноса данных между ними. Поэтому важно отметить такую возможность приложения Creo Parametric – расширение поддержки импорта форматов из САПР других производителей, таких как Dassault CATIA V4 и V5, Solid Works и Siemens PLM NX.

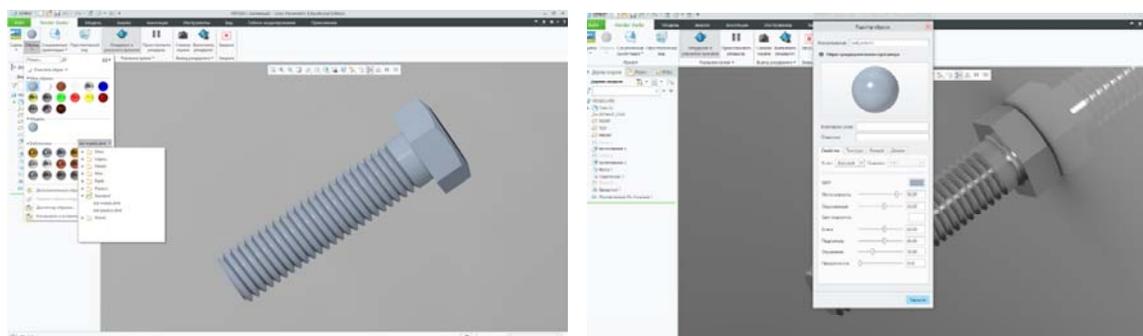
Тесная связь с версией системы управления инженерными данными Windchill является еще одной особенностью Creo. Такое взаимодействие обеспечивает удобный пользовательский интерфейс, упрощенные средства администрирования и установки, поддержку мобильных устройств iPad и iPhone, интеграцию с системой Integrity, предназначенной для управления жизненным циклом приложений (ALM). В Creo есть дополнения для поддержки ГОСТ, ЕСКД и библиотек стандартных изделий.

В версии CREO 7.0 улучшена производительность и добавлены новые функции и возможности: применение чертежа для уже сконструированных деталей – автоматически распознаются существующие углы уклона в исходных и импортированных моделях; фильтры отображения геометрии – быстрое управление отображением типов геометрических представлений, не устанавливая определенные виды или состояния внешнего вида; и, конечно же, фоторендеринг в реальном времени и большая библиотека материалов.

В Creo версии 7.0 и выше есть возможность рендеринга – быстрое создание точных, реалистичных изображений изделий, содержащих сборки любых размеров как в дизайнерских программах (от англ. rendering – «визуализация»). Динамические изменения изделия с учетом таких естественных эффектов, как отбрасывание теней, зеркальные отображения, наложение текстур и прозрачность.

Создание фотореалистичного изображения модели состоит из шести этапов и рендеринг – это последний этап: моделирование или создание объемных объектов, текстурирование (это создание текстуры и материалов поверхностей моделей), оснастка – по-другому риггинг (процесс создания скелета и мышечной массы объекта для дальнейшей анимации), анимация – оживление созданного объекта, композитинг – объединения всех созданных объектов в одну сцену, рендеринг – непосредственная визуализация объекта и запись.

К Creo присутствует обширная библиотека материалов, таких как стекло, пластики, металлы, дерево и многие другие (рис. 3). Если же вы не нашли нужный вам материал, вы можете сами либо редактировать настройки доступных, либо создать свой же зайдя в пункт «дополнительный образы».



а)

б)

Рис. 3. Выбор материала в библиотеке материалов Creo Parametric (а) и настройка материала с новыми свойствами (б)

Так выглядит деталь, если на нее наложить материал. Присутствует шум, так как рендеринг происходит в реальном времени (рис. 4). Это сделано для меньшей нагрузки на систему при работе.



а)

б)

Рис. 4. Рендер в режиме реального времени (а), изображение с наложенной сценой (б)

В программе есть возможность выбора сцены, т. е. окружающего фона. В библиотеке сцен немного, но все же это программа не для дизайна, а для технических целей.

Для повышения производительности и качества работы в графических системах необходимо каждую из них использовать в тех областях промышленности, в которых они обеспечивают явное преимущество. В машиностроительной отрасли более выгодно применение CAD-системы – Creo Parametric из-за ее возможностей сочетать в себе два подхода – параметрическое и прямое моделирование, удобства работы с небольшими приложениями, а также поддержки импорта форматов из САПР других производителей. Развитие такого инструмента, как рендеринг позволило сократить затраты труда и энергоресурсов, представить будущий объект еще на первоначальном этапе и даже заглянуть в космические дали — это многого стоит.

Л и т е р а т у р а

1. SolidWorks. – Режим доступа: <https://www.solidworks.com/ru>.
2. Компас 3D. – Режим доступа: <https://kompas.ru/>.
3. Пархоменко, А. В. Автоматизированное проектирование электронных средств в среде CREO и ALTIUM DESIGNER : учеб. пособие. – 2-е изд. / А. В. Пархоменко, А. В. Притула, В. М. Кришук. – Запорожье : Дикое поле, 2016. – 250 с.
4. Creo Parametric. – Режим доступа: http://www.pro-technologies.ru/product/Creo_Parametric/.
5. Рендеринг. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Рендеринг>.

СНИЖЕНИЕ ПОЖАРООПАСНОСТИ ПОЛИМЕРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В 3D-ТЕХНОЛОГИЯХ

А. Козлов

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

В современных технологиях, в строительстве, автомобилестроении и многих других областях все больший удельный вес занимают изделия из полимерных материалов. В первую очередь это серийно производимые полимеры – полиэтилен (ПЭ),

полипропилен (ПП), полистирол (ПС), полиметилметакрилат (ПММА), поликарбонат (ПК), поливинилхлорид (ПВХ), каучук и разнообразные их смеси. Благодаря своим положительным физико-химическим и механическим свойствам полимеры и композиционные материалы на их основе все более активно применяются в аддитивных технологиях. В наиболее популярных 3D-технологиях (FDM, SL) полимеры используются в высокоэластическом или вязкотекучем состоянии при повышенных и высоких температурах. Так как полимерные материалы обладают такими свойствами, как воспламеняемость, горючесть, дымообразующая способность (дымообразование), токсичность продуктов тления и горения, то проблема снижения их пожароопасности не теряет своей актуальности.

Цель работы – анализ возможностей снижения пожароопасности наиболее распространенных полимерных материалов, используемых в 3D-технологиях.

В табл. 1 приведены пожароопасные характеристики полимерных материалов.

Таблица 1

Пожароопасные характеристики полимерных материалов

Наиболее распространенные полимеры				
Название	$T_{\text{воспламенения, возгорания}}$	$T_{\text{самовоспламенения}}$	$T_{\text{разложения}}$	Токсичные продукты горения, разложения
ПЭ	306	417	120–130	Вода и углекислый газ
ПВХ	390	454–495	110–120	Хлористый водород, окись и двуокись углерода, фосген
ПС	484–496	Около 500	Свыше 300	Стирол, окись углерода, цианистый водород, акрилонитрил, дибутилфталат, фосген
ПУ	215	245	160	цианистый водород (синильная кислота), изоцианиды, окись и двуокись углерода, углеводорода
Применяемые в аддитивных технологиях полимеры				
ПК-12	500	Свыше 500	170	Едкий, вредный дым, выделение фенола
ПА 66	355	435	Свыше 200	Углекислый газ, угарный газ, амины, аммиак
ABS	300	395	200	Летучие органические испарения (ЛОВ), оксид углерода, циан водорода, хлористый водород, акролеин, окислы азота, различные алифатические и ароматические углеводороды
PLA	388	395	190	Оксид углерода, циан водорода, хлористый водород, акролеин, окислы азота, различные алифатические и ароматические углеводороды

Результаты анализа табл. 1 показывают, что существенным фактором, сдерживающим внедрения приведенных полимерных материалов в аддитивные технологии, является их пожарная опасность.

Природа большинства полимерных материалов такова, что невозможно сделать их полностью пожаробезопасными. Одним из наиболее действенных методов, снижающих горючесть и воспламеняемость полимеров, является применение антипиренов.

Антипирены должны соответствовать следующим требованиям:

- препятствовать горению материала;
- не проявлять токсичности при горении;
- не ухудшать функциональные характеристики материала.

В настоящее время существует ряд как органических, так и неорганических замедлителей горения, отличающихся областью применения, механизмом действия, совместимостью с полимером, токсичностью при горении, стоимостью, влиянием на функциональные свойства полимеров. Наиболее широкое применение нашли галоген-фосфорсодержащие антипирены для полимеров, применяемых в строительстве, медицине, электронике.

Эффективность их действия связывают со следующими факторами:

- специфическим влиянием фосфорных соединений на процессы, протекающие в конденсированной фазе при горении полимеров; при этом имеет место увеличения выхода нелетучего коксового остатка и уменьшение горючих продуктов пиролиза;
- образованием поверхностного стеклообразного или вязкого расплавленного слоя полиметафосфорной кислоты; этот слой служит физическим барьером для переноса тепла от пламени к полимеру и, как следствие, диффузии реагентов в сторону пламени;
- ингибированием газофазных реакций в пламени;
- влиянием на гетерогенное окисление карбонизованного продукта пиролиза полимеров.

Однако многочисленные достоинства таких антипиренов перекрываются одним большим недостатком – продукты их разложения являются очень токсичными.

Разумной альтернативой им может быть использование таких неорганических веществ, как гидроксида и карбоната магния, бората цинка и др. Большой эффект может быть получен введением наполнителя, разлагающегося с поглощением тепла. Классическим примером такого наполнителя является гидроксид алюминия $Al(OH)_3$: около 55–65 мас. %. В этом случае снижение горючести существенно зависит от соотношения теплопотерь на разложение наполнителя и всех других потерь тепла от пламени, которые всегда тем выше, чем больше общая теплота горения полимера.

Однако достижение огнезащитного эффекта обеспечивается при введении в полимер до 70 мас. % антипирена, что требует изменения технологии и ухудшает показатели качества материала.

В качестве антипиренов исследовалась возможность применения таких неорганических веществ, как модифицированные бентонитовые глины высокой дисперсности. Высокие дисперсность и поверхностная энергия вещества способствуют прививке функциональных групп, придающих ему необходимые свойства.

Для получения полимеров, с содержанием 1–5 мас. % антипирена, применялся экструзионный метод. Антипирен вводился на стадии расплава. Для исследования пожаробезопасных свойств применялся стандартный метод при помощи прибора ОТМ. О горючести материала судили по приращению температуры и потере массы испытательных образцов.

По значению максимального приращения температуры Δt_{\max} и потере массы Δm материалы классифицируют: на трудногорючие – $\Delta t_{\max} < 60$ °С и $\Delta m < 60$ %; горючие – $\Delta t_{\max} \geq 60$ °С или $\Delta m \geq 60$ %.

Горючие материалы подразделяют в зависимости от времени τ достижения t_{\max} : на трудновоспламеняемые – $\tau > 4$ мин; средней воспламеняемости – $0,5 \leq \tau \leq 4$ мин; легковоспламеняемые – $\tau < 0,5$ мин.

Для контроля сохранения основных свойств исследуемых полимеров измерялись и сравнивались их некоторые механические характеристики.

Таблица 2

Сравнительные характеристики исследуемых полимерных материалов

Состав полимерного материала	Механические характеристики			Классификация материала по горючести
	Модуль упругости, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при деформации, %	
Контрольный образец	26,74	18,2	274,48	Горючий, средневоспламеняемый
С антипиреном 1,5 %	148,28	31,85	103,3	Горючий, трудновоспламеняемый

Проведен анализ информации о теплофизических и пожароопасных характеристиках стандартных термопластов: полиамида, полиэтилена, полиметилметакрилата, полистирола, полипропилена, поликарбоната, полилактида PLA, ABS-пластика. Результаты показали, что применяемые на сегодняшний день серийные полимеры не могут справиться с большими температурными нагрузками, хотя и имеют большой спектр применений благодаря своим хорошим эксплуатационным свойствам. Новой альтернативой данным материалам выступают полимеры с добавками неорганических антипиренов, например, функционально модифицированных глин. На основе полученных результатов можно сделать вывод о перспективности разработанного антипирена и возможности его эффективного применения для повышения огнестойкости полимеров. Последние оказываются способными существенно расширить применение серийных полимеров, например, для печати на FDM-принтерах.

Литература

1. Бобрышева, С. Н. Применение метода дисперсного анализа однофакторной математической модели для оптимизации состава полимеров с пониженной горючестью / С. Н. Бобрышева, Л. И. Буякевич, Д. Л. Подобед // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 3. – С. 45–51.
2. Исмаилов, А. Полимерные антипирены / А. Исмаилов, Р. Исмаилов, 2015.
3. Бобрышев, С. Н. Снижение горючести полимерных материалов / С. Н. Бобрышев, М. В. Марченко, В. Б. Боднарук // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конфер., Минск, 2008. – С. 181–184.

**КОЛЛАБОРАТИВНАЯ РАБОТА «КОНСТРУКТОР–ТЕХНОЛОГ–
ПРОИЗВОДСТВО» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-МОДЕЛЕЙ
В КОНЦЕПЦИИ ИНДУСТРИЯ 4.0**

Н. В. Грудина

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

И. А. Кольцова

*Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь;*

Научный руководитель А. С. Шантыко

В соответствии с государственной политикой цифровизации в Республике Беларусь и концепцией Индустрия 4.0, требованиями постоянного повышения качества выпускаемой продукции приоритетность использования 3D-моделей в жизненном цикле изделия приобретает первостепенную значимость.

Сегодня в ОАО «Гомсельмаш» 3D-модели с заполненными атрибутами востребованы на этапах всех жизненного цикла изделия (ЖЦИ), которые взаимосвязаны между собой: маркетинг, проектирование, технологическая подготовка производства, производство, реализация, эксплуатация, ремонт и обслуживание, утилизация.

Сегодня 3D-модель необходима всем специалистам ОАО «Гомсельмаш», задействованным в жизненном цикле изделия. В соответствии с требованиями современных ТНПА ГОСТ 2.052–2015 «ЕСКД. Электронная модель изделия», ГОСТ 2.102–2013 «ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов» – документы, содержащие электронную геометрическую модель детали и требования к ее изготовлению и контролю [1], [2]. В настоящее время в НТЦК уже 100 % проектируемых изделий разрабатываются с использованием 3D-моделей. Все конструкторские подразделения работают с единым программным средством – Creo Parametric версии 4. Данные сохраняются в едином информационном пространстве в системе управления жизненным циклом изделия PDM Windchill.

3D-модель создается (модифицируется) проектировщиками (конструкторами) Научно-технического центра (далее – НТЦК) ОАО «Гомсельмаш» на этапе проектирования. Проектировщики определяют геометрию, размеры, профили, поперечные сечения, материалы, типы соединения 3D-модели. Конструктор выполняет разработку, модификацию 3D-моделей и чертежей; выполняет инженерные расчеты на базе 3D-моделей, проводит виртуальные и натурных испытаний с использованием 3D-моделей; выполняет конструкторские изменения с учетом версий 3D-моделей; проводит бизнес процессы электронного согласования 3D-моделей, чертежей; согласование извещений на изменение.

3D-модель является единым источником информации для ассоциативно связанных чертежей и конструкторской документации, конструкторских спецификаций и для станков с ЧПУ, нужна именно актуальная 3D-модель.

Проектирование сельскохозяйственной техники состоит до 45 % из деталей (3D-моделей), изготовленных из листового материала (лист, полоса). На предприятии реализована программа для автоматизированного проектирования 3D-моделей из листового металла в Creo (модуль Sheet Metal). Работа конструктора и технолога связаны. 3D-модели, разработанные конструктором, технологи используют для технологической проработки, для построения развертки и составления программ для ЧПУ. Для взаимодействия конструктора и технологов подписано, согласовано

распоряжение «Об организации совместной работы с листовыми деталями в системе Windchill во взаимодействии с Creo». Данное распоряжение регламентирует действия подразделений для ускорения технологической подготовки производства, улучшения качества и технологичности изделий на этапе проектирования и производства, совершенствования информационного обмена электронными моделями деталей и сборочных единиц (далее – ДСЕ) между НТЦК и технологическими службами ОАО «Гомсельмаш» на базе средств, предоставляемых системой управления данными об изделии PDM Windchill с учетом имеющихся в наличии для проектирования и производства листовых деталей современных программных средств и технологического оборудования с числовым программным управлением, дальнейшего эффективного использования Windchill во взаимодействии с Creo, продвижения стратегии Индустрии 4.0 в ОАО «Гомсельмаш», повышения качества через снижение количества несоответствий.

Согласно данному документу, конструкторы (проектировщики) выполняют проектирование 3D-моделей деталей из листовых материалов с использованием модуля Sheet Metal в Creo и таблицы гибки, согласованной с управлением главного технолога (далее-УГТ). Сохраняют 3D-модели в Windchill.

Для модели важны правильно заполненные атрибуты (параметры). В НТЦК для работы с моделями разработаны СТП 325-683–2017 «Требования к электронной структуре изделия. Описание процессов разработки электронного изделия», ИН 325-2111–2017 «Инструкция. Методика трехмерного проектирования с использованием программных средств Creo, Windchill» [3]–[6].

Конструктор при создании 3D-модели вводит атрибуты: обозначение (уникальное); наименование; первичная применяемость; материал; таблицы допусков в Creo; таблицу гибки (гиба) в Creo, назначает материал. Наименование материала выбирают из библиотеки в Windchill, созданной и поддерживаемой в актуальном состоянии «Администраторами библиотеки» в соответствии с ТНПА (СТП 325-683–2017 «Требования к электронной структуре изделия. Описание процессов разработки электронного изделия», ГОСТ 2.056-2014 «Единая система конструкторской документации. Электронная модель детали», СТП 310-036–2014 «Сортамент металлопроката»). Конструкторы проверяют плотность на 3D-моделях для правильного расчета массы ДСЕ.

Для определения геометрии детали конструкторы проставляют на 3D-модели или на чертеже (рис. 1), ассоциативно связанном с 3D-моделью [3]–[6]:

- размеры, в том числе – все размеры с несимметричными допусками;
- данные о предельных отклонениях (допуски, посадки);
- геометрические допуски; базы; шероховатость поверхности;
- вырезы (выкуски), влияющие на конструкцию (должны быть указаны в чертеже с размерами);
- технические требования и текстовые атрибуты (аннотации) и т. п.

Конструктор выполняет проверку 3D-модели модулем Model Check в Creo. При работе с моделью, автоматически при ее сохранении, модуль Model Check в Creo проверяет модель на соответствие установленных требований и, при наличии несоответствий, выдает об этом сообщение. Разработчик перед сохранением модели должен устранить все выявленные данным модулем несоответствия.

Конструкторы выполняют валидацию 3D-модели командами Creo «Модель» «Разгиб»/«Повторный гиб», за исключением плоских деталей. И располагают команды Creo «модель» «Разгиб»/«Повторный гиб» последними в «Дереве моделей». При правильном построении 3D-модели развертка получается автоматически [6].

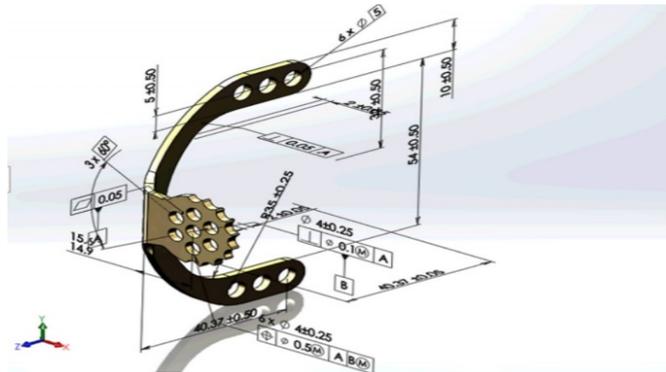


Рис. 1. Пример выполнения 3D-модели

Конструктор проверяет листовые модели командой Creo «Контроль геометрии» – это метод, которым Creo информирует о потенциальных проблемах регенерации или геометрии в 3D-модели.

В соответствии со стадией проектирования конструкторы выполняют «Бизнес-процесс электронного согласования (утверждения)» в Windchill для перевода 3D-моделей, составных частей, чертежей в состояние «Выпущено». Результатом согласования является 3D-модель, составная часть, чертеж в состоянии «Выпущено». Версия, итерация чертежа учитываются.

Согласно использованию актуальных 3D-моделей и взаимодействию конструктор-технолог уменьшает время на технологическую подготовку производства. Предоставлена возможность технологам анализировать 3D-модели еще при стадии проектирования.

Технологи УГТ получают доступ на контекст в Windchill и выполняют технологическую подготовку производства для 3D-моделей, переведенных в состояние «Выпущено».

Раньше, по старым технологиям, технологи УГТ перечерчивали заново модели. Часто еще встречается для использования моделей для инженерного анализа, технологической подготовки, обработки ЧПУ выполняется повторное моделирование по чертежам для загрузки информации в цифровую систему у станка.

Работа в смежных подразделениях может сократиться за счет исключения двойного ввода информации (перечерчивания чертежей). Таким образом, эффект от внедрения PDM может прослеживаться не в отдельном подразделении, а заключаться в сокращении всей цепочки конструкторско-технологической подготовки производства в единой информационной среде.

3D-модель, ее качество, актуальность данных остается на ответственности, компетенции конструктора, а для производства, для станков с ЧПУ нужна именно актуальная 3D-модель.

Технологи самостоятельно реализуют имеющуюся в 3D-модели операцию развертки модулем Sheet Metal и используют ее при технологической проработке листовых деталей. Технологи получили развертку, далее происходит разработка программы для лазера с ЧПУ.

В подразделении «207-Экспериментальное производство» ОАО «Гомсельмаш» технологи и мастера, начальники участков, могут находить по «Обозначению» 3D-модели в браузере в Windchill и визуализировать 3D-модели на мониторе персонального компьютера. Персональные компьютеры в корпоративной, внутриводской сети, расположены в «кабинах мастеров».

Вместе с тем на данный момент 3D-модели еще не являются главным источником информации об изделии в ОАО «Гомсельмаш». Несмотря на то что конструкторы проектируют свои изделия в виде 3D, в итоге на их основе выпускают конструкторскую документацию – традиционно бумажные чертежи, которые в дальнейшем и являются основным источником информации, в том числе и в производстве.

В настоящий момент нельзя отказаться от чертежей (бумажных носителей) в рамках ОАО «Гомсельмаш». На базе 3D-модели конструктор генерирует ассоциативный чертеж листового детали. Сохраняет чертежи в Windchill.

Современный ГОСТ 2.052–2015 «Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения» допускает в технических требованиях чертежа и (или) в атрибуте модели приводить запись по типу «неуказанные размеры согласно 3D-модели АБВГ.XXXXXX.XXX» [2], т. е. на чертеже получается ссылка на 3D-модель.

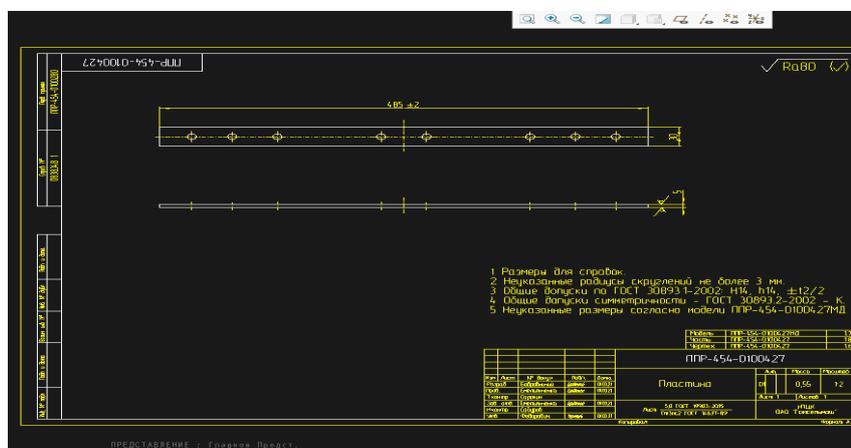


Рис. 2. Чертеж, выполненный в Creo, с указанием ссылки на 3D-модель в технических требованиях чертежа

Сейчас никто не отрицает важность и необходимость применения трехмерного моделирования. Когда же речь заходит о придании трехмерным 3D-моделям легитимного (законного) статуса, выясняется, что внедрение 3D-моделирования совместно с чертежами значительно увеличивает объем документооборота (это и согласование, и необходимость учета документов, необходимость внесения изменений и в чертеж, и в модель и т. д.). Поэтому данная методология проходила бы легче при упрощении чертежей, с возможным переходом на бесчертежную технологию, по крайней мере, на некоторых этапах жизненного цикла изделия [9].

Литература

1. Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов : ГОСТ 2.102–2013.
2. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия : ГОСТ 2.052–2015.
3. Единая система конструкторской документации. Электронная модель детали : ГОСТ 2.056–2014.
4. Требования к электронной структуре изделия. Описание процессов разработки электронного изделия : СПП 325-683–2017.
5. Инструкция. Методика трехмерного проектирования с использованием программных средств Creo, Windchill : ИН 325-2111–2017.

6. Об организации совместной работы с листовыми деталями в системе Windchill во взаимодействии с Creo Parametric и регламент по организации совместной работы ИТЦК и УГТ по листовым деталям : Распоряжение от 14.11.2018. – № 295.
7. Режим доступа: <https://pavel-samuta.livejournal.com>.
8. 3D-модель как основной источник данных при организации совместной работы при проектировании, технологической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации / И. А. Кольцова [и др.].

**ОСОБЕННОСТИ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
АНАТОМИЧЕСКИХ СТРУКТУР ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ
В ОРТОПЕДИИ И НЕЙРОХИРУРГИИ**

Е. В. Ковалев

Учреждение «Гомельская областная клиническая больница»

Д. А. Довгало, А. В. Ковалевич, С. В. Стельмашонок

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

Научные руководители: С. И. Кириленко, И. Н. Степанкин

Использование современных информационных технологий в сферах деятельности человека является неотъемлемой частью прогрессивного развития сегодняшней техносферы. Конструкторское сопровождение медицинских технологий – залог успешного внедрения 3D-моделирования в хирургическое лечение пациентов, в области ортопедии и нейрохирургии.

Применение компьютерной графики и последующей процедуры 3D-прототипирования костных структур позволяет существенно детализировать объекты планируемого оперативного вмешательства и на стадии предоперационной подготовки тщательно проработать стратегию хирургических манипуляций, и при необходимости подготовить имплантируемые элементы.

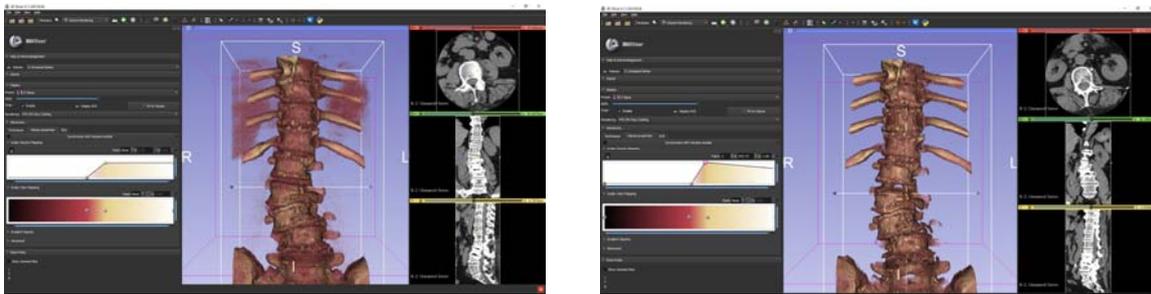
Предоперационное планирование заключается в том, что перед каждым хирургическим вмешательством операционная бригада планирует ход операции и готовится к возможным осложнениям, которые могут возникнуть в ходе нее. В этом им помогают напечатанные 3D-модели. Трехмерные модели позволяют выполнить симуляционный тренинг, подобрать размер имплантата и различных удерживающих устройств.

Печать трехмерных моделей является достаточно тривиальной задачей, которая технически реализуется термоэкструзионными принтерами на основе соответствующих компьютерных файлов. Основной задачей при получении модели ортопедического объекта является точное воспроизведение костных и других анатомических структур на основании преобразования файлов DICOM, полученных в процессе компьютерной томографии (КТ) [1].

В статье приведены примеры быстрой конверсии КТ-сканов в готовые модели для трехмерной печати. Для преобразования использована программа «3D Slicer», которая находится в свободном доступе для всех пользователей [слисер]. Программа графического редактора «Meshmixer» обеспечивает оптимизацию модели за счет уменьшения полигонов и «скульптинга», т. е. удаление неровностей, сглаживание поверхностей [миксер].

Начальным этапом моделирования является перемещение Dicom файлов пациента в программу «3D Slicer». Уже на данном этапе сформируется 3D-модель и с помощью настроек улучшается ее качество за счет удаления артефактов. Как видно из рис. 1, а, фрагмент ортопедического объекта импортируется в том объеме, который представляет собой набор цифровых образов, конвертированных в соответствующие виртуальные объекты.

Процесс получения трехмерной модели осуществляется при участии нейрохирурга. Формируется модель заданного участка позвоночника с максимальной степенью детализации (рис. 1, б). Особенностью построения реальной модели является необходимость мануального построения межпозвоночных дисков, которые в процессе компьютерной томографии дают недостаточно контрастные отклики на цифровых файлах КТ.



а)

б)

Рис. 1. Общий вид интерфейса пакета «3D-slicer»: а – до удаления артефактов; б – после удаления артефактов

Окончательная оптимизация рассматриваемого примера заключается в вычлениении заданного объема модели позвоночника, который представляет собой объект оперативного вмешательства (рис. 2).

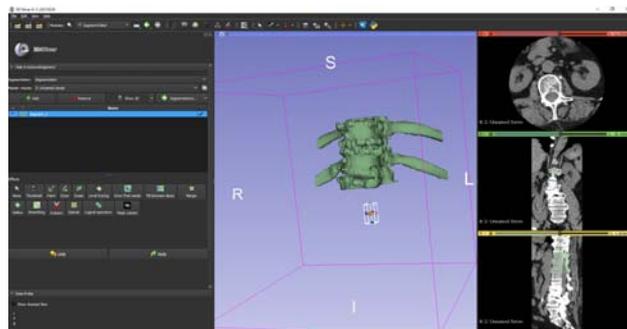


Рис. 2. Пример фрагментации модели позвоночника для детализации оперативного вмешательства

Второй пример практического применения 3D-моделирования посвящен разработке трехмерного объекта челюсти человека. Особенностью данной модели является развитая геометрия внешней поверхности объекта, состоящего из двух сложно-профильных частей (рис. 3).

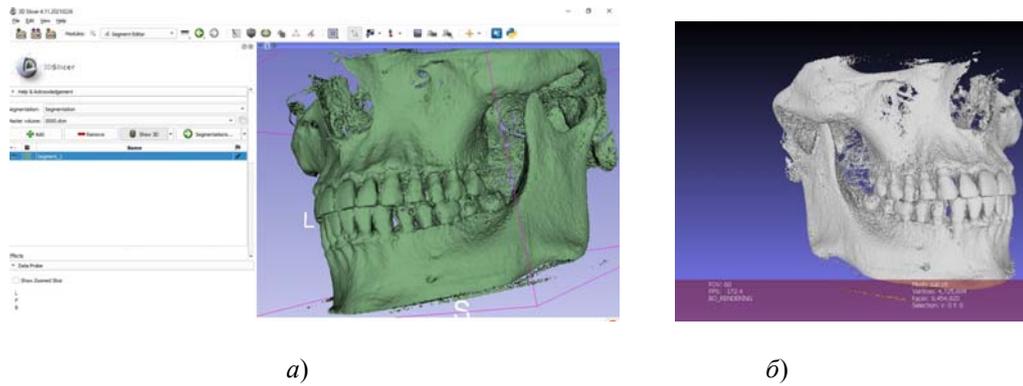


Рис. 3. Общий вид модели «Челюсти»:
a – до удаления артефактов, *б* – после удаления артефактов (9,5 млн полигонов)

Как видно из рис. 3, процесс построения модели заключается не только в трансляции исходных цифровых файлов в формат *.STL, но и мануальный процессинг разработчика в направлении заполнения некорректно отсканированных областей, например, мелких полостей в костной ткани. Еще одним важным этапом формирования окончательного вида модели является оптимизация количества полигонов – дискретных элементов, из которых предпроцессор программы строит виртуальную 3D-модель. Их большое количество затрудняет компьютерную обработку на всех этапах работы – от построения модели до трехмерной печати. В такой ситуации по признакам визуального соответствия проведена дополнительная оптимизация модели, которая за счет уменьшения количества полигонов позволяет существенно повысить производительность всех описанных процессов. Главной задачей финишной оптимизации является сохранение соответствия между готовой моделью и ее биологическим прототипом (рис. 4).

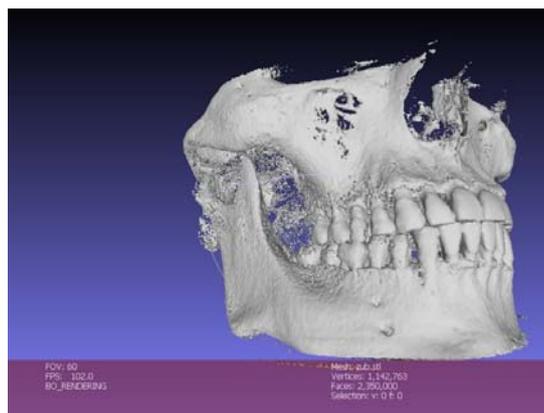


Рис. 4. Вид модели «Челюсти» после оптимизации количества полигонов (2,35 млн полигонов)

Литература

1. Денисов, О. Е. Информационная система для изучения анатомии человека / О. Е. Денисов, И. А. Левашов, А. В. Кузьмин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2014. – № 2 (10). – С. 153–157.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛЬНОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ТРЕНИИ СО СМАЗОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ, МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ТВЕРДЫМИ ДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

А. В. Бондарев

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

Научный руководитель Е. Н. Волнянко

Поверхность металлических изделий по сравнению с их внутренними частями имеет ряд особенностей. Любой атом, расположенный внутри металла с идеальной кристаллической решеткой, находится в состоянии подвижного устойчивого равновесия. Атомы, которые находятся на поверхности, имеют только односторонние связи с металлом, поэтому их состояние неустойчиво: они более активны, обладают избыточной свободной энергией по сравнению с атомами, находящимися в объеме материала. С физической точки зрения, поверхность металлов представляет собой атомную плоскость с нескомпенсированными силовыми полями атомов, что приводит к высокой сорбционной активности поверхностного слоя. В реальных условиях поверхностный слой металлов и его толщина зависят от природы металлов, состава окружающей газовой среды и условий контактирования: температуры, давления, продолжительности и т. д. [1]. Строение поверхностей трения во многом определяет износостойкость трибосопряжения. Структурные параметры поверхности трения входят в совокупность взаимосвязанных характеристик, обуславливающих физико-химические, трибологические и эксплуатационные свойства узлов трения.

В процессе работы металлическое изделие в составе трибосопряжения существенно меняет механические свойства: прочность, пластичность, износостойкость и так далее за счет фазовых превращений поверхностного слоя. Фазовые превращения в поверхностных слоях сопряженных деталей обусловлены высокими контактными нагрузками и температурами. Из этого следует, что борьба с деструкцией поверхностного слоя деталей должна идти в первую очередь по пути улучшения смазки и снижения температур на трущихся поверхностях [2].

В работе исследовали стальные поверхности, разделенные смазочным материалом, содержащим ультрадисперсные керамические частицы. Пара трения: фольга из стали 3 и ролик из стали 45. Использовали смазочный материал на основе индустриального масла И-40, загущенного церезином. Керамические частицы представляют собой твердый раствор Al_2O_3 и AlN в Si_3N_4 с общей формулой $Si_{6-x}Al_xO_xN_{8x}$ (где $x = 0,8-4,2$), полученный плазмохимическим методом. Элементный состав, %: $44,5 \pm 1,5Si$, $14,5 \pm 1,0Al$, $9,5 \pm 1,5O$, $30,5 \pm 1,5N$. Исследования поверхностей трения проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии. Поверхности трения стальных образцов обрабатывали методами, используемыми в металлографии [3]. Подготовку стальных образцов проводили травлением в реактиве Фрая [4] после предварительного нагрева. Металлографическую структуру оценивали методами оптической микроскопии.

Металлографические исследования показали, что стальные образцы после трения со смазочным материалом, содержащим ультрадисперсные керамические частицы, приобрели пластически деформированный гетерофазный поверхностный слой полиэдрического строения, тогда как исходная фольга имеет четко выраженную текстуру прокатки. На рис. 1 приведены фотографии образцов, наблюдаемых в стереоскопическом микроскопе. Нитридные, оксидные и другие неметаллические включе-

ния в сталях, как правило, оценивают по характерной окраске на нетравленных микрошлифах, так называемых цветах побежалости. Полный и точный анализ включений является достаточно сложной процедурой. Однако использование справочных данных [3] позволило констатировать наличие на поверхностях трения стальных деталей после трения со смазочным материалом, модифицированным ультрадисперсными керамическими частицами, включений следующих соединений: нитрида железа, имеющего серо-голубой цвет; оксидов железа буроватого цвета; силиката железа, имеющего очень темный, практически черный цвет; и цементита блестящего, белого цвета.

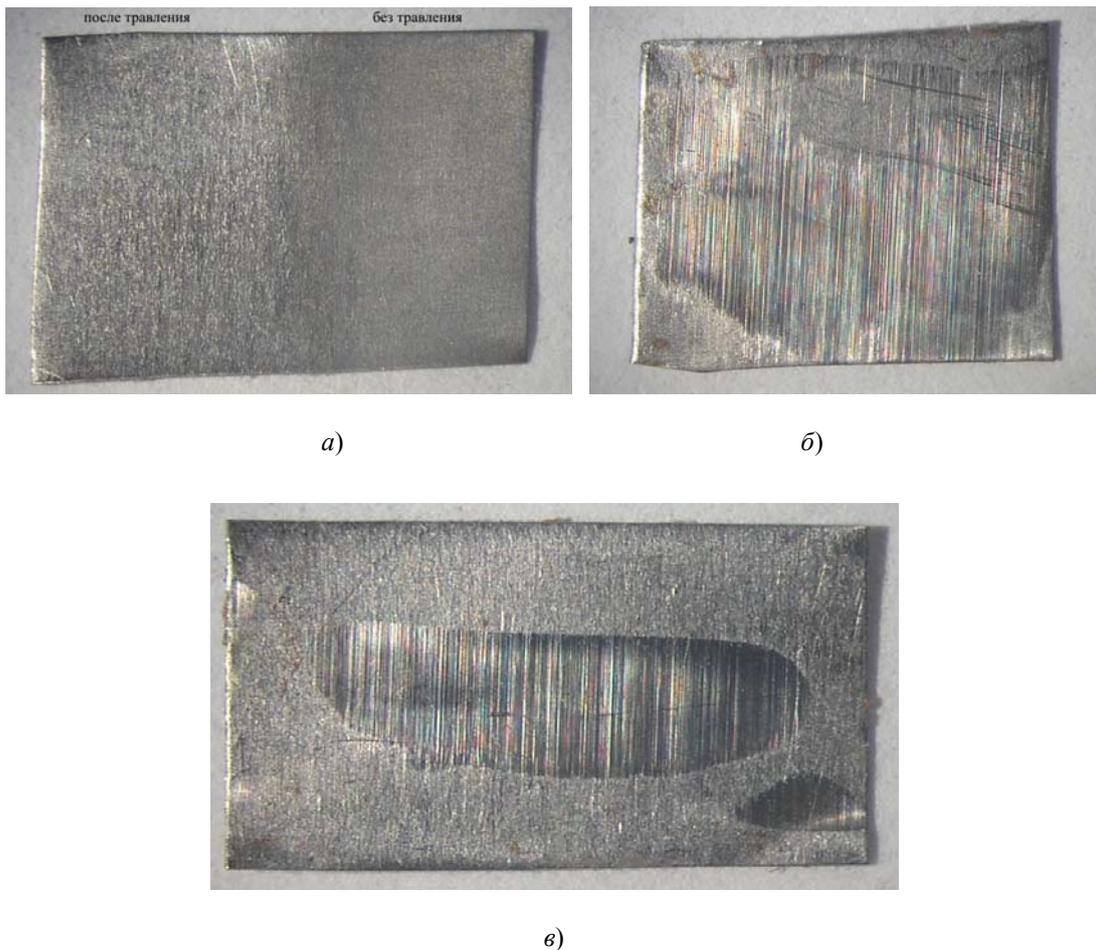
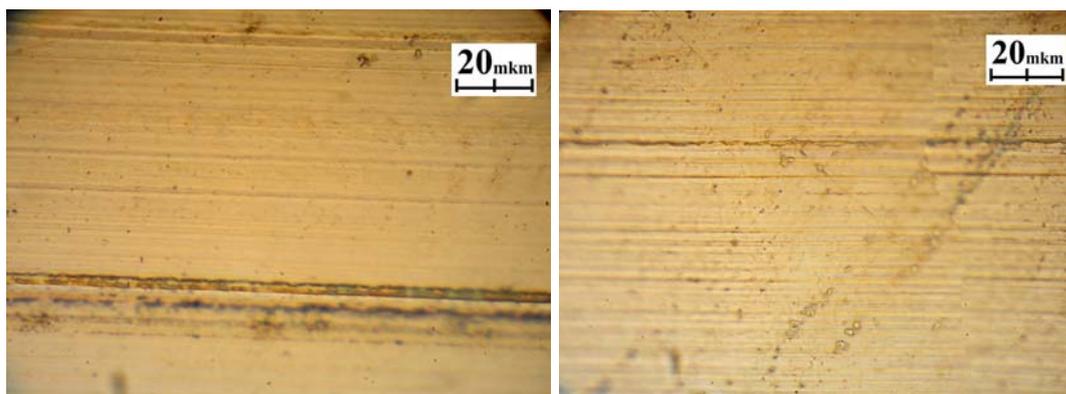


Рис. 1. Изображения стальных поверхностей в стереоскопическом микроскопе:
a – до трения; *б* – после трения при нагрузках 20 МПа;
в – после трения при нагрузках 70 МПа

Изображения поверхностей трения, полученные с помощью светового микроскопа в светлом поле, приведены на рис. 2. Особенностью поверхности стальных образцов после трения при повышенных нагрузках в среде смазочного материала, содержащего ультрадисперсные керамические частицы, является сглаженный рельеф. Трение при высоких нагрузках приводит к формированию зеркально гладких поверхностей, что обуславливает увеличение площади фактического контакта и способствует равномерному распределению приложенной нагрузки в трибосопряжении.



а)

б)

Рис. 2. Изображения поверхностей стальных образцов в световом микроскопе в светлом поле: после трения с использованием СМ, модифицированных \square -сиалоном: а – при нагрузке 20 МПа; б – при нагрузке 70 МПа

Очевидно, что наиболее выраженный антифрикционный эффект при использовании в качестве целевой добавки ультрадисперсных керамических частиц наблюдается в тяжело нагруженных узлах трения.

Литература

1. Структурные превращения металлов при трении. – Режим доступа: <https://znatock.org/s775t1.html>. – Дата доступа: 05.02.2021.
2. Кламанн, Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / Д. Кламанн. – М.: Химия, 1988. – 488 с.
3. Что такое металлография, этапы и методы исследований. – Режим доступа: <https://wikimetall.ru/metalloobrabotka/metallografiya.html>. – Дата доступа: 05.02.2021.
4. Смитлз, К. Дж. Металлы / К. Дж. Смитлз. – М.: Металлургия, 1980. – 446 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РАБОТЫ СИСТЕМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МИНИ-ЗАВОДАХ

П. Н. Никитин

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

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/м³) создают 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].

Перечислим основные способы интенсификации плавки в современной дуговой печи:

- 1) использование топливокислородных горелок для подогрева лома в печи и ускорения его расплавления;
- 2) окисление углерода, дополнительно вводимого в печь, газообразным кислородом с целью увеличения прихода тепла, получаемого от экзотермических реакций окисления компонентов шихты;
- 3) окисление части железа шихты газообразным кислородом с целью увеличения прихода тепла от экзотермических реакций окисления компонентов шихты и ускорения формирования окислительного основного шлака;
- 4) использование специальных фурм для дожигания СО в рабочем пространстве печи до СО₂ с целью увеличения прихода тепла от окисления углерода;
- 5) применение газообразного кислорода для ускоренного окисления избыточного количества углерода металла в окислительный период плавки;
- 6) применение донной или глубинной продувки расплава кислородом или чаще инертным газом для ускорения плавления и нагрева, а также уменьшения угара металла за счет лучшего перемешивания расплава;
- 7) использование в шихте жидкого чугуна с целью ускорения расплавления лома за счет физического тепла чугуна и дополнительного прихода тепла от экзотермических реакций окисления примесей;
- 8) использование физического тепла отходящих печных газов для подогрева лома;
- 9) применение ряда чисто технологических мероприятий для ускорения расплавления шихты и нагрева металла: работа на «болоте», использование вспененного шлака и т. д.;
- 10) использование специально подготовленной шихты (измельченного лома).

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.

Экспериментальные исследования тепло- и массообменных процессов в рабочем пространстве ДСП имеют свою специфику и весьма затруднительны. На данный момент существует большое количество прикладных программных пакетов для моделирования химико-технологических систем. 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.

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, вариант *a*), во второй – размещены тангенциально (рис. 1, вариант *б*).

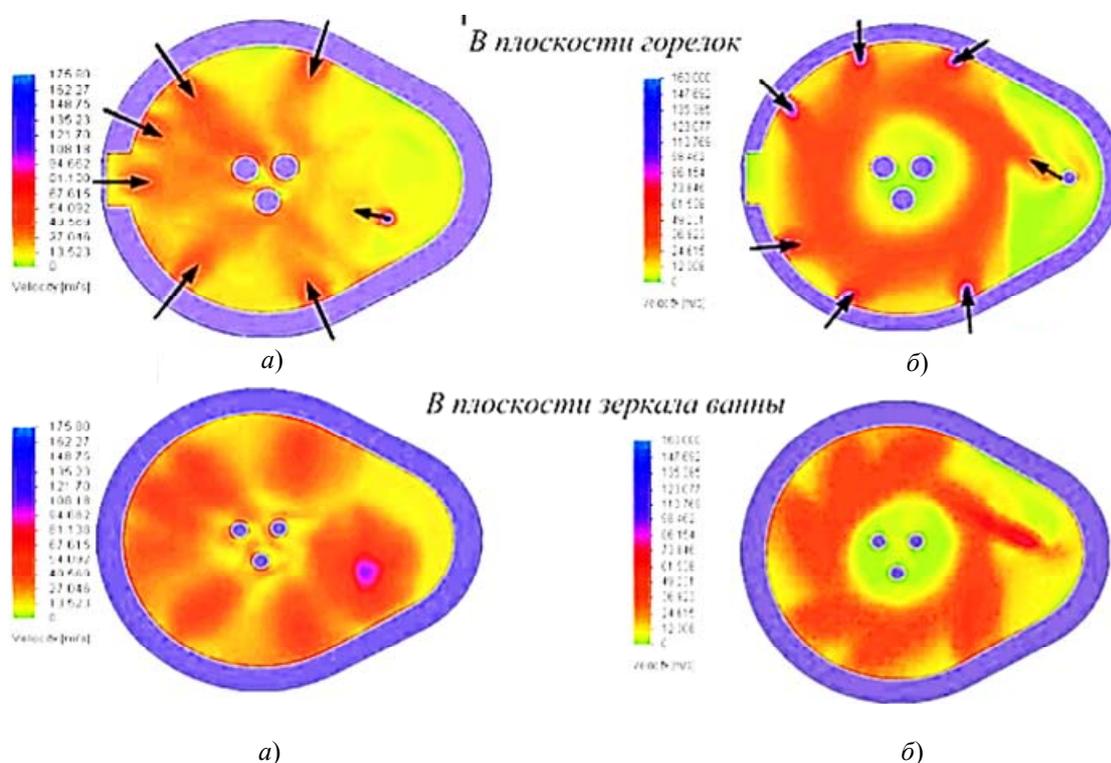


Рис. 1. Траектории движения газовых потоков в объеме рабочего пространства ДСП:
a – по проекту «Danieli»; *б* – при тангенциальном расположении газокислородных горелок

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 скорости, изменилось и распределение температурных полей. К моменту попадания в подсводовое 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.

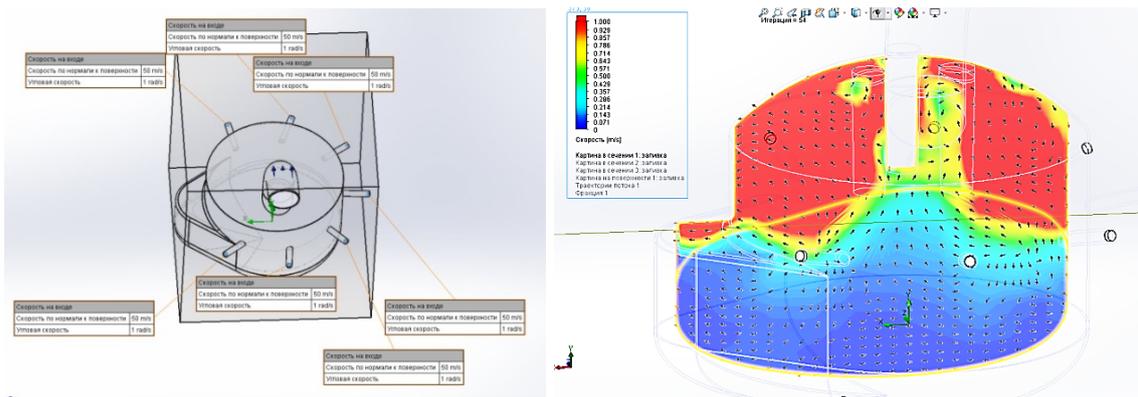


Рис. 2. Усовершенствованная параметрическая модель для газодинамического анализа и результаты моделирования в виде траекторий движения частиц газового потока

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 // Электрометаллургия. – 2010. – № 4. – С. 31–36.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОМКОВШЕЙ МАШИН НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ

В. И. Бабышев

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

Научный руководитель В. А. Жаранов

В последнее время в области технологий разлива стали наблюдаются существенные изменения, направленные на увеличение производительности МНЛЗ и повышение качества разливаемых сталей. Это обусловило развитие исследований, связанных с металлургическими и гидродинамическими процессами, происходящими в проковше в ходе разлива.

Геометрическая форма проковша выбирается по возможности наиболее простой и приближенной к параллелепипеду. Это упрощает процесс изготовления футеровки проковша и его обслуживания (например, извлечения остатка металла после разлива). Для удобства эксплуатации также выполняются технологические уклоны

стенок проковша сверху вниз. Для более эффективного приема струи металла из сталеразливочного ковша в конструкции проковша может предусматриваться специальная полость в виде «кармана».

Оптимальная емкость проковша определяется сечением отливаемых заготовок, числом ручьев и расстоянием между ними, скоростью разливки, требованиями к возможности всплытия неметаллических включений и ассимиляции их шлакообразующим покрытием. На величину емкости проковша влияет также и режим разливки: в случае серийной разливки емкость проковша увеличивается с целью обеспечения запаса металла, необходимого для замены сталеразливочного ковша.

Для повышения чистоты стали в проковше необходимо контролировать процесс течения жидкого металла (рис. 1) и устанавливать оптимальный уровень симметричности и динамики перемещения потоков в жидкой ванне.

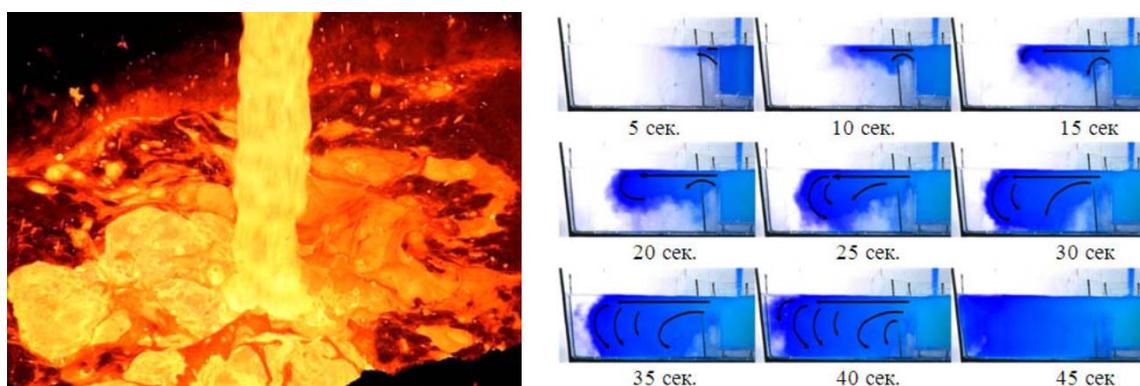


Рис. 1. Характер турбулентных потоков в зоне падения струи из сталеразливочного ковша

Решение таких задач требует усовершенствования внутренней конфигурации проковша, что позволяет интенсифицировать трансформацию турбулентной кинетической энергии в зоне притока металла.

Как следствие, в жидкой ванне проковша увеличивается объем зон с квазиламинарным движением потоков и уменьшается доля так называемых «мертвых» зон, что способствует флотации неметаллических включений, а также усреднению стали по химическому составу и температуре.

Оптимальная емкость проковша определяется сечением отливаемых заготовок, числом ручьев и расстоянием между ними, скоростью разливки, требованиями к возможности всплытия неметаллических включений и ассимиляции их шлакообразующим покрытием. На величину емкости проковша влияет также и режим разливки: в случае серийной разливки емкость проковша увеличивается с целью обеспечения запаса металла, необходимого для замены сталеразливочного ковша.

При формировании в проковше зон с турбулентным характером движения потоков (например, область шлакового пояса, прилегающая к зоне падения струи) в этом месте наблюдается опережающий износ слоя футеровки и интенсивное перемешивание стали с покровным шлаком вследствие возникающего бурления.

Применение металлоприемников, обеспечивающих торможение падающей из сталеразливочного ковша струи, в настоящее время является практически обязательным элементом современного проковша. Идея создания монолитного огнеупорного изделия, выполняющего одновременно функции распределения и торможения ме-

талла в промковше, развивалась многими огнеупорными фирмами, о чем свидетельствует большое разнообразие патентов и статей. Учитывая конструкционные и технологические особенности, современные металлоприемники возможно разделить на две основные группы:

- металлоприемник типа «turbostop» (рис. 2) (гаситель турбулентности), который выполняет роль стабилизатора струи металла, падающей из сталеразливочного ковша, и обеспечивает максимальное ее торможение;
- металлоприемник типа «railtrand», сконструированный для максимальной защиты стенок и днища промковша.

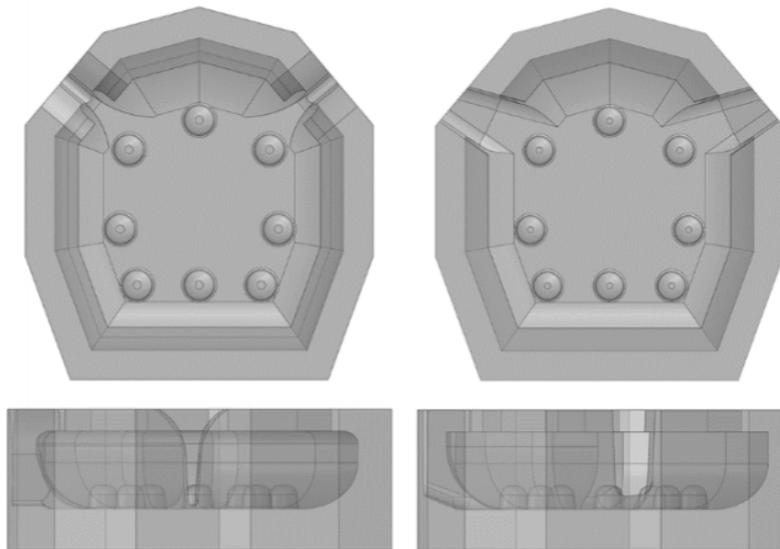


Рис. 2. Металлоприемник типа «turbostop»

Наиболее широкое распространение на практике получили конструкции металлоприемника типа «turbostop». Конструкция боковых стенок металлоприемника ограничивает поток таким образом, что он всегда принудительно направлен вверх. На практике известно достаточно много конструкций изделий типа «turbostop», отличающихся геометрической конфигурацией внутренней полости. Основные патенты на конструкцию такого металлоприемника и его применение в промковшах принадлежат фирме «Foseco». Однако достаточно близкие по сути конструкционные решения запатентованы также и некоторыми другими фирмами.

В целом многие исследователи отмечают, что эффективность работы металлоприемника типа «turbostop» зависит от рационального выбора параметров его конструкции, учитывающей специфику конфигурации конкретного промковша и условий разливки.

При длительном пребывании металла в промковше создаются благоприятные условия для выделения и всплывания неметаллических включений, перегрева стали и контроля температуры, добавки различных присадок и т. д. Особенностью конструкции фильтрационных перегородок является наличие в них определенного количества отверстий, направленных под определенным углом к зеркалу металла. При этом формируется двухуровневый многоструйный поток, в котором меньшие скорости и горизонтальное движение верхних потоков способствуют развитию зоны с благоприятными условиями для всплытия неметаллических включений.

Возможные принципы удаления неметаллических включений в промковше путем продувки аргоном можно классифицировать следующим образом: вдуваемый газ изменяет направление потока металла в промковше и направляет неметаллические включения к слою шлака; увеличение турбулентности способствует коагуляции неметаллических частиц; неметаллические включения адсорбируются пузырьками аргона.

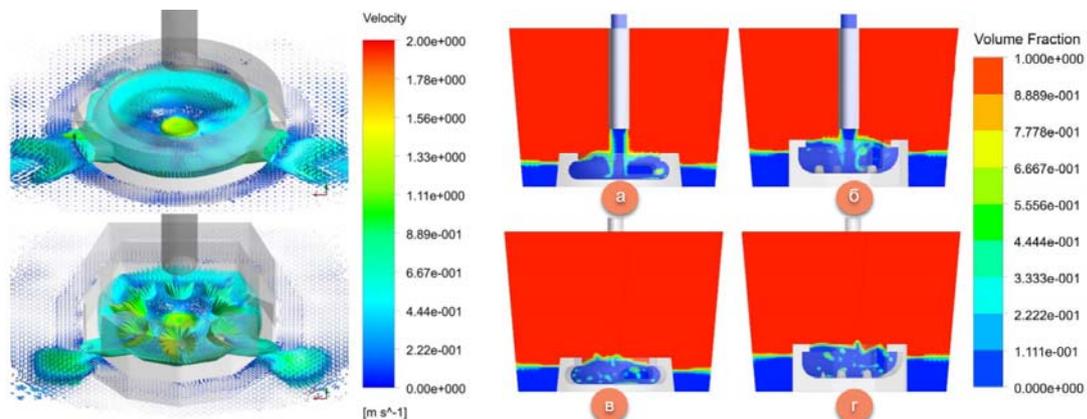


Рис. 3. Моделирование конструкции гасителя турбулентности с измененными характеристиками

Математическое моделирование с помощью компьютера (рис. 3) позволяет получить общую картину всего течения жидкости в объеме и графически визуализировать поля скоростей, давлений или температур во всей области течения. В то время как при физическом моделировании измерительные датчики располагаются в нескольких точках, где предполагается развитие исследуемых явлений.

Литература

1. Емельянов, В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок : учеб. пособие для вузов / В. А. Емельянов. – М. : Metallurgy, 1988. – 143 с.
2. Flow and temperature fields in slab continuous casting molds / Zhang Yin [et al.] / J. Univ. Sci. And Technol. Beijing. – 2000. – Vol. 7, № 2. – С. 103–106.
3. Хорбах, У. Литье сортовых заготовок с высокой скоростью через кристаллизатор параболического профиля / У. Хорбах, Й. Коккентидт, В. Юнг // МРТ. – 1999. – С. 42–51.

ВЕЛИЧИНА ПРОГНОЗНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОБРЫВНОСТИ МЕТАЛЛОКОРДА ПРИ СВИВКЕ

В. А. Петрусевич

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Металлокорд используется как армирующий элемент в конструкции автомобильной шины. Основные технологические этапы производства металлокорда: сталеплавильное производство непрерывно литой заготовки, прокатное производство катанки из непрерывно литой заготовки, волочильное производство тонкой стальной латунированной проволоки из катанки, свивка металлокорда из тонкой проволоки. Тонкое латунное покрытие (3–5 мкм) на стальной проволоке обеспечивает рост адгезии резины к металлокорду в шине. Свивка металлокорда заключается в непрерыв-

ном плетении на канатной машине нескольких тонких стальных проволок диаметром 0,15–0,75 мм из высокоуглеродистой стали 70–93. Прочность проволоки находится в пределах 3000–4000 Па. Вследствие высокой прочности и, соответственно, низкой пластичности часто возникают обрывы проволок непосредственно в процессе их свивки в металлокорд на канатной машине. Обрыв хотя бы одной проволоки при свивке приводит к остановке процесса свивки, к сварке места разрыва и к новому запуску процесса свивки на канатной машине. Частота обрывов на производстве оценивается относительной обрывностью, которая измеряется в количестве обрывов на одну тонну металлокордной продукции, обр/т. Чем ниже величина относительной обрывности, тем эффективнее производство. Максимальная величина относительной обрывности соответствует условию, при превышении которой производство уже не эффективно и должно быть остановлено.

Анализ причин разрушения на производстве показал, что основная причина разрушения проволоки при свивке связана с дефектообразованием в стали, связанном с пластической деформацией проволоки: осевые трещины, сужение, расслой, поверхностные дефекты как концентраторы зарождения трещин.

Для снижения обрывности необходимо определены основные параметры свивки, оказывающие влияние на обрывность и их количественное влияние относительной обрывности металлокорда.

Разработана зависимость для расчета величины или численного критерия относительной обрывности металлокорда, позволяющей прогнозировать величину относительной обрывности перед началом производства или снижать эту величину в действующем производстве металлокорда:

$$B = \frac{E\varepsilon_{св}}{\sigma_{в}\delta} \cdot \frac{K_{констр}K_C K_V}{K_N}, \text{ обр/т,}$$

где E – модуль упругости Юнга тонкой проволоки, Па; $\varepsilon_{св}$ – максимальная эквивалентная деформация проволоки в процессе свивки, %; $\sigma_{в}$ – предел прочности при растяжении тонкой проволоки, Па; δ – относительное удлинение тонкой проволоки при растяжении, %; $K_{констр}$ – коэффициент, учитывающий конструкцию металлокорда; K_C – коэффициент, учитывающий влияние содержания углерода в стали проволоки на обрывность м/корда при свивке; K_V – коэффициент, характеризующий влияние скорости тонкого волочения на обрывность проволоки при свивке в металлокорд; K_N – коэффициент, учитывающий программу выпуска металлокорда.

Для проверки адекватности зависимости выполнена сверка фактических и расчетных значений относительной обрывности:

1. Период наработки металлокорда 2+2x0,30SHT: 07.03.2019–12.03.2019. Средние значения механических свойств тонкой проволоки, полученные из 20 результатов испытаний на разрыв тонкой проволоки в течение периода изготовления м/корда: $E = 193653$ МПа, $\sigma_{в} = 3345$ МПа, $\delta = 2,64$ %, объем выпуска $N = 44,564$ т, сталь 80. Фактическое значение относительной обрывности 7,1 обр/т, расчетное значение 8 обр/т.

2. Период наработки металлокорда 2x0,30HT: 01.06.2019–5.06.2019. Средние значения механических свойств тонкой проволоки, полученные из 20 результатов испытаний на разрыв тонкой проволоки в течении периода изготовления м/корда: $E = 191628$ МПа, $\sigma_{в} = 3177$ МПа, $\delta = 2,54$ %, объем выпуска $N = 102,365$ т, сталь 80.

Фактическое значение относительной обрывности 10,1 обр/т, расчетное значение 11,7 обр/т.

3. Период наработки металлокорда 2x0,30UT: 31.01.2018–30.03.2018. Средние значения механических свойств тонкой проволоки, полученные из 20 результатов испытаний на разрыв тонкой проволоки в течение периода изготовления м/корда: $E = 184742$ МПа, $\sigma_b = 3628$ МПа, $\delta = 2,55$ %, объем выпуска $N = 22,096$ т, скорость тонкого волочения 5 м/с, $\varepsilon_{св} = 2,19$, сталь 80. Фактическое значение относительной обрывности 24,75 обр/т, расчетное значение 23,87 обр/т.

Сравнительная характеристика расчетных и фактических величин относительной обрывности показывает на достаточную адекватность полученной зависимости, позволяющую ее использовать в производственных условиях.

OPTIMIZATION OF THE QUALITY OF LARGE STEEL CASTINGS BASED ON COMPLEX NUMERICAL MODELING OF CASTING TECHNOLOGICAL PROCESSES

Атниша Махмуд Омар Ахмед

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

Научные руководители: И. Б. Одарченко, В. А. Жаранов

This work summarizes the findings of multi-objective optimization of a gravity sand-cast steel part for which an increase of casting yield via riser optimization was considered. This was accomplished by coupling a casting simulation software package with an optimization module [1]–[3]. The benefits of this approach, recently adopted in the foundry industry worldwide and based on fully automated computer optimization, were demonstrated. First, analyses of filling and solidification of the original casting design were conducted in the standard simulation environment to determine potential flaws and inadequacies. Based on the initial assessment, the gating system was redesigned and the chills rearranged to improve the solidification pattern. After these two cases were evaluated, the adequate optimization targets and constraints were defined. One multi-objective optimization case with conflicting objectives was considered in which minimization of the riser volume together with minimization of shrinkage porosity and limitation of centerline porosity were performed.

Metalcasting process simulation is used to provide detailed information about mold filling, solidification and solid state cooling, as well as, information about the local microstructure, non-uniform distribution of mechanical properties and subsequently residual stress and distortion build-up. Casting simulation tries to use physically realistic models without overtaxing the computer. At the same time the simulations need to give applicable results in the shortest time possible. Unfortunately, numerical simulations can only test one “state”, while conclusions from calculations or subsequent optimization still require an engineer’s interpretation and decision after each of the simulation runs. Understanding the process enables a foundry engineer to make decisions that can affect both the part and the rigging to improve the final quality.

The objectives which drive designers are generally well defined: improve the component quality, achieve homogeneous mechanical characteristics, maximize the casting yield, increase the production rates, etc. It may sound easy, but the truth is that in reality it is very complex and time consuming to achieve all these objectives at the same time, due to the high number of variables involved. In many foundries, the only applied

optimization is still based on experience and thus on the trial-and-error method. When using numerical simulation, only a virtual casting is spoiled, in the case of an error. No raw material is wasted, no mould is produced and, above all, no production loss is experienced.

Recently, rapid development of high performance computing has substantially shortened the calculation time needed for one variant of the casting process to be analyzed. It is feasible to calculate numerous versions and layouts in almost unlimited configurations over night. The advantage of having such short calculation times can only be utilized with a computer that can automatically analyze calculated variants with respect to the predefined objectives (e. g. maximum feeding, low porosity, low air entrapment etc.) and subsequently create new variants and analyze them in the same manner to achieve the optimal solution.

This paper details multi-objective optimization of filling and solidification patterns, together with the riser volume of a steel forging ram (Fig. 1) cast into a furan sand mould, and presents the results obtained from the study.

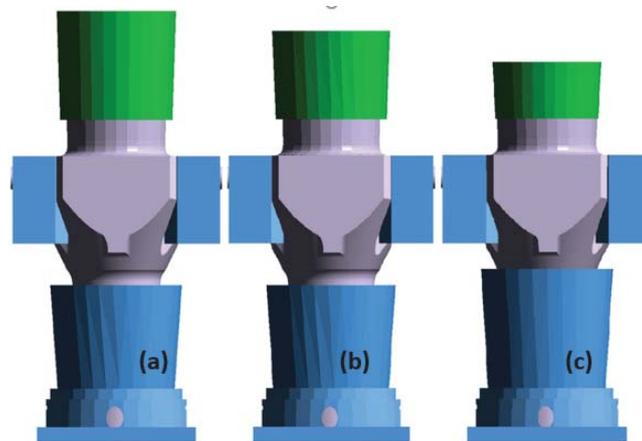


Fig. 1. Design space with the highlighted Pareto set

Before the optimization process can be started, a standard project must be defined in the simulation software environment. This includes a definition of geometry in the pre-processor. Furthermore, a suitable mesh must be generated and all relevant process parameters adequately defined. The optimization itself is based on performing a large sequence of “standard” calculations, each with different design variants. Therefore all design variables must be defined in a parametric way.

A multi-objective optimization problem (Fig. 2) in the gravity sand casting process of a forging ram is presented. The objectives for this case study are the following: minimize the top riser volume, minimize shrinkage porosity, and limit centerline porosity, by means of an optimized arrangement of the chills.

Most engineering design activities require a solution of multi-objective and multi-disciplinary optimization problems that in many cases deal with conflicting objectives. When considering these objectives, a number of alternative trade-off solutions, referred to as Pareto-optimal solutions, have to be evaluated. None of these Pareto designs can be said to be better than the other without any additional information about the problem under consideration. In order to define the Pareto set, one has to apply the concept of domination, which allows comparing solutions with multiple objectives (Fig. 3).

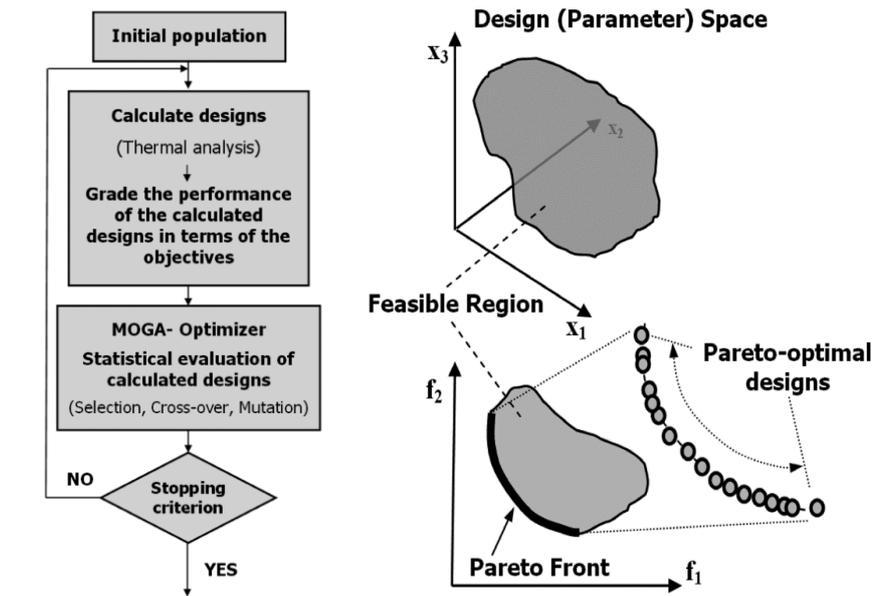


Fig. 2. Flow chart of the optimization process

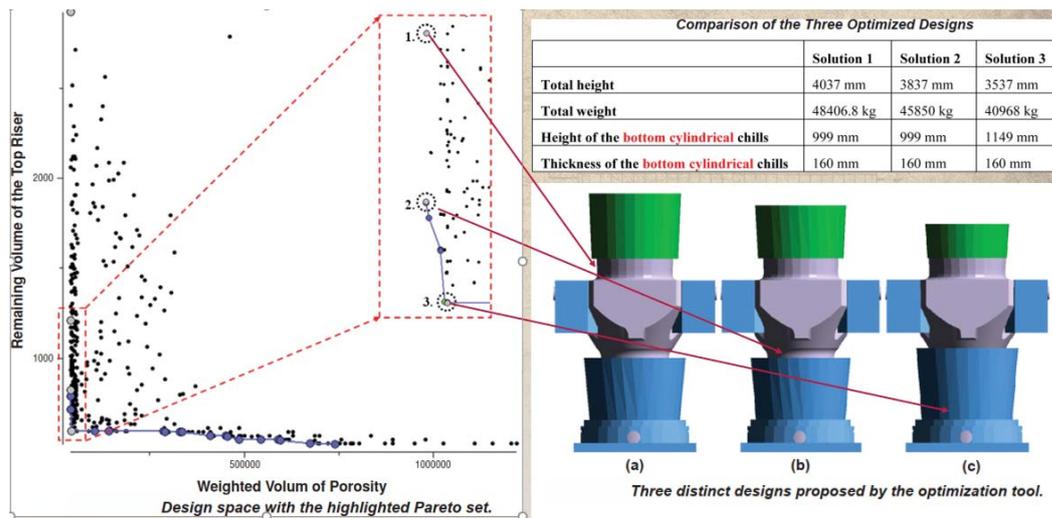


Fig. 3. A study of a multi-objective optimization problem that has been carried out for a steel forging ram

The manually optimized solution served as a model for optimizing riser and cooler geometry. In the case of multipurpose optimization, the riser and cooler dimensions were applied as design variables along with the ranges of variation. In addition, optimization goals were introduced into the optimizer along with potential constraints, as well as the number of initial projects and generations in which optimal solutions should be found. Three different solutions were chosen from the design space. The first option was a humble approach (relatively large riser), the middle one was still a safe solution, but the riser was much smaller, and the third solution was a very risky solution with the highest casting yield. It turned out that all three designs gave different curing patterns compared to the original design. This was due to the change in the dimensions of the riser and the rearrangement of the hills. No puddles of residual liquid were found; however, the third

solution showed some indications of potential problems. In terms of macro and micro shrinkage in optimized designs, the only areas of concern were the riser head and bottom pins. The casting appeared to be devoid of porosity. In the end, together with the foundry, it was decided not to consider the latter solution for production due to the high risk of production disruption. In other words, taking into account the human factor, the risk of porosity propagation from the riser to the casting body is too high. Finally, the results concerning the casting yield showed that, when used correctly, multi-purpose optimization can significantly increase the casting yield and thus reduce production costs.

References

1. On Modelling of Microstructure Formation, Local Mechanical Properties and Stress-Strain Development in Aluminium Castings, Proc. Int. Conf. On Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, MCWASP XII / I. L. Svensson [et al.]. – Vancouver BC, Canada, 2009. – P. 129–136.
2. Hattel, J. H. Fundamentals of Numerical Modelling of Casting Processes, 1st ed., Kgs. Lyngby: Polyteknisk Forlag, 2005.
3. Kokot, V. Integration and Application of Optimization Algorithms with Casting Process Simulation, Proc. Int. Conf. On Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, MCWASP X / V. Kokot, P. Bernbeck. – Destin, Florida. – may, 2003. – P. 487–494.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ДЕФОРМАЦИИ СЛИТКА НА СТРУКТУРУ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

В. С. Путеев

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Одним из важнейших составляющих практически всех механизмов являются подшипники, изготавливаемые из подшипниковых марок сталей. В сталеплавильном производстве основные эксплуатационные характеристики изделий из подшипниковых сталей определяют центральная пористость, подсадочная ликвация, развитие и образование карбидной ликвации при производстве непрерывно литой заготовки (НЛЗ). Для изготовления подшипников наибольшее распространение получила высокоуглеродистая хромистая сталь (~ 1,05 % углерода, 0,4–0,5 % хрома), преимущественно используемая во всем мире. В шарикоподшипниковых сталях считается недопустимым наличие центральной пористости с баллом выше 2,0, что служит основанием для забракования всех партий прутков, соответствующих контролируемому образцу. Поскольку в данной стали требуется высокая однородность физико-химических свойств, то присутствие в ней ликвационных дефектов также ограничивается, ликвация с баллом 2,0 считается недопустимой. Снижение балла карбидной неоднородности особенно актуально для производства подшипниковой стали методом непрерывной разливки.

Целью работы является анализ применения режимов мягкого обжата на образование и развитие карбидной неоднородности в процессе разливки подшипниковой стали на машине непрерывного литья заготовки (МНЛЗ).

Непрерывнолитые заготовки в сравнении со слитком отлитым в изложницу характеризуются мелкодендритной структурой, менее развитой химической неоднородностью, более равномерным распределением неметаллических включений и газов. Однако проблема структурной, химической, физической неоднородности в заготовках непрерывной разливки все еще является открытым вопросом.

В течение последних десятилетий накоплен обширный опыт по использованию внешних динамических воздействий на затвердевающие слитки и непрерывнолитые заготовки. К числу методов внешних воздействий, прошедших промышленные или опытные испытания, можно отнести следующий метод «мягкого» обжатия в конце периода затвердевания.

Например, экспериментальные исследования на заводе «Сандвик Стил» (Швеция) выполнены для нержавеющей хромоникелемолибденовой стали (с ультранизким содержанием углерода), разливаемой на блюмы сечением 265×265 мм или 265×265 мм на криволинейной МНЛЗ. Скорость движения заготовки изменялась в пределах 0,81–0,89 м/мин, а общая величина обжатия – 4–7,1 мм. Обжатие осуществляли тремя парами роликов, расположенными на расстоянии 17,7, 19,8 и 22 мм от мениска. Установлено, что для выполненных экспериментов существуют определенные оптимальные значения величины обжатия и скорости вытяжки, обеспечивающие максимальное снижение осевой пористости (в 1,5–3 раза по разным шкалам). По существу эти результаты подтверждают тот факт, что определяющим моментом с точки зрения эффективности метода динамического «мягкого» обжатия на подавление осевой пористости является взаимное положение границы жидкой лунки и места приложения обжатия.

На заводе «Чита Плант» (Япония) выполнены комплексные исследования по изучению влияния динамического «мягкого» обжатия круглых заготовок диаметром 350 мм из подшипниковой стали. При этом исследования проводились для вертикальной МНЛЗ при скорости разлива на уровне 0,40–0,65 м/мин, а обжатие осуществляли с помощью специальных роликов. В ходе исследований оценивали углеродную ликвацию, угол раскрытия V-образной ликвации, макроструктуру, внутренние трещины как в литом металле, так и прокатанной сортовой заготовке. Установлено, что «мягкое» обжатие круглой заготовки практически полностью подавляет осевую углеродную ликвацию: увеличение содержания углерода в центре заготовки составляет 0,05–0,07 %, в то время как в заготовке без «мягкого» обжатия оно составило 0,25–0,35 %.

Основным условием достижения высоких положительных результатов авторы считают обеспечение доли твердой фазы на уровне 0,40–0,45 в зоне начала обжатия при величине обжатия 1,6 % от диаметра. Увеличение доли твердой фазы свыше указанных пределов приводит к снижению эффекта подавления ликвации. Уменьшение доли твердой фазы менее 0,4 характеризуется формированием внутренних трещин. Что же касается поведения V-образной ликвации при «мягком» обжатии, то однозначно подтвержден факт ее некоторого подавления при увеличении угла раскрытия на 10–15°.

Положительные результаты по подавлению осевой ликвации при использовании метода «мягкого» обжатия получены также и на заводе «СОЛЛАК» (Франция) при разливке блюмов сечением 260×320 мм из углеродистой стали.

В настоящее время на нескольких металлургических заводах Японии и Германии используется следующая модифицированная схема «мягкого» обжатия блюмов. Для создания благоприятных условий для приложения усилия и контроля степени обжатия на больших гранях заготовки предусматриваются специальные трапецеидальные приливы толщиной 5–12 мм. Эти приливы затем вдавливаются в заготовку в два или три этапа. Вместе с тем такая схема предполагает изменение геометрической формы кристаллизатора, а также геометрических размеров приливов в зависимости от места приложения обжатия, марки стали, условий охлаждения заготовки, места положения лунки жидкой фазы и пр. Альтернативным вариантом реализации этого метода на практике является использование в зоне «мягкого» обжатия валков с длиной бочки меньшей, чем длина грани непрерывного слитка. Например, на заводе «Ниппон

коккан» (Япония) для «мягкого» обжатия заготовки сечением 400×520 мм использовали валки с длиной бочки 250–300 мм, что позволило ослабить ликвацию и исключить появление внутренних трещин.

Таким образом, рассмотренные практические данные относительно эффективности метода динамического «мягкого» обжатия непрерывнолитых заготовок свидетельствуют о перспективности его применения для влияния на свойства стали при непрерывной разливке.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОРА НА СВОЙСТВА КАТАНКИ

А. И. Пости

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

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Рассмотрены основные факторы, влияющие на прокаливаемость стали марки 20Г2Р после закалки и охлаждения в масле. Определены химические элементы, а также их процентное содержание в стали, позволяющие достичь необходимого уровня механических свойств в соответствии с требованиями различных потребителей. Приведены основополагающие факторы процесса прокатки, влияющие на формирование микроструктуры, которая, в свою очередь, также позволяет увеличить фактические значения механических свойств, в частности твердости, после закалки и охлаждения в масле.

Применение борсодержащих марок сталей – это современная общемировая тенденция. Ведущие заводы, выпускающие крепеж высоких классов прочности (8.8, 10.9), используют преимущественно борсодержащую сталь. Высокопрочный крепеж, производимый для автомобильной промышленности, выпускается в основном из борсодержащих марок сталей 20Г2Р, 30Г1Р, которые отличаются повышенной прокаливаемостью, что обеспечивает стабильные механические свойства при ее закалке в воде, масле. Высокая прокаливаемость достигается благодаря микролегированию бором и легированию марганцем.

Содержание мартенсита в микроструктуре стали после закалки обеспечивает высокую твердость за счет высокой скорости охлаждения и наличия свободного бора в структуре. У доэвтектоидной стали 20Г2Р кроме ряда преимуществ существуют и технологические трудности. К ним относится необходимость предотвращения связывания бора в нитриды при выплавке стали, так как на прокаливаемость стали оказывает влияние не весь присутствующий в стали бор, а только «эффективный» (твердорастворимый, не связанный в нитриды). Нарушение этого условия приводит к нестабильности их свойств и низкому качеству проката из-за невозможности получения необходимой твердости после закаливания.

Основным элементом, оказывающим ключевое влияние на величину «эффективного» бора, является азот. Образования нитридов бора в этом случае следует избегать, для чего в металл вводится титан, который обладает большим сродством к азоту, чем бор, и также образует нитриды в жидкой фазе. Обычно при выплавке стали с микродобавкой бора вводят титана в 4–5 раз больше (в виде ферротитана), чем содержание азота в стали, учитывая отношение атомных весов титана и азота, а также степень усвоения титана. Количество «эффективного» бора можно спрогнозировать на основе анализа термодинамического равновесия системы Fe–Al–Ti–B–N.

Для получения «эффективного» бора 0,001 % (минимальное значение для повышения механических свойств) требуется [1]:

– введение алюминия не менее 0,030 % и титана не менее 0,015 % при содержании азота 0,008 %;

– введение алюминия не менее 0,040 % и титана не менее 0,021 % при содержании азота 0,010 %.

Полное связывание азота в нитриды типа TiN и AlN обеспечивает защиту бора от связывания его в нитриды и резко повышает характеристики прокаливаемости стали.

При разработке химического состава стали марки 20Г2Р для получения необходимых механических значений, в частности твердости HRC в центре сечения контрольного образца по ТУ-14-1-4486–88, используется метод теоретического расчета прокаливаемости стали «Jominy», тест, в котором предусмотрено определение твердости HRC на подкате (не в готовом сорте) и охлаждении в воде. В соответствии с ГОСТ 10702, стандартными спецификациями измерение твердости производится в готовом сорте на образцах закаленных и охлажденных в масле. Для того чтобы разные среды охлаждения не приводили к значительным расхождениям между теоретическим расчетом и фактическими значениями, все дальнейшие испытания, а также обработка статистических данных проводились на образцах, закаленных и отпущенных в масле [2].

В качестве примера за основу требований, предъявляемых к стали марки 20Г2Р, были взяты технические условия ТУ-14-1-4486–88, по которым производится большая часть борсодержащей катанки.

Для сравнительного анализа были выбраны несколько плавок (см. таблицу), на которых при производстве катанки диаметром 10,5 мм были получены несоответствующие требованиям ТУ-14-1-4486–88 значения прокаливаемости (HRC – 31–37) при норме не менее 37 HRC.

Фактические значения химического анализа исследуемых плавок

Номер плавки	Номер профиля	Углеродный эквивалент	Отношение
			Ti/N ₂
1	10,5	0,433	3,79
2	10,5	0,425	3,96
3	6,5	0,452	4,90
4	10,5	0,459	6,64
5	16,5	0,464	6,79

Из таблицы следует, что требования, предъявляемые к химическому составу стали марки 20Г2Р, соответствуют ТУ-14-1-4486–88.

На рис. 1 представлены результаты исследования на растровом электронном микроскопе состава включений по границам аустенитного зерна и в зерне. На исследуемых плавках недостаточное содержание титана, а следовательно, и отношения Ti/N₂ не менее 4 в совокупности с длительным временем выдержки металла между присадкой бора и началом разливки, привело к величине «эффективного бора», недостаточной для обеспечения требуемого уровня твердости после закалки. Часть бора, в свою очередь, перешла в оксиды, нитриды и другие соединения и не находилась в твердом растворе аустенита. Борсодержащие включения выявлены в центре аустенитных зерен, т. е. они являлись центрами кристаллизации металла.

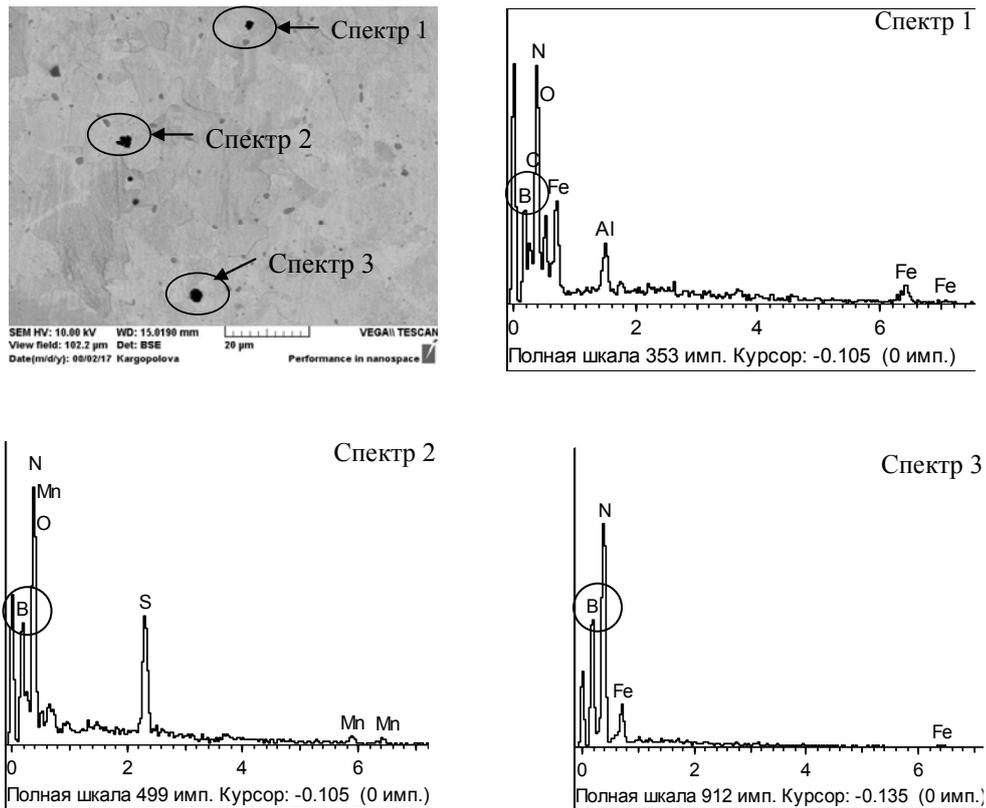


Рис. 1. Результаты исследования на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором состава включений по границам аустенитного зерна и в зерне

Были проведены корректировки химического состава в сторону незначительного увеличения элементов, которые основным образом влияют на прокаливаемость стали (C, Mn, Cr (см. таблицу), номера плавков 3–5). Также было установлено соотношение Ti/N_2 не менее 4. После этого были получены положительные результаты испытаний по определению твердости после закалки, и составили они 40–43 HRC (рис. 1).

Одним из самых больших профилей марки стали 20Г2Р, который производится в рамках ОАО «БМЗ» стана 370/150, является 16,5 мм. Существует зависимость: чем больше профиль (при одинаковом химическом составе), тем сложнее получить на нем сквозную прокатку, а соответственно, и требуемую твердость. Поэтому как видно из таблицы, для диаметра катанки 16,5 мм по сравнению с более мелкими профилями и соотношение Ti/N_2 составляет 6,79, что, в свою очередь, позволяет обеспечить необходимый уровень механических свойств в соответствии с ТУ-14-1-4486–88.

Литература

1. Потапов, А. И. Исследование процессов микролегирования стали бором с целью совершенствования технологии производства борсодержащей стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. И. Потапов. – М., 2013. – 116 с.
2. Барадынцева, Е. П. Влияние микролегирования бором на прокаливаемость сталей / Е. П. Барадынцева, Н. А. Глазунова, О. В. Роговцова // Литье и металлургия. – 2016. – № 3. – С. 70–74.

СЕКЦИЯ III ЭНЕРГЕТИКА

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И ТЕРМОСИФОННЫХ СИСТЕМ

К. А. Светличный

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

Научный руководитель А. В. Шаповалов

При решении вопросов создания комфортных условий в теплый период года, как правило, применяют парокомпрессионные холодильные машины (ПКХМ). Их широкое распространение обусловлено следующими причинами: доступное и бесперебойное электроснабжение, широкий ряд предлагаемого оборудования и др. Однако, несмотря на все преимущества, ПКХМ имеют существенный минус в виде высоких затрат на электроэнергию.

Решением данной проблемы является использование холодильных машин, работающих по абсорбционному циклу, источником энергии для которых является солнечная радиация.

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. 1 [1].

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.

Солнечные системы нагрева теплоносителя позволяют обеспечить его температуры в достаточно широком диапазоне. Более высокие температуры теплоносителя могут быть достигнуты в сложных конструкциях с большой площадью приемников солнечных лучей, с их концентраторами и т. д. Это существенно удорожает стоимость оборудования для нагрева теплоносителя. Схемы нагрева с аккумуляторами теплоносителя создают возможность работы гелиохолодильных машин в течение времени, превышающем световой день или даже круглосуточно. В данном случае при более низкой температуре теплоносителя холодильная машина может работать большую продолжительность времени.

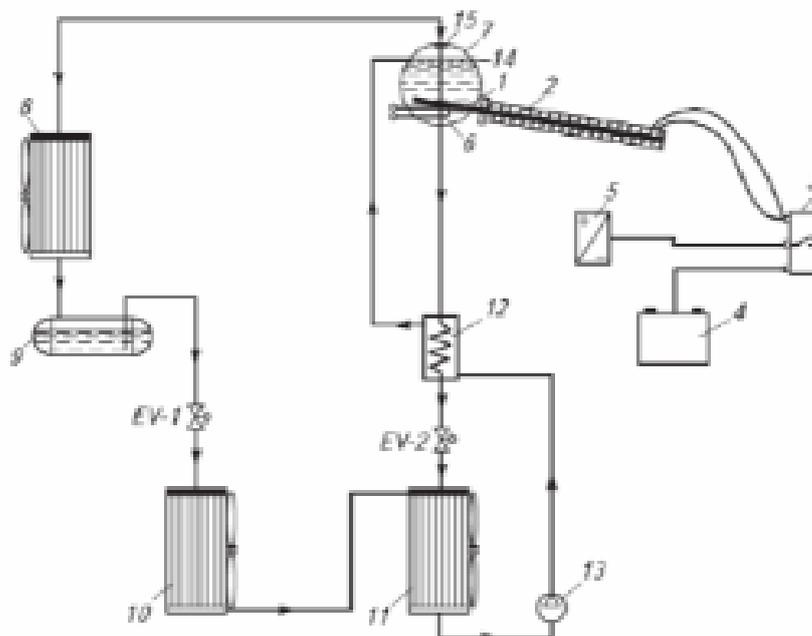


Рис. 1. Принципиальная схема холодильной установки с использованием солнечной энергии [1]:

- 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

Анализ типов солнечных коллекторов показал, что наибольшим КПД обладают коллектора, работающие по принципу термосифонов.

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.

Исходя из расчетов абсорбционной холодильной машины, была получена необходимая площадь гелиополя для отпуски теплоты на генератор АБХМ в количестве 600 кВт, которая составила 110 м². Холодопроизводительность АБХМ при подводе этого количества тепла составила $Q_0 = 426,47$ кВт. Из этого можно сделать вывод о том, что АБХМ, работающие на солнечной энергии, являются эффективными.

В [1] описано применение термосифона, встроенного в бак аккумулятора, это позволяет сделать предложение об установке термосифона в генератор АБХМ с целью улучшенной циркуляции раствора.

Рис. 2 характеризует динамику разогрева воды в баке-теплоаккумуляторе (БТА) в обычном варианте системы солнечного горячего водоснабжения (ССГВ) (А) и с термосифоном БТА (Б). Показано распределение температур в течение дня для сравниваемых решений ССГВ. Видно, что второе решение позволяет получать в самом начале работы гелиосистемы (в утренние часы эксплуатации) небольшое количество

горячей воды, с температурой 40°C , которая дислоцируется в верхней части БТА, что расширяет «продуктовый» период эксплуатации ССГВ в целом, не ожидая прогрева всего количества воды в БТА. То есть ССГВ, запущенная со свежей водой, обеспечивает возможность разбора горячей воды уже в 10:00, а не в 14:00, как было бы в случае обычного бака-теплоаккумулятора.

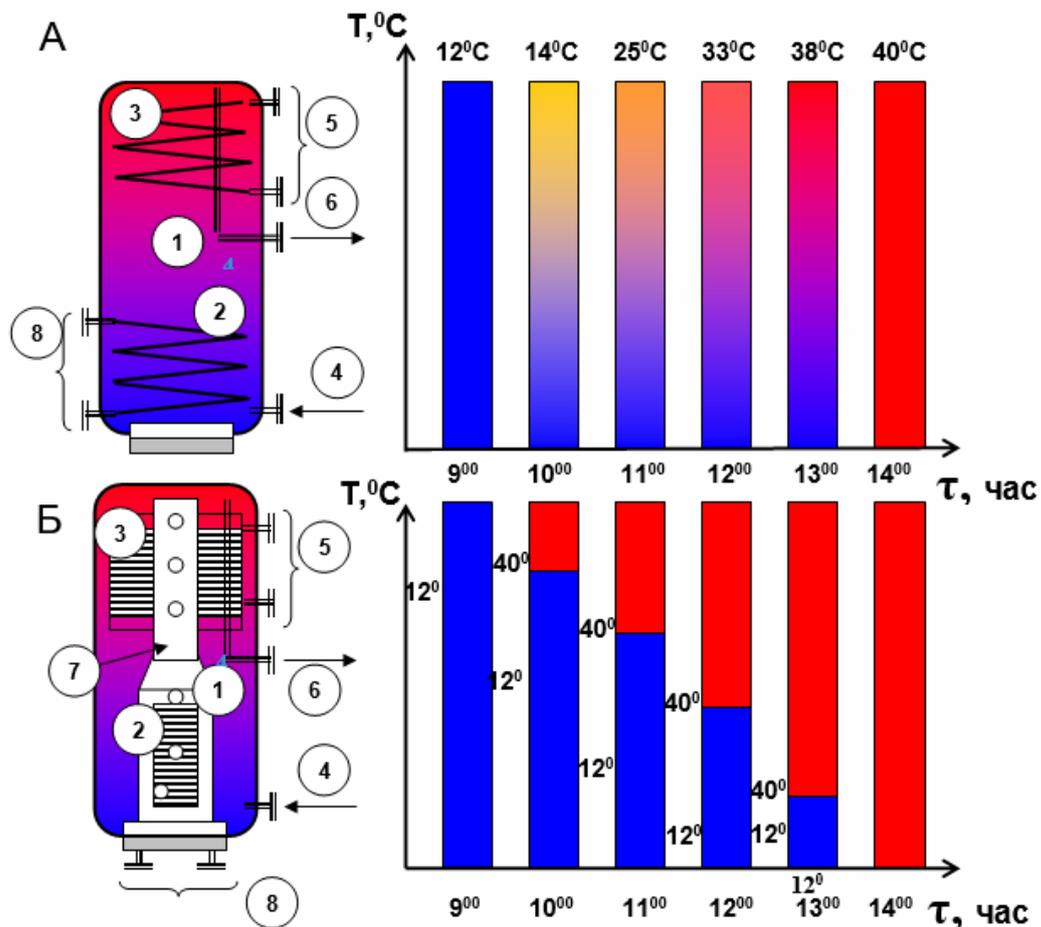


Рис. 2. Динамика прогрева воды в баке-теплоаккумуляторе гелиосистемы: А – БТА с двумя теплообменниками; Б – БТА с термосифоном фирмы «SOLAR DIAMANT» (Германия); 1 – БТА; 2, 3 – теплообменники, 4 – подпитка холодной воды; 5 – дополнительный источник нагрева; 6 – горячая вода; 7 – термосифон; 8 – теплоноситель от гелиосистемы

Литература

1. Горин, А. Н. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха / А. Н. Горин, А. В. Дорошенко. – Донецк : Норд-Пресс, 2006. – 341 с.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОТОПИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Е. В. Кацуба

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

Научный руководитель А. В. Шаповалов

Внеплановые затраты государства на ликвидацию последствий неэффективной работы теплоснабжающих организаций исчисляются десятками миллионов рублей и несоизмеримо большей инвестицией в энергосберегающие мероприятия. Необходимо отметить, что региональные энергосистемы загружены крайне неравномерно. В дневное время – пиковые нагрузки, вынуждающие вводить ограничения по потреблению электроэнергии, в ночное – провалы по мощности, неостребованная электроэнергия и опять потери.

Сегодня региональные энергетические комиссии пытаются решить проблему выравнивания нагрузок на энергосистему введением дифференцированных по времени суток тарифов. Это нормальный цивилизованный путь к энергосбережению, основанный на рыночных принципах. Низкий тариф действует с 23:00 до 07:00 часов, в остальное время – обычный. Разница в тарифах составляет от 2,5 до 8 раз в зависимости от группы потребителей и региона, в котором они находятся. У этой двухтарифной системы оплаты электроэнергии есть одна особенность – юридические лица могут применять ее в расчетах с энергоснабжающей организацией только по электроэнергии, используемой на цели отопления.

Теплонакопитель – это электрический аккумуляционный обогреватель с диапазоном мощностей от 2 до 7,5 кВт. Этот прибор устанавливается непосредственно в помещение, накапливает во время действия низкого тарифа на электроэнергию тепло и отдает его круглосуточно с помощью встроенного вентилятора, управляемого датчиком комнатной температуры.

На Западе инициатором такого способа отопления выступили 25 лет назад энергоснабжающие организации. И до настоящего времени они выступают в качестве основных сбытовых и монтажных организаций, дополнительно предоставляя потребителям целый ряд скидок и льгот.

Широкое применение приборов накопительного типа позволяет выравнивать характеристики систем электроснабжения по времени суток, избежать пиковых перегрузок в дневные часы максимального потребления, загрузить мощности в ночное время, в момент минимума нагрузки, а значит не выбрасывать произведенную электроэнергию на ветер.

В конечном итоге это позволяет снизить количество отказов оборудования, аварийных ситуаций, увеличить срок службы оборудования, повысить надежность систем отопления.

Применение электрических отопительных приборов позволит решить проблемы, связанные с отоплением, всем заинтересованным сторонам.

1. С помощью теплонакопителей можно покрыть существующий дефицит тепла без ввода новых мощностей. Поэтому вполне логично перенести тяжесть обеспечения теплом с централизованного отопления на электрообогрев в ночное время

2. С помощью теплонакопителей можно сделать существующую систему отопления более регулируемой. Возможна установка теплонакопителей как дополнительного источника тепла. Благодаря современной системе регулировки, теплонако-

питель автоматически поддерживает заданную температуру в помещении, не допуская перетопов и недотопов. В межсезонье возможно отопление помещений только теплонакопителями, тем самым сокращая время отопительного сезона.

3. Применение теплонакопителей позволит получить резервный источник теплоснабжения. В связи с реконструкцией котельных и переходом на наиболее дешевый вид топлива – природный газ, в некоторых городах сложилась ситуация, в которой более 70 % теплоисточников ориентированы на один вид топлива. Использование теплонакопителей позволит пережить аварийные ситуации как на теплоцентралях и газовых магистралях, так и на электросетях.

4. Применение теплонакопителей позволит решить проблемы отопления в городских районах, перенасыщенных коммуникациями. В Минске тормозится застройка центральной части города из-за недостатка, в первую очередь, мощностей по теплу и из-за невозможности строительства в этой части города новых теплотрасс. В Санкт-Петербурге остро стоит проблема отопления центральной исторической части города, которой также не хватает тепловых мощностей, а прокладка новых теплотрасс нежелательна потому, что это историческая часть города. По этой же причине нежелательно использование автономных газовых котельных. Прокладка кабеля несоизмеримо более дешевое и щадящее город мероприятие.

5. Применение теплонакопителей позволит решить проблемы отопления в городских районах, удаленных от источника тепла. Коттеджные поселки, новостройки, удаленные складские и прочие помещения отапливаются либо прокладкой теплотрасс с плечом в несколько километров и огромными теплопотерями, либо прокладкой газопроводов. В отсутствие газа рентабельной альтернативы электрообогреву в этих случаях нет. А если электрообогрев, то почему не теплонакопители, работающие на низком тарифе и не загружающие энергетиков в часы пиковых нагрузок?

6. Применение теплонакопителей позволит решить часть экологических проблем. Старые муниципальные котельные с выработанным ресурсом, работающие на угле или мазуте, загрязняющие наши и без этого неблагоприятные в экологическом отношении города. Найти достойную замену этим теплоисточникам – мечта каждого руководителя городского или районного хозяйства. Дешевле поставить дополнительные ТП и перейти на электрообогрев, чем содержать эти котельные и продолжать загрязнение наших городов.

7. Применение теплонакопителей позволит снизить социальную напряженность. Температурный режим в больницах, школах и детсадах порой не выдерживает никакой критики. Болеют дети, родители уходят на больничные, больные помимо основного заболевания получают дополнительные болячки, вызванные переохлаждением. Практически в каждой из перечисленных организаций используются электрические обогреватели для догрева помещений. Их использование помимо прочего приводит к сверхнормативному потреблению электроэнергии, увеличивая затратную часть бюджета и задолженность перед энергетиками.

8. Применение теплонакопителей позволит уменьшить затратную часть бюджета: затраты на отопление бюджетных организаций, затраты на электроэнергию бюджетных организаций, дотации населению на оплату тепла.

Целесообразность использования электрических отопительных приборов будет определяться путем сравнения традиционного водяного отопления и электрического посредством технико-экономических показателей.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА СОВРЕМЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. О. Пырх

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

Научный руководитель А. В. Шаповалов

Для обеспечения экономической стабильности государства одним из значимых процессов является повышение уровня энергоэффективности. Это возможно только путем сочетания работ, связанных с обеспечением энергетической эффективности энергосбережения в зданиях и системах теплоснабжения зданий.

Изучение и решение проблем энергосбережения, возникшие при строительстве современных зданий, стали мощным импульсом к рассмотрению проблем микроклимата и климатизации здания.

Мероприятия по энергосбережению могут быть разными. Один из самых действенных способов увеличения эффективности использования энергии – применение современных технологий энергосбережения, так как они не только дают значительное уменьшение расходов на энергетические затраты, но и имеют очевидные плюсы.

При проектировании энергоэффективного здания следует рассматривать две не зависящие друг от друга энергетические подсистемы:

- наружный климат как источник энергии;
- здание как единую энергетическую систему.

Направлениями энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования могут быть организационные мероприятия по использованию тепла и внедрению энергосберегающих технических средств.

1. Периодический режим работы. Периодический режим работы системы отопления применяется в зданиях, используемых для работы неполные сутки и дни недели, в которых допускается снижение температуры внутри помещений в нерабочее время. В суточном цикле работы системы отопления можно выделить три характерных периода:

- основной рабочий режим, когда в помещении поддерживаются номинальные параметры температуры и влажности;
- дежурный режим, когда после основного режима система отопления поддерживает в помещении пониженную температуру;
- режим форсированного нагрева помещения, в течение которого система отопления переводится на быстрый разогрев помещения после охлаждения.

В помещениях наблюдается и недельный цикл, когда в выходные и праздничные дни в течение полных суток может поддерживаться дежурный режим отопления и сниженная температура в помещении. Для поддержания дежурного режима используется водяное отопление, которое выполняет функцию поддержания минимального уровня температуры.

Наиболее гибким режимом эксплуатации служит комбинированная система отопления. Она состоит из базовой системы водяного отопления и дополнительной системы воздушного отопления. Воздушное отопление совмещается с приточной вентиляцией и в режиме форсированного нагрева работает в режиме полной рециркуляции воздуха.

Работа систем периодического отопления поддается автоматизации и программному управлению поддержания необходимого температурного режима. На

случай резкого понижения температуры наружного воздуха в помещениях устанавливаются датчики температуры внутреннего воздуха. По сигналу от них включается система отопления в форсированном режиме.

2. Отопление помещений теплотой рециркуляционного воздуха. Отопление помещений теплотой рециркуляционного воздуха может использоваться для его нагрева. Нагретый воздух забирается из верхней зоны помещения, фильтрами очищается от пыли, влаги и вредных газов и по воздуховодам нагнетается обратно в помещение или в теплообменник, через который содержащаяся в воздухе теплота подается в отопительную систему. Энергосбережение обеспечивается за счет утилизации теплоты удаляемого воздуха.

Теплоту рециркуляционного воздуха рекомендуется использовать для производств, в которых допускается рециркуляция воздуха, а также при температуре воздуха в верхней зоне более 30 °С и подачи воздуха на расстояние не более 15 м.

3. Системы воздушного отопления. Системы воздушного отопления или охлаждения применяются для комплексов, в которых функции отопления или охлаждения совмещаются с вентиляцией. В системах воздушного отопления или охлаждения возможна полная или частичная рециркуляция воздуха.

Воздух для отопления нагревается в калориферах горячей водой, паром, горячим воздухом или другим теплоносителем. Воздух для охлаждения проходит через холодильную машину. Процесс интенсификации тепломассообмена может осуществляться путем подачи нагретого воздуха по специальным каналам через воздухораспределительные решетки в помещение или камеру хранения для смешивания с внутренним воздухом или подачи нагретого или холодного воздуха во внутренние каналы, окружающие помещение, нагревая или охлаждая при этом его стенки.

Охладившийся или нагретый воздух по другим каналам возвращается в калорифер для повторного нагрева (охлаждения) или выбрасывается частично в атмосферу. Таким образом, воздушная система может быть с полной рециркуляцией, когда воздух полностью возвращается для повторного использования, или частичной, когда его часть выбрасывается в атмосферу и повторно используется. Системы воздушного отопления фактически являются комбинированными.

Энергосбережение при применении таких систем достигается и за счет автоматизации системы при малой теплоемкости воздуха, а также за счет возможного поддержания в нерабочее время в помещении более низкой температуры воздуха и его быстрого нагрева перед началом рабочего дня.

4. Периодический режим работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Периодические режимы работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха применяют для стабилизации температуры, влагосодержания и газового состава воздуха. Они наиболее эффективны при обслуживании помещений большого объема в общественных зданиях с переменным заполнением, где одновременно изменяются температура, влажность и состав воздуха (содержание углекислого газа и кислорода).

Снижение энергопотребления системами вентиляции и кондиционирования воздуха обеспечивается изменением расхода воздуха требуемых параметров, применением сложных и дорогостоящих воздухораспределителей, использованием совершенных методов регулирования работы вентилятора, сложной системы автоматизации.

5. Устройство воздушных завес. Воздушные завесы устанавливаются при входе, у открытых проемов в общественных и промышленных зданиях и сооружениях, цехах, животноводческих фермах, механических мастерских, торговых центрах, магазинах, в многоэтажных жилых зданиях с часто открывающимися входными дверями или со значительными по площади воротами. Мероприятие направлено на сни-

жение затрат теплоты на нагрев воздуха, поступающего через входы, въезды и проемы. Применяются комбинированные воздушно-тепловые завесы с тамбуром и без него, а забор воздуха осуществляется из помещения или снаружи.

Воздушная завеса состоит из двух, симметрично расположенных пар вертикальных воздухораспределительных стояков, установленных внутри помещения. Внутренняя пара стояков, расположенная ближе к помещению, подает подогретый (до 60 °С) в калориферах воздух, а наружная пара стояков подает неподогретый воздух, забираемый из помещения. При закрытых воротах наружная пара стояков отключается, а внутренняя завеса работает в режиме отопления. При открывании ворот к работе подключается и наружная пара стояков.

Энергосбережение достигается за счет снижения потребности в теплоте на нагрев приточного воздуха и затрат электроэнергии на его перемещение.

6. Применение теплонаносных установок и энергии низкого потенциала (конденсата, воздуха). Теплонаносные установки (ТНУ) используют естественную возобновляемую низкопотенциальную тепловую энергию окружающей среды (воды, воздуха, грунта) и повышают потенциал основного теплоносителя до более высокого уровня, затрачивая при этом в несколько раз меньше первичной энергии или органического топлива. Теплонаносные установки работают по термодинамическому циклу Карно, в котором рабочей жидкостью служат низкотемпературные жидкости (аммиак, фреон и др.). Перенос теплоты от источника низкого потенциала на более высокий температурный уровень осуществляется подводом механической энергии в компрессоре (парокомпрессионные ТНУ) или дополнительным подводом теплоты (в абсорбционных ТНУ).

Л и т е р а т у р а

1. Фокин, В. М. Основы энергосбережения и энергоаудита / В. М. Фокин. – М. : Машиностроение-1, 2006. – 256 с.
2. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 588 с.
3. Справочник проектировщика. Вентиляция и кондиционирование воздуха / под ред. Н. Г. Старовойтова. – М. : Стройиздат, 1978. – 509 с.

ТЕПЛОБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ХЛАДАГЕНТОВ НА ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В. П. Никитенко

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Целью данного исследования является анализ процессов теплообмена при конденсации хладагентов на различных поверхностях; изучение и сравнение зависимостей между теоретическими и экспериментальными исследованиями теплообмена при конденсации, теплофизическими свойствами жидкостей, определяющих интенсивность теплообмена при конденсации на охлаждающих поверхностях.

Экспериментальные исследования о теплообмене при конденсации хладагентов и их маслофреоновых смесей на вертикальных поверхностях ограничены и в некоторых случаях противоречивы. Однако показано, что теплообмен на вертикальных поверхностях интенсивнее, так как на горизонтальных поверхностях, будь то одиноч-

ная труба или пучок труб, коэффициент теплоотдачи меньше по причине уменьшения скорости пара по мере его конденсации на нижних горизонтальных трубах в пучке [1].

Рассматривались и изучались исследования изменения коэффициента теплоотдачи в горизонтальных микроканалах различных форм поперечного сечения (квадратной, треугольной и круглой). Круглые и некруглые микроканалы используются в различных теплообменных аппаратах из-за высоких коэффициентов теплоотдачи при конденсации внутри каналов. Исследования, проведенные А. В. Бараненко, Н. И. Сатиновым, А. С. Лоскутовым, при конденсации хладагентов в микроканалах представляют зависимость коэффициента теплоотдачи для хладагентов R134a, R410A, R22 от степени сухости пара рабочего вещества, длины канала, формы каналов квадратной и треугольной. Вычисления для каналов различной формы, имеющих площадь поперечного сечения 1 мм^2 , по диапазону степени сухости пара от 0,1 до 1 показывают, что для квадратных и треугольных каналов средние значения коэффициентов теплоотдачи близки между собой. Для круглых каналов расчетные величины ниже, более чем на 20 %. Это связано с большим вкладом поверхностного натяжения в интенсивность теплообмена при конденсации в каналах некруглой формы. Высокий коэффициент теплоотдачи на входе является критической высокой разности температур между теплопередающей стенкой и паром в начале процесса конденсации. Коэффициент теплоотдачи остается практически постоянным, когда конденсат в углах занимает существенную часть сечения канала. Следует, что для хладагента R410A коэффициент теплоотдачи ниже нежели для R134a. Более высокая плотность пара и более низкое поверхностное натяжение R410A, уменьшают граничное касательное напряжение и силу поверхностного натяжения, что обуславливает меньшую интенсивность теплообмена для R410A в сравнении с другими представленными хладагентами.

Выполненный анализ доступных литературных источников по экспериментальным и численным исследованиям теплообмена при конденсации в микроканалах протекает более интенсивно, чем в трубах больших размеров [1].

Приведены зависимости коэффициентов теплоотдачи от длины канала при конденсации различных хладагентов в квадратном (рис. 1, а) и треугольном (рис. 1, б) горизонтальных микроканалах.

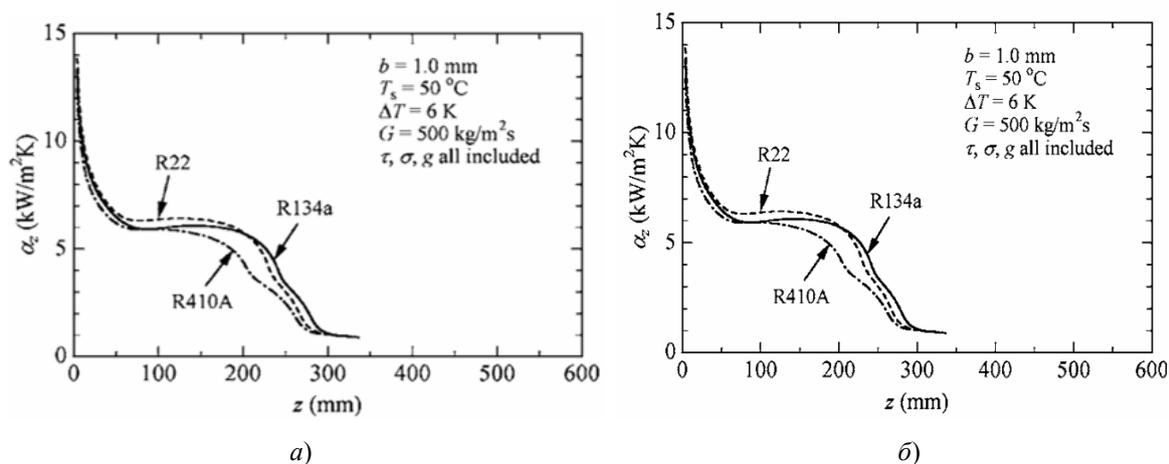


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи при конденсации хладагентов от длины канала: а – для микроканала квадратного сечения; б – микроканал с треугольным сечением

Метод интенсификации теплообмена при пленочной конденсации на вертикальной трубе был предложен Р. Грегоригом в 1954 г. Поверхность строится таким образом, чтобы толщина пленки конденсата не менялась. В пленке возникает градиент давления, под его действием жидкость стягивается с выступа во впадину, по впадине она стекает под действием сил тяжести. На выступе остается пленка очень малой толщины, за счет этого интенсивность теплообмена на поверхности значительно возрастает. Профиль волнистого гребня не нашел широкого применения, так как трудно реализовать на практике индивидуальную форму оребрения. Более простая форма оребрения круглая [2].

Вертикальные трубы с продольным оребрением в виде полуокружности исследовались В. Г. Рифертом, Г. Г. Леонтьевым, С. И. Чаплинским для водяного пара. Интенсивность теплообмена в опытах на трубах с продольными ребрами в виде полуокружностей с радиусами 0,5 мм и 0,35 мм оказалась практически одинаковой. На трубах с меньшим радиусом кривизны значение величин градиента давления больше и зависит от сил поверхностного натяжения [3].

Трапецеидальная форма оребрения не дает большей степени интенсификации теплообмена. Трапецеидальная форма исследовалась Н. В. Зозулей, В. А. Каржу. При высоте трубы 0,75 м средний коэффициент, отнесенный к поверхности гладкой трубы, был в 2,5–3,5 раза выше, чем для гладкой. Более простыми и технологичными является оребрение со скругленными выступами и впадинами. На рис. 2 представлены результаты по интенсификации теплообмена при конденсации на вертикальной рифленой поверхности, полученные при анализе экспериментальных работ. Данные отнесены к значениям коэффициентов теплоотдачи при конденсации пара на гладких поверхностях, рассчитанных по формуле Нуссельта. Наибольшая степень интенсификации теплообмена от оребрения со скругленными выступами и впадинами была достигнута Григоригом по конденсации водяного пара. Однако коэффициент поверхностного натяжения хладагентов в 7–9 раз больше, чем у воды, поэтому соотношение между теплоотдачей между теплоотдачей гладкой и оребренной поверхности для хладагентов будет меньше. На рис. 2 линия 5 соответствует исследованиям Х. Фуджи и Т. Хонды для хладагента R-11 на вертикальных трубах, высотой труб 0,446 м. Линия 7 – результаты исследований В. Накаямы и С. Хирасавы. Авторы получили большую зависимость коэффициента теплоотдачи от высоты поверхности и предложили оснащать конденсаторы с поверхностями в виде мелких продольных оребрений с конденсатоотводящими устройствами. Однако данные других экспериментальных данных из литературных источников утверждают, что конденсатоотводящие устройства не влияют на теплоотдачу. Линия 8 – исследования Д. Мишеля, Р. Мэрфи – показывают, что одиночные вертикальные трубы могут давать значение коэффициента теплоотдачи в 1,7 раза больше, чем одиночная горизонтальная труба [3].

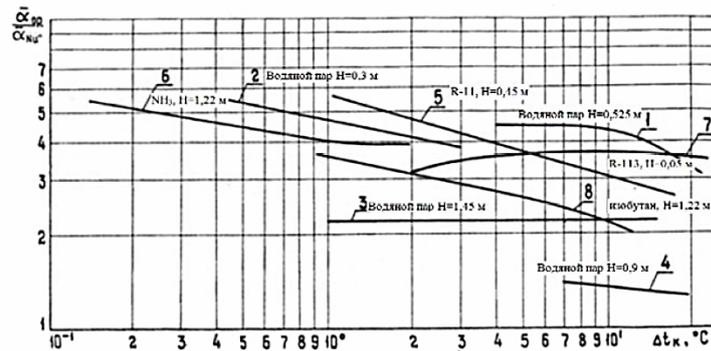


Рис. 2. Интенсификация теплообмена при конденсации пара на вертикальных рифленых поверхностях

Исходя из вышесперечисленного, можно сделать следующие выводы:

1. Анализ экспериментальных исследований показывает, что большинство экспериментов не содержат данных, необходимых для практического применения в энергетическом оборудовании.

2. Миниканальные конденсаторы весьма перспективны для широкого применения в низкотемпературной техники, однако требуется изучение возможных режимов течения хладагентов, возникающих в определенных зонах миниканальных конденсаторов. Важным механизмом повышения теплоотдачи при конденсации в каналах некруглой формы является поверхностное натяжение, которое создает поперечный градиент давления в пленке конденсата. Это приводит к потоку конденсата в направлении углов и делает слой пленки более тонким вдоль сторон канала, приводя к росту интенсивности теплоотдачи.

3. Один из высокоэффективных методов интенсификации теплообмена при пленочной конденсации – продольное ребрение вертикальной трубы. Из исследований Григорига следует, что наиболее эффективным ребрением являются ребра со скругленными выступами и впадинами.

Литература

1. Бараненко, А. В. Теплообмен при конденсации хладагентов в миниканалах / А. В. Бараненко, Н. И. Сагин, А. С. Лоскутов // Науч. журн. НИУ ИТМО. – 2015. – № 3.
2. Исследование эффективности применения вертикальных ребристых труб в регенеративных подогревателях низкого давления / В. А. Кархун [и др.] // Сб. науч. ст. / Центр. науч.-исслед. и проект.-конструкт. котлотурбин. ин-т им. И. И. Ползунова. – 1977. – С. 80–88. – (Тр. ЦКТИ ; вып. 140).
3. Зозуля, Н. В. Интенсификация процесса теплоотдачи фреона 113 на горизонтальных трубах / Н. В. Зозуля, В. П. Боровиков, В. А. Кархун // Холодильная техника. – 1969. – № 4.
4. Кутателадзе, С. С. Анализ теплообмена при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности / С. С. Кутателадзе, И. И. Гогонин, Н. И. Григорьева // ИФЖ. – 1983. – Т. 44, № 6.
5. Кутателадзе, С. С. Формулы и графики для расчетов общего коэффициента теплоотдачи в вертикальных подогревателях при пленочной конденсации медленно движущегося насыщенного пара / С. С. Кутателадзе, А. Н. Шренцель // Советское котлотурбинное. – 1938. – № 4.
6. Маткович, М. Экспериментальное исследование по конденсационному теплообмену внутри одного круглого мини-канала / М. Маткович, А. Каваллини, Л. Россетто // Междунар. журн. теплообмена. – 2009. – № 52.
7. Соколова, (Слепая), Е. Исследование теплоотдачи при конденсации пара фреона – 12 на гладкой и ребристых трубах / Е. Соколова (Слепая) // Холодильная техника. – 1952. – № 1.

РАЗВИТИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Д. А. Волоткевич

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

Научный руководитель Н. В. Ермалинская

В современных условиях и общемировых тенденциях устойчивое энергоэффективное функционирование энергосистемы Республики Беларусь невозможно без комплексного и сбалансированного подхода в определении важнейших задач и направлений ее развития. Сегодня в качестве ключевых стратегических задач ставятся: обеспечение энергетической безопасности, повышение энергоэффективности, диверсификация топливно-энергетического баланса (в том числе за счет увеличения доли использования возобновляемых источников энергии) и переход к цифровой энергетике.

Цель проводимых исследований – анализ современного состояния и выявление тенденций развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) Республики Беларусь в условиях повышения уровня энергетической безопасности страны.

Анализ состояния и структуры выработки энергии в энергетической отрасли Беларуси за период с 2010 по 2019 г. позволил установить следующее:

– основным источником получения электроэнергии являются тепловые электростанции, суммарная мощность которых составляет 9820 МВт [1]. Также в белорусской энергосистеме работают 19 гидроэлектростанций установленной мощностью 95 МВт, ветроэнергетические установки (11 МВт) и блок-станции потребителей (1034,4 МВт);

– активно развивается энергетика на возобновляемых источниках, в частности, увеличивается выработка электроэнергии на солнечных, ветро- и гидроэлектростанциях;

– экспорт электроэнергии в последние годы увеличился в 8,75 раза (с 271 млн кВт · ч до 2370 млн кВт · ч) при существенном снижении импорта электроэнергии от зарубежных поставщиков в 92,8 раза (табл. 1).

Таблица 1

Баланс электрической энергии, млн кВт · ч

Наименование	Годы					
	2010	2015	2016	2017	2018	2019
Производство, в том числе	34890	34232	33572	34522	38927	40451
– на тепловых электростанциях	34844	34073	33331	33930	38386	39755
– на гидроэлектростанциях	45	111	142	406	324	351
– ветроустановками	1	39	73	97	99	166
– солнечными установками	–	9	26	89	118	179
Импорт	2971	2816	3181	2733	50	32
Экспорт	271	194	160	148	1040	2370
Потреблено в республике	37590	36854	36593	37107	37937	38113

Примечание. Составлено автором на основе источника [2].

В сложившихся условиях основными тенденциями развития энергосистемы Республики Беларусь становятся следующие:

– *наращивание собственной генерации электроэнергии блок-станциями организаций.* Производство электрической энергии на блок-станциях предприятий выросло с 2432 млн кВт · ч, в 2010 г. до 4160 млн кВт · ч в 2019 г. [1]. Это произошло по ряду причин: возможность исключения затрат на передачу, распределение, сбыт, диспетчеризацию; внедрение дешевых газотурбинных и газопоршневых установок с высоким КПД и маневренностью. Однако в связи с вводом Островецкой АЭС выдача разрешений на строительство блок-станций приостановлена;

– *ввод и эксплуатация атомной электростанции.* Особенностью атомной станции является то, что станция должна работать в номинальном режиме, для поддержания ее в безопасном состоянии и обеспечения минимальной себестоимости производства электрической энергии (топливные затраты должны составлять не более 25 %);

– *развитие теплофикационной генерации.* По производству тепловой энергии доля ТЭЦ составляет в среднем 55 % от всей тепловой энергии, при этом удельный расход топлива на ТЭЦ значительно ниже среднего по системе. В результате ввода АЭС существующие ТЭЦ периодически разгружаются ниже теплового графика, что свидетельствует об отсутствии необходимости создания новых энергоблоков;

– *развитие конденсационной генерации.* Мощности конденсационных станций в белорусской энергосистеме представлены: ТЭЦ–5 719,6 МВт, Березовской ГРЭС – 1255,1 МВт, Лукомльской ГРЭС – 2889,5 МВт. Данные станции выполняют функции баланса мощности и выработки электроэнергии для обеспечения данного баланса;

– *развитие возобновляемых источников энергии.* В возобновляемой энергетике наибольшее развитие получили ГЭС. Однако сдерживающим фактором остается рельеф территории, не позволяющий строить крупные станции.

Системообразующим документом для разработки прогнозов и программ развития энергетики страны выступает Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. (табл. 2).

Таблица 2

Программно-правовые документы, определяющие приоритеты развития топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь

Программные документы	Основные цели
Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г.	Повышение энергетической самостоятельности страны за счет вовлечения в энергобаланс ядерного топлива и возобновляемых источников энергии
Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь	Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов, энергетическая эффективность конечного потребления ТЭР и пр.
Отраслевая программа развития электроэнергетики на 2016–2020 гг.	Сбалансированное развитие и модернизация генерирующих источников, диверсификация первичных энергоносителей и пр.
Комплексный план развития электроэнергетической сферы до 2025 г. с учетом ввода БелАЭС	Интеграция Белорусской атомной электростанции в Объединенную энергетическую систему; ликвидация перекрестного субсидирования в тарифах с учетом планируемого роста реальных доходов населения

Примечание. Составлено автором на основе источника [1].

Предполагается, что развитие атомной энергетики и возобновляемых энергоисточников позволит диверсифицировать топливно-энергетический баланс энергосистемы в направлении снижения потребления природного газа. Также ставится задача повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов до уровня развитых стран, т. е. снижения уровня энергоемкости ВВП в 1,5–2 раза [1].

В соответствии с Концепцией энергетической безопасности развитие ТЭК Беларуси должно идти в направлении достижения установленных показателей (табл. 3).

Таблица 3

Основные индикаторы энергетической безопасности Республики Беларусь

Наименование индикатора	Пороговые уровни		Значение по годам		
	нормальный	критический	2025	2030	2035
Отношение объема производства первичной энергии из ВИЭ к валовому потреблению ТЭР, %	14	5	7	8	9
Доля доминирующего поставщика энергоносителей в импорте ТЭР, %	65	85	80	75	70
Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР, %	50	70	55	52	50
Отношение суммарной установленной мощности электростанций к максимальной фактической нагрузке в энергосистеме, %	140	95	155	150	145
Доля доминирующего энергоносителя (газа) в производстве тепловой и электрической энергии, %	50	80	60	50	< 50
Энергоемкость ВВП (в ценах 2005 г.), кг у. т. / млн р.	160	485	353	317	268

Примечание. Составлено автором на основе источника [1].

Следовательно, в соответствии с целями Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь ТЭК должен развиваться в направлениях, обеспечивающих увеличение объема производства первичной энергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ) до 14 %, снижении доли доминирующего вида топлива (газа) в потреблении ТЭР не более 50 %, снижении энергоемкости ВВП до 160 кг у. т. / млн р. в ценах 2005 г.

Для реализации намеченного курса разработано три варианта развития баланса энергосистемы Республики Беларусь с учетом развития ветроэнергетики (табл. 4).

Сценарии развития энергосистемы Республики Беларусь

Прогнозируемые показатели	Сценарий		
	Оптимистичный ²	Базовый ³	Пессимистичный
Производство электроэнергии, млрд. кВт · ч	45,2	42,1	39,6
Производство теплоэнергии, млн Гкал	63,2	59,8	58,4
Отношение объема производства первичной энергии из ВИЭ к валовому потреблению ТЭР, % ($d_{\min} - d_{\max}$)	8–14	8–14	8–14
Суммарная установленная мощность ВЭУ / СЭС к 2030 г., млн кВт	2,0 / 2,0	2,5 / 3,0	1,5 / 1,0
Производство электрической энергии из ВИЭ, млрд кВт · ч ($W_{\min} - W_{\max}$)	2,3–6,8	2,1–6,3	2,0–5,9
Прогнозная минимальная себестоимость генерации энергии, долл, МВт · ч	44,40	45,00	44,10

Примечания. 1. Таблица составлена автором на основе источника [1]. – 2. Оптимистичный сценарий заложен индикаторами НСУР–2030. – 3. Базовый сценарий заложен индикаторам Концепции энергетической безопасности.

Необходимо отметить, что представленные сценарии развития энергосистемы Республики Беларусь (табл. 4) разработаны с учетом следующих особенностей [1]:

- обоснование вариантов развития энергосистемы проводилось по критерию минимума общей себестоимости генерации электрической энергии;
- каждый из представленных сценариев включает два подсценария, в которых доля ВИЭ составила 5 и 15 % в общем объеме производства электроэнергии;
- проблема прохода периодов перепроизводства электроэнергии решена с помощью электродвигателей, которые будут потреблять излишки для выработки тепловой энергии;
- во всех сценариях активного развития ВИЭ основным видом энергии должна стать энергия ветра, так как ветроэнергетические установки (ВЭУ) имеют более равномерный и прогнозируемый график выработки, а полученная энергия будет иметь наиболее низкую себестоимость;
- исключение возможности регулирования графика нагрузки посредством мощностей АЭС, так как станция должна работать в постоянном режиме;
- базовым уровнем графика нагрузки, не подлежащим снижению, останется выработка электроэнергии в теплофикационном цикле ТЭЦ, что принято за технологические ограничения допустимой выработки энергии из ВИЭ;
- доля выработки энергии АЭС и ТЭЦ в общем балансе должна будет составлять 79,6–87,8 % в зависимости от сценария.

Таким образом, перспективные направления и прогнозные параметры развития ТЭК Республики Беларусь учитывают различные сценарии функционирования энергосистемы и, в первую очередь, ориентированы на повышение уровня энергетической безопасности страны, увеличение доли использования возобновляемых источников энергии посредством введения дополнительных генерирующих мощностей солнечных и ветроэнергетических установок.

Литература

1. Разработка энергетического баланса энергосистемы Беларуси с учетом развития возобновляемой энергетики, в том числе ветроэнергетики : науч.-техн. отчет / А. Ф. Молочко [и др.]. – Минск : Альфа-книга, 2019. – 238 с.
2. Энергетический баланс Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – 101 с. – Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by>. – Дата доступа: 12.02.2020.

**ПЕРСПЕКТИВЫ И БАРЬЕРЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ
ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ГЕНЕРАЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**

Е. М. Вежновец, К. П. Герасенко

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

Научный руководитель Г. А. Рудченко

Энергетическая политика Республики Беларусь ориентирована на обеспечение надежного, устойчивого энергоснабжения потребителей на основе повышения уровня энергетической безопасности страны, максимально эффективного использования имеющихся топливно-энергетических ресурсов, снижения зависимости от импорта органического топлива. В этой связи в настоящее время в научных и прикладных исследованиях значительное внимание уделяется вопросам создания на предприятиях собственных генерирующих мощностей, т. е. формированию и развитию систем распределенной генерации энергии.

Применение источников собственной генерации энергии у потребителя – процесс, как для мировой энергетики, так и для отечественного топливно-энергетического комплекса, не являющийся новацией. Изучение исторических аспектов развития отечественной энергетики показало, что источники распределенной генерации энергии существовали на начальном этапе формирования энергетической отрасли [1]–[4]. Дальнейшее применение они нашли на объектах промышленного, бытового, социального, сельскохозяйственного и других секторов экономики.

Ключевыми предпосылками развития распределенной генерации энергии в мире являются следующие [5]:

- возникновение и развитие новых технологий генерации энергии;
- появление нового оборудования;
- рост конкуренции за энергоресурсы;
- участвовавшие в мире аварии и отключения техногенного происхождения;
- нарастающая нагрузка на окружающую среду;
- геополитические и социальные угрозы.

Процесс развития распределенной энергетики в мире происходит весьма высокими темпами: по данным исследований группы Navigant research [6] прогнозируется ввод большего объема мощностей распределенных источников генерации энергии, чем централизованной генерации (рис. 1). Так, к 2026 г. в мире ожидается следующее соотношение: на долю распределенных источников генерации энергии будет приходиться около 76 %, а централизованных – всего 24 %.

Анализ концепций построения распределенной энергетики в мировой практике позволил установить ключевые условия ее применения при энергоснабжении хозяйствующих субъектов, характерные также для Республики Беларусь [5]:

1) учет особенностей спроса на количество и качество энергии местными (локальными) потребителями всех ее видов;

2) единство энергетического комплекса распределенной энергосистемы – от генерации до потребления;

3) максимальное обеспечение потребностей в первичных источниках энергии за счет собственных ресурсов территории.

На современном этапе созданы благоприятные условия для интеграции источников распределенной генерации энергии в систему энергоснабжения хозяйствующих субъектов, принимаются и реализуются меры по развитию распределенной энергетики в различных отраслях национальной экономики.

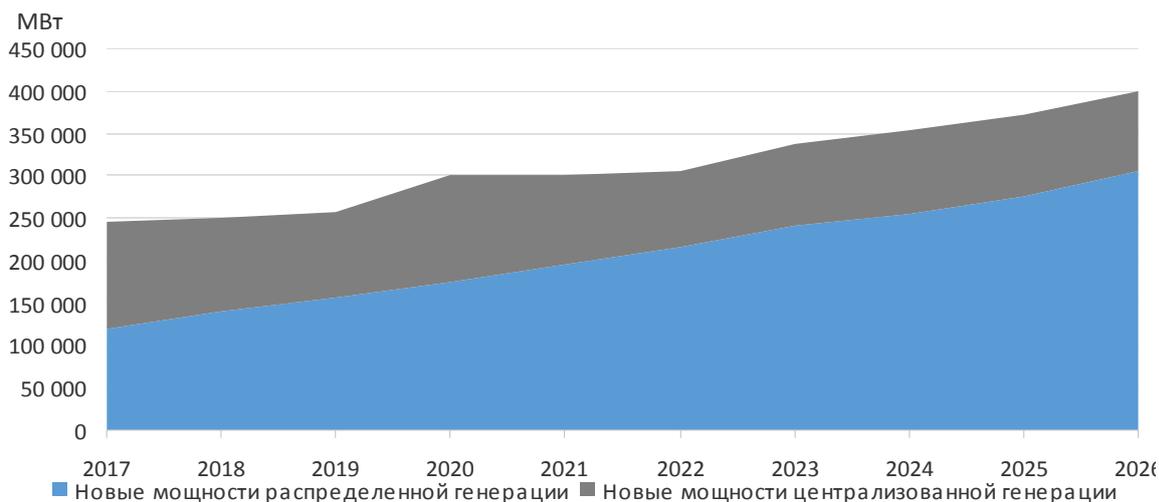


Рис. 1. Прогноз ввода новых мощностей централизованной и распределенной энергетики в мире в 2017–2026 гг., МВт

В Республике Беларусь применяются следующие системы генерации:

1) на основе использования органического топлива (дизельные электростанции, газопоршневые, газотурбинные, парогазовые, газомоторные установки и пр.);

2) системы на основе возобновляемых источников энергии (ветроэнергетические установки, фотоэлектрические установки, системы, использующие биомассу и гидроэнергию). Главное внимание уделяется развитию систем генерации на основе использования возобновляемых источников энергии.

По результатам исследований авторами составлена SWOT-матрица применения источников распределенной генерации для субъектов хозяйствования (см. таблицу).

Результаты проведенных исследований показали, что в мировой энергетике накоплен богатый опыт использования источников распределенной генерации энергии. Возможности их применения на практике определяются природно-ресурсным потенциалом, а также финансовыми, техническими и другими факторами. Специфика этих источников в Республике Беларусь такова, что их генерирующие мощности несопоставимо малы по сравнению с мощностями крупных электростанций. Энергосистема будущего должна будет сочетать крупные электростанции, без которых проблематично электроснабжение крупных потребителей и обеспечение роста электропотребления, и распределенную генерацию.

**SWOT-анализ применения источников распределенной генерации
для субъектов хозяйствования**

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"> • возможность автономной работы; • высокий уровень автоматизации и аварийной безопасности; • снижение потерь в сетях и перетоков реактивной мощности 	<ul style="list-style-type: none"> • высокие инвестиционные затраты при низком платежеспособном спросе; • снижение надежности энергоснабжения в случае нарушения техпроцесса; • необходимость резервирования мощностями централизованной энергетики
Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"> • обеспечение собственных потребностей хозяйствующих субъектов в электрической и тепловой энергии; • получение дополнительных доходов за счет реализации электрической и тепловой энергии в централизованную сеть; • снижение энергетических затрат 	<ul style="list-style-type: none"> • создание помех для работы Белорусской энергетической системы; • ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС; • слабое развитие отечественного коммерческого производства необходимого оборудования; • изменения в нормативных актах по вопросам распределенной энергетики

Примечание. Составлено авторами по данным [7].

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:
– во-первых, развитие распределенной энергетики является общемировой тенденцией;

– во-вторых, в настоящее время более активно внедряются системы генерации на основе использования возобновляемых источников энергии;

– в-третьих, применение источников распределенной генерации энергии в практику работы хозяйствующих субъектов будет развиваться в ближайшей перспективе.

Л и т е р а т у р а

1. Лапаева, М. Г. Основные этапы формирования и развития топливно-энергетического комплекса в России / М. Г. Лапаева, О. Ф. Лапаева // Вестн. ОГУ. – 2004. – № 8. – С. 4–12.
2. Харламова, Т. Е. История науки и техники. Электроэнергетика / Т. Е. Харламова. – СПб. : Изд-во МЭИ, 2004. – 271 с.
3. Восемьдесят лет развития энергетики. От плана ГОЭЛРО к реструктуризации РАО «ЕЭС России» / А. Б. Чубайс [и др.] ; под общ. ред. А. Б. Чубайса. – М. : Информэнерго, 2000. – 528 с.
4. Становление энергетики Беларуси. Путь длиною в жизнь // Энергет. стратегия. – 2011. – № 2. – С. 20–29.
5. Рудченко, Г. А. Децентрализованные источники энергии как фактор повышения конкурентоспособности хозяйствующих субъектов / Г. А. Рудченко // Региональная конкурентоспособность и образование в контексте глобальных вызовов : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. IV Урал. вернисажа науки и бизнеса, Челябинск, 3 марта 2017 г. / Челяб. гос. ун-т ; под общ. ред. Е. П. Велихова. – Челябинск, 2017. – С. 318–322.
6. Navigant research. – Mode of access: <http://www.navigantresearch.com>. – Date of access: 01.03.2021.
7. Рудченко, Г. А. Возобновляемая энергетика в агропромышленном комплексе Республики Беларусь / Г. А. Рудченко // Управление, экономика и общество – 2020: проблемы и пути развития : сб. ст. участников Междунар. науч.-практ. конф. РеФОРУМа «Управлять мечтой!», Челябинск, 16 апр. 2020 г. / Челяб. гос. ун-т ; под общ. ред. Е. П. Велихова. – Челябинск, 2020. – С. 136–139.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ГРАДИРНИ № 1 НА ГОМЕЛЬСКОЙ ТЭЦ-2**М. В. Каминский***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Н. В. Широглазова

Гомельская ТЭЦ-2 – самая молодая и одновременно самая мощная электростанция в области. Сейчас ее установленная мощность составляет: электрическая – 544 МВт, а по теплу – 1320 Гкал/час. И вся эта «мощь и сила» снабжает теплом и светом практически весь Гомель, за исключением Новобелицы и части Центрального района, при этом сама Гомельская ТЭЦ-2 находится в 5 км от города.

Строительство Гомельской ТЭЦ-2 было начато в 1979 году. Технический проект строительства станции был разработан Белорусским отделением института «ВНИПИЭнергопром» в 1977 г. и утвержден приказом Минэнерго СССР от 19.05.1978 г. № 63-ПС. В 1982 г. была введена в эксплуатацию пусковая котельная.

4 января 1985 года заработали водогрейные котлы КВГМ-180 № 1, 2 теплопроизводительностью 180 Гкал/ч каждый. Именно с этого момента по проложенной от ТЭЦ до Гомельского завода литья и нормалей магистрали было начато теплоснабжение Гомеля от будущей ТЭЦ-2. Первое тепло получили более 100 тыс. жителей города [2].

24 декабря 1986 г. в 21 ч 15 мин был произведен пуск энергоблока № 1 в составе паровой турбины Т-180 и котлоагрегата Е-670 и начат отпуск электроэнергии в Белорусскую энергосистему. Этот день и считается днем рождения Гомельской ТЭЦ-2. По сути, год введения в эксплуатацию первого энергоблока совпал с годом аварии на Чернобыльской АЭС и это, конечно, внесло определенные коррективы. В загрязненной радионуклидами зоне оказались 20 тыс. км ЛЭП 10 кВ, 12 тыс. подстанций 10/0,4 кВ, 6 тыс. км линии 35–10 кВ. Огромные ресурсы шли на восстановление природного баланса и устранение последствий от аварии, а тут еще новая энергостройка. Но и выбора не было, после аварии были отключены сразу две линии электропередач. Второй энергоблок заработал в декабре 1988 г. И только с вводом в строй третьего энергоблока, а это случилось в мае 1995 г., станция вышла на проектную мощность в 540 мВт. Сейчас Гомельская ТЭЦ-2 работает в составе РУП «Гомельэнерго» [2].

РУП «Гомельэнерго» – это единый технологический комплекс, включающий электростанции, котельные, трансформаторные подстанции, электрические и тепловые сети, а также другие смежные подразделения, которые обеспечивают производство электрической и тепловой энергии, ее передачу и распределение на территории Гомельской области. Кроме Гомельской ТЭЦ-2 сюда входят еще 5 электростанций: Светлогорская ТЭЦ, Мозырская ТЭЦ, Гомельская ТЭЦ-1 (в составе Гомельских тепловых сетей), Жлобинская ТЭЦ (в составе Жлобинских электрических сетей), Речицкая мини-ТЭЦ (в составе Речицких электрических сетей). Общая установленная мощность предприятия составляет: электрическая – 971,718 МВт и тепловая – 4164,68 Гкал/ч. Сама же РУП «Гомельэнерго» ходит в состав ГПО «Белэнерго», которое уже отвечает за всю энергетику Республики Беларусь [1].

В 2006 г. ЗАО «Техэнерго» было выполнено обследование технического состояния водоохлаждающих устройств двух градирен, проведены испытания системы технического водоснабжения, разработаны в техническом отчете «Испытания и наладка системы технического водоснабжения Гомельской ТЭЦ-2» технические пред-

ложения по повышению охлаждающей эффективности градирен, а также для снижения ограничения электрической мощности ТЭЦ в конденсационном режиме для летнего (неотопительного) периода года.

По результатам обследования ЗАО «Белспецэнерго» и испытаний ЗАО «Техэнерго» отмечено, что повышение эффективности работы градирен невозможно из-за несовершенной конструкции оросителя и разбрызгивающих сопел.

Объем реконструкции рассмотрен и рекомендован к реализации технико-экономическим советом ГПО «Белэнерго» (протокол от 04.04.2007 г., утвержденный первым заместителем генерального директора – главным инженером А. В. Сиваком).

В 2008 году РУП «БелНИПИэнергопром» разработан архитектурный проект №027-ПЗ-АП4, который прошел государственную экспертизу (заключение РУП «Госстройэкспертиза по Гомельской области» № 2649 от 30.09.2008 г.) и утвержден директором Гомельской ТЭЦ-2 07.10.2008 г. № 07-03/672.

Проектом в соответствии с заданием на проектирование с учетом рекомендаций ЗАО «Техэнерго» предусматривается: реконструкция водораспределительных систем градирен; замена оросительного устройства; устройство перемычки между сливными циркуловодами; реконструкция воздухорегулирующего устройства с установкой аэродинамического завихрителя, разработанного Институтом тепло- и массообмена имени Лыкова Национальной академии наук Республики Беларусь.

Реконструкция предусматривается в четыре очереди:

- I очередь. Градирня № 1. Реконструкция водораспределительной системы и оросительного устройства.
- II очередь. Градирня № 1. Установка аэродинамического завихрителя.
- III очередь. Градирня № 2. Реконструкция водораспределительной системы и оросительного устройства.
- IV очередь. Градирня № 2. Установка аэродинамического завихрителя.

Реконструкция водораспределительной системы градирни. Использование низконапорных водоразбрызгивающих сопел с разбрызгиванием вниз позволяет при низких напорах воды перед ними обеспечить необходимую площадь орошения и эффективность разбрызгивания.

При установке сопел с разбрызгиванием вниз предотвращаются отложения в трубах водораспределительной системы.

Применение водоразбрызгивающих сопел с диаметром выходного отверстия 22 или 24 мм выравнивает аэродинамическое сопротивление между центральной и периферийной частями охлаждающего устройства.

Замена оросительного устройства. Тепло-массообменное устройство (ТМУ) градирни отвечает за охлаждение воды, в нем происходит до 90 % всего теплосъема и охлаждения технологической воды. Основное назначение ТМУ – создание развернутой поверхности воды и условий для беспрепятственной подачи воздуха к этой поверхности.

В зависимости от способа охлаждения воды в результате контакта с воздухом различают три типа оросителей:

1. *Пленочные ТМУ* (асбоцементные, деревянные). Охлаждение происходит в результате контакта воздуха с водяной пленкой, образующейся на элементах при обтекании их падающей сверху водой.

2. *Капельно-пленочные ТМУ* (из полимерных листов и трубок). Охлаждение происходит в результате контакта воздуха с водяной пленкой, крупными и мелкими каплями; низкая эффективность теплосъема вследствие кратковременного образования пленки и малой степени дробления капель.

3. *Капельные ТМУ* (оросители решетчатой структуры). Являются самыми эффективными оросителями, так как съем тепла с капель гораздо выше, чем с пленки. Структура и величина поверхности охлаждения, образующейся при раздроблении воды в решетнике, – капли воды, попадающие на элементы, ударяются об них, дробятся, образуя новые капельные структуры с новой поверхностью контакта с воздухом. При этом многоярусный ороситель одновременно уменьшает среднюю скорость падения капель и перемешивание воды по пути ее движения.

Перемычка между сливными циркуводоходами. Из-за особенностей схемы подключения сливных трубопроводов после конденсаторов турбин к магистральным сливным циркуводоходам происходит неравномерное распределение расходов воды между градирнями, а также между половинами каждой из градирен.

Для уменьшения неравномерности распределения потоков воды между охладителями и сливными магистральными циркуводоходами была установлена перемычка (Ди 1600).

Выполнение реконструкции водоохлаждающего устройства градирни № 1 Гомельской ТЭЦ-2 с повышением охлаждающей эффективности на 4 °С за период года с положительными температурами наружного воздуха позволит дополнительно выработать 6,4 млн кВт · ч электроэнергии в год и соответственно получить экономию топлива 1947 т у. т. за счет улучшения вакуума в конденсаторах турбин.

Положительный опыт реконструкции и модернизации водоохлаждающего устройства градирни № 1 Гомельской ТЭЦ-2 далее можно использовать как при реконструкции существующих, так и при строительстве новых вентиляторных и башенных градирен не только на объектах Белорусской энергосистемы, но и на других промышленных предприятиях Республики Беларусь.

Л и т е р а т у р а

1. ГПО «Белэнерго». – Режим доступа: <https://www.energo.by>. – Дата доступа: 01.04.2021.
2. РУП «Гомельэнерго». – Режим доступа: <https://www.gomelenergo.by>. – Дата доступа: 01.04.2021.

ГАЗОПОРШНЕВЫЕ УСТАНОВКИ

А. С. Кохан

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

Научный руководитель Н. В. Широглазова

Газопоршневая установка (ГПУ) – это вид энергетического оборудования, предназначенного для нецентрализованного производства электрической энергии.

Основу газопоршневой установки составляет приводной двигатель внутреннего сгорания (ДВС), работающий на природном газе или жидком топливе. На одной раме с ним установлен синхронный электрический генератор.

Двигатели внутреннего сгорания, использующие в качестве топлива газ, называют газопоршневыми двигателями (ГПД).

Принцип работы двигателя газопоршневой установки. Газопоршневой двигатель, используемый в ГПУ, является конструктивной разновидностью двигателя внутреннего сгорания. Источником энергии, вырабатываемой ГПД, служит теплота сгорания различных видов топлива, таких, как природный газ, факельный газ, газ сточных вод, биогаз, газ мусорных свалок, коксовый газ, попутный газ, дизельное топливо, СПГ, пропан, мазут, нефть.

Различают следующие виды видов работы ГПУ.

Двигатели типа SG. Газовые двигатели, работающие на бедных смесях. Представляют собой двигатели на обедненной смеси с искровым зажиганием. В этих двигателях газ смешивается с воздухом до подачи во впускные клапаны. Во время цикла всасывания газ поступает также в небольшую форкамеру, где газоздушная смесь более обогащенная, чем смесь в цилиндре двигателя. В конце фазы сжатия смесь в форкамере воспламеняется с помощью свечи. Пламя из сопла форкамеры воспламеняет газоздушную смесь во всем цилиндре, в результате чего происходит ее быстрое сгорание. После рабочей фазы дымовые газы удаляются из цилиндра и цикл повторяется [3].

Двухтопливные двигатели (DF). В двухтопливных двигателях при работе в газотопливном режиме также применяется процесс сжигания обедненной смеси. Здесь газ смешивается с воздухом до подачи во впускные клапаны во время периода забора воздуха. После фазы сжатия газоздушная смесь воспламеняется небольшим количеством жидкого пилотного топлива. После завершения рабочей фазы выпускные клапаны открываются, и цилиндр освобождается от продуктов сгорания. Входные воздушные клапаны открываются после закрытия выпускных клапанов, и процесс начинается заново. Двухтопливный двигатель также оснащен системой резервного топлива. В жидкотопливном режиме двигатель работает по дизельному циклу с приводом топливных насосов от распредвала, работающих параллельно в резервном режиме. Двигатель может переключаться с дизельного на газотопливный режим, не прекращая работы [3].

Газодизельные двигатели (GD). На всех режимах газодизельный двигатель работает по циклу дизеля. В газотопливном режиме газ подается в цилиндр под высоким давлением и воспламеняется от впрыска пилотного топлива. Количество пилотного топлива эквивалентно примерно 5 % энергии всего топлива, поступающего в двигатель при полной нагрузке. Газодизель может непосредственно переключаться на работу в жидкотопливном режиме. В качестве жидкого топлива может применяться дизельное топливо, мазут или нефть. В этом случае цикл работы аналогичен традиционному дизельному циклу. В режиме работы «топливные доли» соотношение между количеством жидкого и газообразного топлива в смеси может регулироваться и изменяться во время работы двигателя. Рабочее окно режима «топливные доли» охватывает диапазон от 30 до 100 % нагрузки, а соотношение «газ/жидкое топливо» может изменяться в соответствии рабочим полем режима «топливные доли». Газодизельный процесс допускает значительные изменения качества сжигаемого газа и, поэтому особенно подходит при использовании газа низкого качества, такого, как попутный газ на нефтяных месторождениях [3].

Для чего применяется ГПУ? Основное применение ГПУ – это привод в газопоршневых электростанциях (ГПЭС). ГПЭС представляет собой комплектный, компактный, автономный и эффективный генерирующий объект по выработке электрической и тепловой энергии. ГПЭС работает на базе газопоршневого двигателя внутреннего сгорания и генератора переменного тока – газопоршневой установки. Частным случаем ГПЭС являются мини-ТЭЦ. ГПЭС решают проблемы перехода к современной, устойчивой и экономически оправданной энергосистеме. Главные преимущества этих станций – очень высокая энергоэффективность, исключительная эксплуатационная гибкость, а также возможность работы на нескольких видах топлива. Область их применения чрезвычайно широка – от стационарных и плавучих электростанций базовой нагрузки до предоставления услуг по обеспечению динамической устойчивости сети и пиковой нагрузки, компенсации значительных ко-

лебаний ветровой и солнечной энергии, а также самых разнообразных промышленных применений для автономного производства электроэнергии.

К преимуществам ГПЭС и мини-ТЭС относят:

- низкая стоимость вырабатываемой электроэнергии и тепла;
- КПД мини-ТЭС достигает 88–92 % [2];
- многотопливность;
- гибкость в конструкции, исполнении и использовании, широкий выбор технологических схем для получения электроэнергии, тепла в виде пара/горячей воды или холода;
- возможность максимально приблизить производство энергии к потребителям, а следовательно, сократить протяженность сетей, снизить затраты на их строительство и содержание;
- быстрая окупаемость [1];
- низкий расход топлива, большой моторесурс и долговечность;
- экологическая безопасность;
- высокая ремонтпригодность [3].

Мотивации использования ГПЭС и мини-ТЭС следующие:

- высокие затраты на подвод электроэнергии и тепла;
 - ограниченные возможности централизованных источников электроэнергии и тепла при расширении мощностей;
 - риск нарушения технологии или непрерывности технологических процессов из-за критического качества и количества получаемой электроэнергии и тепла;
 - в случаях, когда затраты на штрафы за выбросы в атмосферу попутного газа и прочих продуктов при нефтедобыче сопоставимы со стоимостью оборудования электростанции;
 - низкая себестоимость топлива для нефтегазовых компаний и возможность реализации электроэнергии и тепла;
 - возможность снижения зависимости от роста тарифов на электроэнергию и тепло;
- К основным недостаткам можно отнести:
- довольно низкую мощность (до 300–400 МВт) [2].
 - более дорогие смазочные материалы. [1]

Отдельно стоит рассказать о причинах столь высокого КПД ГПЭС (почти в 2 раза выше, чем на промышленных ТЭС) [1].

На ГПЭС используют несколько типовых конструктивных решений, которые позволяют получать не только электрическую энергию, но и пар, горячую и холодную воду.

В частности, различают когенерацию и тригенерацию. При работе газопоршневой установки в режиме когенерации выработка электрической энергии является приоритетной задачей работы установки. Выработка (утилизация) тепловой энергии пропорциональна степени загрузки машины (количеству вырабатываемой электроэнергии). При превышении тепловой мощности, вырабатываемой электростанцией, над мощностью потребления, неиспользованная или лишняя часть попутного тепла газопоршневых установок сбрасывается в атмосферу. При обратной ситуации, при дефиците тепла, утилизируемого с газопоршневой установки, когда требуемая электрическая нагрузка меньше тепловой, проблему нехватки тепла решают путем установки дополнительных водогрейных или паровых котлов параллельно с системой утилизации тепла установки когенерации.

Режим когенерации является наиболее экономически целесообразным способом выработки энергоресурсов, повышая общий КПД когенерационных установок свыше 90 %. Система утилизации тепла газопоршневых электростанций позволяет снимать попутное

тепло от работающего двигателя с помощью теплообменников и котлов-утилизаторов, а также получить тепловую энергию необходимых параметров:

- горячая вода, стандартный температурный график 90/70 °С (водогрейные теплообменники и котлы-утилизаторы). При необходимости параметры можно повысить с помощью пиковых котлов;
- насыщенный пар стандартных параметров (паровые котлы-утилизаторы). При необходимости пар можно сделать перегретым при помощи пароперегревателей.

Наибольшее распространение получили водогрейные системы утилизации тепла когенерационных установок – это наиболее простые и оптимальные решения, основанные на использовании пластинчатых теплообменников и котлов-утилизаторов (КУ), нагревающих сетевую воду.

Помимо режима когенерации с одновременной выработкой двух энергоресурсов на газопоршневой установке можно с помощью специально установленного оборудования организовать режим *тригенерации* – одновременной выработки трех энергоресурсов – электроэнергии, тепла и холода.

Тригенерационные установки являются очень выгодным оборудованием в сфере малой распределенной генерации, так как позволяют использовать утилизированное с газопоршневых установок тепло не только зимой в целях отопления, но и летом для кондиционирования помещений или охлаждения в технологических нуждах. Тем самым повышается общий КПД установки, которая в таких условиях может использоваться круглый год, сохраняя высокую эффективность.

Для целей тригенерации используются абсорбционные бромисто-литиевые холодильные установки (АБХМ), предназначенные для отбора и удаления избыточного тепла от тепловых агрегатов и поддержания заданного оптимального температурного и теплового режимов. В качестве абсорбента в них используются различные растворы. Часть тепла, утилизируемого от ГПУ, подается в АБХМ для генерации холода. Холод может использоваться как для охлаждения воды, так и в системах кондиционирования, или на технологические нужды.

Литература

1. Режим доступа: <http://www.turbine-diesel.ru>. – Дата доступа: 14.03.2021.
2. Режим доступа: <https://www.wartsila.com>. – Дата доступа: 14.03.2021.
3. Официальный сайт 9-й Международной выставки «Нефть и газ» MIOGE/2017 / Каталог. – М., 26–29 июля 2007 г. – Режим доступа: <http://www.mioge.ru>.

РЕКУПЕРАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ЗДАНИЙ

О. А. Кныш

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

Научный руководитель Н. А. Вальченко

Объектом исследования являются теплоутилизационные установки системы вентиляции.

Цель работы – обоснование энергосбережения в системе приточно-вытяжной вентиляции здания за счет рекуперации тепловой энергии вентиляционных выбросов.

Произведена оценка эффективности применения теплоутилизационного устройства в системе вентиляции зданий, в результате которого рекуперативный тепло-

утилизатор обеспечивает нагрев приточного атмосферного воздуха до требуемой температуры без использования калорифера.

Расчетные показатели вытяжной системы даны в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные показатели вытяжной системы

Параметр	Оборудование	
	Тепло-утилизационная установка	Тепло-насосная установка
Температура вытяжного воздуха:		
начальная, °С	24	24
конечная, °С	8	4
Плотность воздуха, кг/м ³ при 24 °С	1,189	1,189
Расход воздуха, кг/ч	17027,7	17027,7
Теплоемкость воздуха, кДж/кг °С	1,0407	1,0407
Часовой расход тепла, Q , кДж/ч	283531,1	354413,9
Расход тепла, Q , кВт	78,8	98,8
Часовой расход тепла, Q , Гкал/ч	0,1	0,1
Число часов работы в сутки, ч/сут	14	14
Суточный расход тепла, Q , Гкал/сут	0,95	1,18
Число часов работы в месяц, ч/мес.	280	280
Общее количество сэкономленной тепловой энергии, ΔQ , кВт	14,8	

Тепловая мощность теплоутилизатора для каждого i -го часа его работы, Гкал/ч:

$$Q_{i,m,y} = 0,24 \cdot \varepsilon_{tot} (t_{i,l} - t_{i,bxt}) c L_{i,bxt} \cdot 10^{-6} =$$

$$= 0,24 \cdot 0,6(18 - (-24)) \cdot 4,19(14142,61 - 10656,56) 10^{-6} = 0,088,$$

где $L_{i,bxt} = L_i - L_{i,r}$ – расход наружного воздуха для каждого i -го часа работы системы, м³/ч; ε_{tot} – тепловая эффективность теплоутилизатора, принимается равной для роторных регенеративных теплоутилизаторов 0,6–0,7.

Общее количество сэкономленной тепловой энергии, полезно возвращаемое теплоутилизатором в течение года:

$$\Delta Q = 14,8 \text{ кВт} = 57,44 \text{ Гкал/год.}$$

При использовании теплоутилизатора возрастают потери давления в системе вентиляции по тракту приточного и удаляемого воздуха. Вызванные этим дополнительные затраты электрической энергии равны, тыс. кВт · ч:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P \frac{L_{cp.in}}{3600 \cdot \eta_{в,y}} z \cdot 10^{-6} = 400 \frac{10656,56}{3600 \cdot 0,95} 188 \cdot 24 \cdot 10^{-6} = 5,62.$$

Экономия топлива в результате внедрения энергосберегающего мероприятия составит, т у. т.:

$$\begin{aligned}\Delta B_{\text{т}} &= \Delta Q \cdot b_{\text{т.э}} \left(1 + \frac{k_{\text{пот}}^{\text{т.э}}}{100} \right) - \Delta \mathcal{E} \cdot b_{\text{э.э}} \left(1 + \frac{k_{\text{пот}}^{\text{т.э}}}{100} \right) = \\ &= 57,44 \cdot 0,1665 \left(1 + \frac{9,37}{100} \right) - 5,62 \cdot 0,287 \left(1 + \frac{7,69}{100} \right) = 8,72.\end{aligned}$$

Приведем расчет срока окупаемости внедрения мероприятия. Капитальные вложения, связанные с внедрением теплоутилизатора, по сравнению с установками без него определяются по укрупненным показателям, исходя из следующих предпосылок:

- стоимость оборудования и материалов, $C_{\text{об}}$, определяется проектно-сметной документацией и уточняется по результатам тендерных торгов на его поставку, р.;
- стоимость проектных работ принимается равной 5–10 % от стоимости строительно-монтажных работ (СМР), $C_{\text{с.-м.р}}$, р.;
- стоимость СМР – 25–30 % от стоимости оборудования и материалов, р.;
- стоимость пуско-наладочных работ – 3–5 % от стоимости оборудования и материалов, р.

Определим капиталовложения в мероприятие, р.:

$$\Delta K = C_{\text{об}} \cdot 0,1 + C_{\text{с.-м.р}} \cdot 0,3 + C_{\text{об}} \cdot 0,05 = 17500 + 1750 + 5250 + 875 = 25375.$$

Рассчитаем статический срока окупаемости мероприятия:

$$Cp_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{\Delta B_{\text{т}} \cdot C_{\text{топл}}} = \frac{25375}{8,72 \cdot 215 \cdot 2,35} = 5,76 \text{ лет.}$$

Представим динамический срок окупаемости мероприятия.

Определение чистой приведенной стоимости представлено в табл. 2.

Таблица 2

Определение чистой приведенной стоимости

t , год	Поток наличности, P_t , рублей	Дисконтный множитель, $dt = (1+r)^{-t}$	Дисконтированный поток наличности, D_{ct} , р.	Чистая интегральная дисконтированная стоимость, ЧДС, р.
0	-25375	1	-25375	-25375
1	4405,78	0,9280742	4088,89	-21286
2	4405,78	0,8613218	3794,79	-17491
3	4405,78	0,7993706	3521,85	-13969
4	4405,78	0,7418753	3268,54	-10701
5	4405,78	0,6885153	3033,45	-7667
6	4405,78	0,6389933	2815,26	-4852
7	4405,78	0,5930333	2612,77	-2239
8	4405,78	0,5503789	2424,85	185,41
9	4405,78	0,5107925	2250,44	2435,8
10	4405,78	0,4740533	2088,58	4524,4

Динамический срок окупаемости рассчитывается следующим образом:

$$T_{\text{ок.ст}} = t - \frac{\text{ЧДС}_t}{\text{ЧДС}_{t+1} - \text{ЧДС}_t} = 7 - \frac{-2239}{185,41 - (-2239)} = 7,92 \text{ лет.}$$

Аналогично производится расчет для теплового насоса.

Результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета

Параметр	Оборудование	
	Тепло-утилизационная установка	Тепло-насосная установка
Тепловая мощность, $Q_{i.t.y}$, Гкал/ч	0,088	0,085
Общее количество сэкономленной тепловой энергии, ΔQ , Гкал/год	57,44	57,44
Затраты электрической энергии, $\Delta Э$, тыс. кВт · ч	5,62	8,58
Экономия топлива в результате внедрения энергосберегающего мероприятия, ΔB_t , т у. т.	8,72	7,81
Капиталовложения в мероприятие, ΔK , р.	25375	26187
Статический срок окупаемости мероприятия, $\Delta C p_{\text{ок}}$, лет	5,76	6,64
Динамический срок окупаемости мероприятия, $T_{\text{ок.ст}}$, лет	7,92	9,69

Как следует из табл. 3, сравниваемое оборудование является энергоэффективным и экономически эффективным. Однако теплоутилизационная установка в результате внедрения экономит топлива в 1,12 раз больше, а сроки окупаемости – в 1,2 быстрее, чем у теплонасосной установки.

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ГОМЕЛЯ

А. А. Шкробот

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

В современном мире вода – один из важнейших факторов, определяющих размещение производственных сил, а очень часто и средство производства.

Водные объекты, располагающиеся на территории Гомеля и Гомельской области, являются основными источниками воды в промышленной деятельности населения.

Цель данной работы – изучение состояния воды в гомельских городских и областных водоисточниках и влияния исходных показателей качества воды на выбор схемы химводоочистки. В соответствии с целью исследования в работе решались следующие задачи: опытным путем осуществить мониторинг состояния воды в весенний, летний, осенний и зимний периоды времени в р. Сож, Днепр, Припять; про-

вести сравнительный анализ основных химических показателей воды в различные сезоны года; оценить влияние основных показателей качества воды на выбор схемы очистки.

Отбор проб осуществлялся в течение 12 месяцев – с марта 2019 г. по февраль 2020 г. Объектами исследования являлись крупнейшие реки Гомеля и Гомельской области: Сож, Днепр и Припять.

Места отбора проб: р. Сож – г. Гомель (в районе водозабора ТЭЦ-1); р. Днепр – г. Речица; р. Припять – г. Мозырь.

Таблица 1

Основные характеристики водоисточников

Название реки	Длина, км	Площадь водосбора, км ²	Средний расход воды, м ³ /с	Средний уклон русла, %
Сож	648	42100	219,0	0,17
Днепр	2285	504000	1670,0	0,08
Припять	775	12100	450,0	0,1

Исследования проводились с помощью водно-химической экспресс-лаборатории ВХЭЛ в соответствии с общепризнанными стандартными методиками.

Были определены следующие основные показатели качества воды: цветность, водородный показатель, прозрачность и мутность, щелочность, общая жесткость, железо общее, содержание нитратов и хлоридов, содержание кислорода, фосфаты. При анализе полученных результатов были выявлены значительные изменения контролируемых показателей в различные сезоны года.

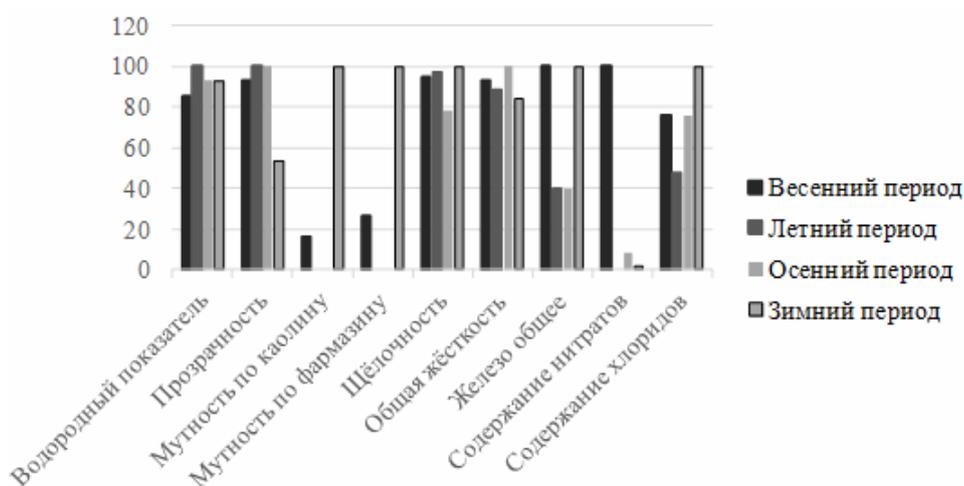


Рис. 1. Основные показатели качества реки Сож

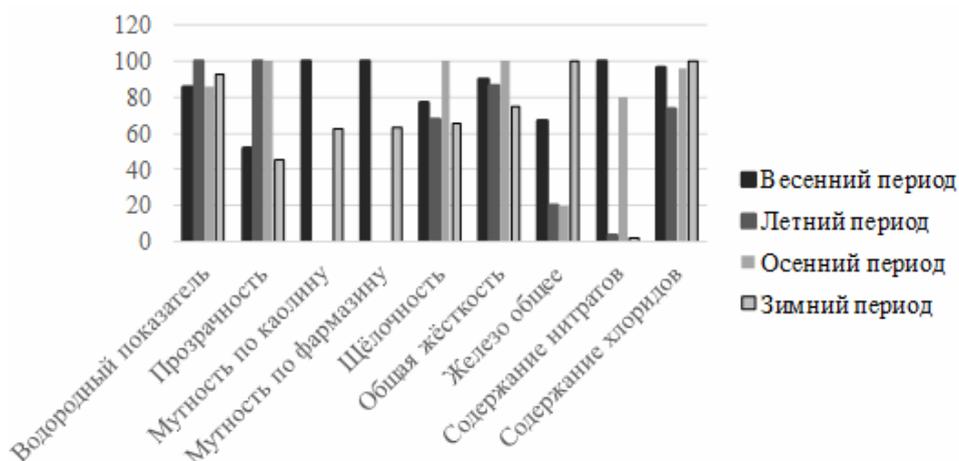


Рис. 2. Основные показатели качества реки Днепр

Сравнение приведенных характеристик воды показывает, что в весенний период показатели качества воды хуже. Это обусловлено поступлением талой воды в наземные источники. В период снеготаяния вся грязь с берегов смывается в водоемы, особенно, если по берегам находятся промышленные или сельскохозяйственные предприятия. Поэтому во время половодья поверхностные воды больше, чем обычно, насыщаются токсичными веществами промышленного и хозяйственно-бытового происхождения: нефтепродуктами, пестицидами, гербицидами, нитратами, фенолами, тяжелыми металлами, реагентами. Из-за смываемых в воду органических соединений повышается ее мутность и цветность.

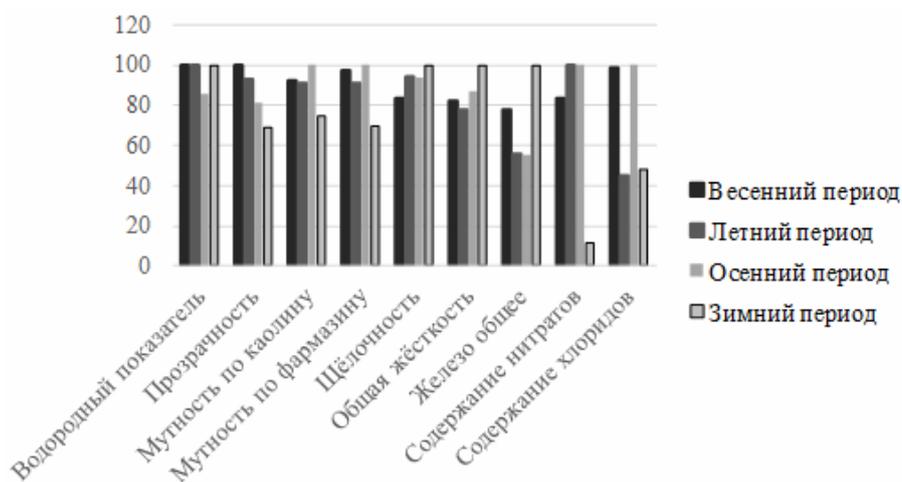


Рис. 3. Основные показатели качества реки Припять

На рис. 3 наблюдаются колебания показателей качества воды по сезонам. Вероятно, это связано со значительными разовыми вредными выбросами промышленными предприятиями, расположенными вблизи исследуемых водоисточников.

При обессоливании артезианской воды, свободной от органических веществ, железа и взвешенных веществ, схема обессоливающей установки предельно проста – исходная вода подается непосредственно в Н-катионитовые и анионитовые фильтры

I ступени и затем последовательно проходит декарбонизатор, анионитовые и H-катионитовые фильтры II и III ступеней. При обессоливании воды поверхностных источников, содержащей взвешенные вещества, необходима предварительная фильтрация ее на осветительных фильтрах. Если в исходной воде присутствуют органические вещества, то перед обессоливанием необходима коагуляция, так как повышенное содержание в воде органических соединений отрицательно сказывается на работе анионитовых фильтров. Для более полного удаления органических веществ целесообразно в схеме обессоливания иметь фильтры активированного угля. Во избежание загрязнения анионита и питательной воды железо также должно быть возможно более полно удалено перед подачей воды непосредственно на обессоливание. Содержание железа в воде значительно уменьшается в процессе коагуляции. Поэтому этот процесс может быть применен не только для удаления органических веществ, но и железа.

Анализируя полученные результаты, можно утверждать, что значения большинства показателей в р. Днепр превышают показатели других рек в весенний период, в р. Припять – в летний и осенний периоды. В соответствии с показателями качества воды могут быть подобраны рациональные технологические схемы водоочистки.

Выбор оптимальных схем очистки воды обусловлен многообразием находящихся в воде примесей и высокими требованиями, предъявленными к качеству очистки воды. При выборе способа очистки примесей необходимо учитывать качественный состав воды. Действующие системы водоочистки не всегда соответствуют современному качеству исходной воды, так как показатели качества воды в поверхностных источниках испытывают значительные колебания в зависимости от сезонов года и годов наблюдения.

Литература

1. Игнатенко, О. В. Оценка качества поверхностных вод Братского водохранилища по гидрохимическим показателям / О. В. Игнатенко Д. Ф. Барташук // Тр. Братского гос. ун-та. – 2012. – Т. 1. – С. 105–110.
2. Смирнова, Т. Б. Сравнение показателей качества воды Иртыша и Оми зимнего периода / Т. Б. Смирнова, Л. В. Кочергина // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»), Омск, 2015 г. / ФГБОУ ВПО «СибАДИ». – Омск, 2015. – С. 1334–1338.
3. Говорова, Ж. М. Обоснование и разработка технологий очистки природных вод, содержащих антропогенные примеси : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.04 / Ж. М. Говорова. – М., 2004. – 389 с.
4. Найманов, А. Я. Обоснование расчетного состава воды при выборе технологической схемы очистки на основании многолетних наблюдений / А. Я. Найманов, А. С. Трякина // Вісн. Донбас. нац. акад. будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 5 (115). – Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 59–67.
5. Родина, А. О. Обоснование показателей качества поверхностных вод при выборе водоочистных технологий с применением теории риска : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / А. О. Родина. – Вологда, 2005. – 153 с.
6. Трякина, А. С. Разработка рациональной технологии водоочистки с применением научно обоснованных расчетных показателей качества исходной воды / А. С. Трякина // Зап. горного ин-та. – 2017. – Т. 227. – С. 608–612.
7. Somani, S. B. Disinfection of water by using sodium chloride and sodium hypochlorite / S. B. Somani, N. W. Ingole, N. S. Kulkarni // Journal of Engineering Research and Studies. – 2011. – Vol. II, is. IV. – P. 40–43.

ПОВЫШЕНИЕ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА БЕНЗИНА И ЦЕТАНОВОГО ЧИСЛА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Е. С. Найден, А. Г. Круталевич

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

Основной характеристикой бензинов является детонационная стойкость, оцениваемая октановым числом. Бензин с большим октановым числом – более стойкий к детонации, т. е. будет взрываться только при определенных условиях, которые возникают в блоке цилиндров. Основной показатель дизельного топлива – это цетановое число. Цетановое число характеризует способность топлива к воспламенению в камере сгорания и равно объемному содержанию цетана в смеси с α -метилнафталином, которое в стандартных условиях имеет одинаковую воспламеняемость по сравнению с исследованным топливом.

Для повышения октанового числа бензина используют такие методы, как каталитический крекинг, каталитический риформинг, а также добавление присадок – тетраэтилсвинец, метилтретбутиловый эфир и этиловый спирт.

Одним из основных методов повышения цетанового числа дизельного топлива является способ разделения мазутов на дистиллятную и остаточную части в виде процесса деструктивно-вакуумной перегонки (ДВП) мазутов. Широко известный способ – использование присадок, подобно тому, как используется тетраэтиловый свинец для повышения октанового числа бензинов.

Целью работы является экспериментальное исследование способов повышения октанового числа бензина и цетанового числа дизельного топлива. Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи: изучить состав и свойство бензина и дизельного топлива; проанализировать существующие способы повышения октанового числа бензина и цетанового числа дизельного топлива; экспериментальным путем определить влияние добавление изопропанола в бензин и дизельного топлива.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Топливо и теория горения» ГГТУ им. П. О. Сухого с использованием октанометра ОКТАН-ИМ, предназначенного для оперативного контроля качества топлив, их компонентов и смесей.

Бензин – горючая смесь легких углеводородов с температурой кипения от +33 до +205 °С. Температура замерзания – около –60 °С в случае использования специальных присадок. Бензин, как известно, получают из нефти. Если нагревать нефть при атмосферном давлении, то сначала из нее испаряются самые легкие углеводороды, а по мере повышения температуры – все более и более тяжелые. Конденсируя их по отдельности, получаем разные фракции; те из них, которые выкипали в диапазоне температур от 35° до 205 °С, считаются бензином (рис. 1).

Виды бензина даны в табл. 1.

Таблица 1

Виды бензина

Вид бензина	Марка
Нормаль	АИ-80
Регуляр	АИ-92
Премиум	АИ-95

Окончание табл. 1

Вид бензина	Марка
Супер	АИ-95+
Экстра	АИ-98
ЭКТО	АИ-100

Дизельное топливо – жидкий продукт, получаемый из керосиново-газойлевых фракций прямой перегонки нефти при температурах 265–360 °С (рис. 2).

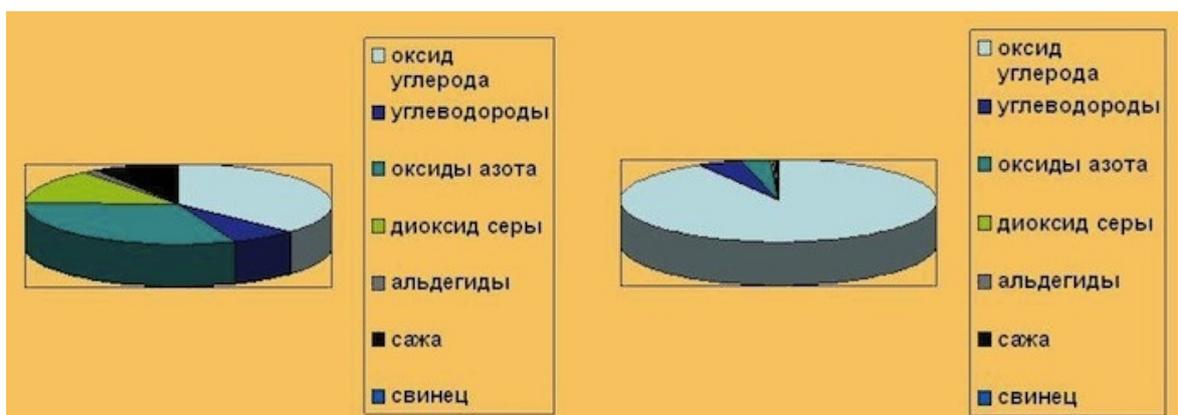


Рис. 1. Состав бензина

Рис. 2. Состав дизельного типа

Были приняты попытки повышения октанового числа бензина и цетанового числа дизельного топлива посредством добавления изопропанола. В качестве исследуемых видов топлива выбран бензин А-92 и дизельное топливо зимнее.

Изопропанол (изопропиловый спирт, пропанол-2, втор-пропанол, диметилкарбинол, C_3H_8O , $CH_3CH(OH)CH_3$) – это органическое соединение, простейший вторичный одноатомный спирт алифатического ряда.

При нормальных условиях изопропанол – прозрачная, бесцветная жидкость с резким характерным запахом и мягким горьким вкусом, типичным для спиртов с короткой углеводородной цепью. Хорошо растворяет многие эфирные масла, алкалоиды, некоторые синтетические смолы и другие химические соединения. Растворяет некоторые виды пластмасс и резины. Растворим в ацетоне, хорошо растворим в бензоле, с остальными растворителями (вода, органические) смешивается в любых соотношениях. Изопропанол получают методами гидрирования ацетона и гидратации пропилена.

Результаты экспериментального исследования бензина А-92 в составе с изопропанолом приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

**Результаты экспериментального исследования бензина А-92
в составе с изопропанолом**

Бензин + изопропанол	Величина октанового числа	
	ОЧИ	ОЧМ
Без добавления изопропанола (100 мл бензина), %	92,4	83,4
5 мл (5)	94,8	84,5
10 мл (10)	96,4	86,1
15 мл (15)	96,7	87,5
20 мл (20)	98,9	88,3
25 мл (25)	102	91,7
30 мл (30)	108	96,2

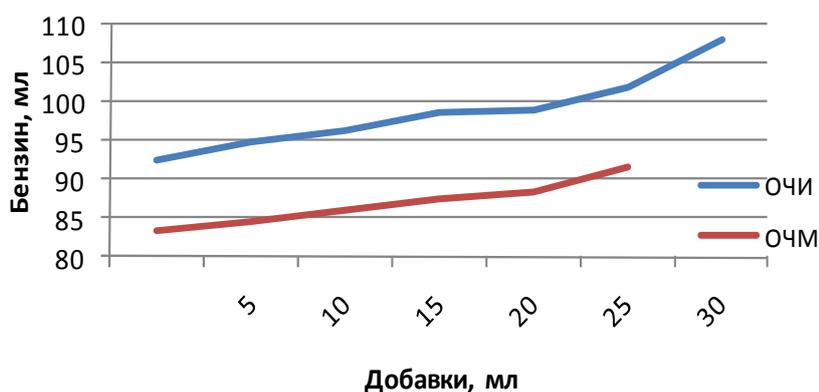


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования бензина А-92
в составе с изопропанолом

Результаты экспериментального исследования дизельного топлива зимнего в составе с изопропанолом представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

**Результаты экспериментального исследования дизельного топлива зимнего
в составе с изопропанолом**

Дизельное топливо + изопропанол, мл	Величина цетанового числа
Без добавления	48,7
1	48,7
2	49,1
3	48,6
4	48,8

Окончание табл. 3

Дизельное топливо + изопропанол, мл	Величина цетанового числа
5	49
6	53,4
7	53
8	52,5
9	52,1
10	52,7
11	52,9
12	49,7
13	50,8
14	51,7



Рис. 4. Результаты экспериментального исследования дизельного топлива зимнего в составе с изопропанолом

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Изучили существующие способы повышения октанового числа бензина и цетанового числа дизельного топлива. В ходе экспериментальных исследований получили способ повышения октанового числа бензина и цетанового числа дизельного топлива посредством добавления изопропанола. Наибольшее октановое число бензина (АИ-92) было обнаружено в смеси с 30 % изопропанола, а наибольшее цетановое число дизельного топлива – в смеси с 6 % изопропанола.

Литература

1. Бегак, О. Ю. Повышение цетанового числа дизельных топлив / О. Ю. Бегак, А. М. Сыроежко // Журн. приклад. химии. – 2003. – Т. 76, вып. 8. – С. 1389–1391.
2. Способ превращения углеводородов во фракцию, имеющую улучшенное октановое число, и фракцию с высоким цетановым числом : пат. Энститю Франсэ дю Петроль (FR), 2008 / П. Брю [и др.] ; Юрид. фирма «Городиский и Партнеры» ; пат. пов. Е. Е. Назина. – № 517. – С. 1–14.

**ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ
ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ****М. А. Вегера, К. Е. Коршунов, И. Д. Костюченко***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель С. А. Чудиловская

Одним из важных этапов решения ряда практических задач энергосбережения является расчет теплового потока через какую-либо поверхность при различных видах теплообмена. В случае, когда теплоноситель жидкий или газообразный, перенос тепла происходит одновременно за счет конвекции и теплопроводности. Такой перенос тепла называется конвективным теплообменом.

Для расчета количества тепла, переносимого при конвективном теплообмене, необходимо знать профиль распределения и градиент температур, а также распределение их вдоль всей поверхности стенки.

На практике эти величины сложно определить или с достаточной точностью описать адекватными зависимостями. Поэтому для практических расчетов используют упрощенную зависимость – закон охлаждения Ньютона–Рихмана (уравнение теплоотдачи): $dQ = \alpha dF (t_{ст} - t_{ж}) dt$, где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); F – площадь поверхности теплоотдачи (отдающей или принимающей тепло стенки), м²; $t_{ж}$ и $t_{ст}$ – температуры теплоносителя и поверхности стенки соответственно, К.

Коэффициент теплоотдачи показывает, какое количество тепла передается от стенки единичной площади в единицу времени при единичной разности температур стенки и теплоносителя. Коэффициент теплоотдачи – сложная функция многих переменных. Поэтому универсального уравнения для определения его не существует.

При проведении практических расчетов интенсивности конвективного теплообмена используют критериальные и эмпирические уравнения. Данные уравнения получают в результате обработки экспериментальных данных по теплоотдаче. Для процессов конвективного теплообмена в однофазной жидкости характерны числа подобия, которым присвоены имена выдающихся ученых.

Конвективный теплообмен, при котором не происходит изменения агрегатного состояния теплоносителя, имеет огромное множество разновидностей. Эти разновидности могут отличаться характером конвекции, режимами движения теплоносителя, формой и характерными размерами объекта, в котором протекает процесс, а также другими факторами.

В научной и справочной литературе приведено множество зависимостей для расчета коэффициента теплоотдачи: при поперечном обтекании пучков труб, смешанном их обтекании, при механическом перемешивании жидкости, при пленочном течении жидкости по стенкам каналов и поверхностям пластин, при движении теплоносителя вдоль плоских и ребренных поверхностей, при его свободной конвекции и т. д.

Для каждого конкретного случая теплоотдачи при расчетах коэффициента теплоотдачи используют свое конкретное эмпирическое или критериальное уравнение. Например, уравнение подобия для расчета теплоотдачи при продольном омывании пластины

Для автоматизации расчетов коэффициента теплоотдачи создан онлайн-калькулятор, который позволяет определить коэффициенты теплоотдачи для наиболее распространенных случаев: плоской поверхности, внутренней и наружной стенки трубы, а также сделать расчет коэффициента теплоотдачи наружной поверхности группы параллельных труб.

Для расчета необходимо задать определяющие размеры поверхностей, их температуру, температуру теплоносителя, скорость потока а также такие характеристики рабочей среды, как динамическая вязкость, плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость.

Существуют и другие виды онлайн-калькуляторов. Как видим, здесь приведены только наиболее распространенные случаи конвективного теплообмена, мы же в дальнейшем планируем охватить все описанные в литературе варианты (существует их более 10).

Вышеуказанное рассмотрим на примере задачи, решение которой реализовано с помощью нашего программного кода. Заданные значение в этой задаче могут изменяться.

Программа, разработанная нами (рис. 1), позволяет оптимизировать процесс вычислений за счет того, что все необходимые справочные данные выбираются автоматически. Для расчета необходимо задать только те значения, которые изменяются в зависимости от случая пользователя. Кроме того, она позволяет проводить расчет, не имея доступа к сети «Интернет», также минимализирует затраченное время пользователя.

Данная программа была создана в среде разработки Delphi. Расчет происходит следующим образом: пользователь вводит данные в поля для ввода и нажимает на кнопку.

После чего программа считывает их и производит расчеты по заданным формулам. В программу встроена таблица значений, зависящих от температуры, которые также необходимы для расчетов.

Нашей командой планируется дальнейшая разработка программы для упрощения расчетов при абсолютно разных условиях, материалах, типов потока воздуха, формы стенки и т. п.

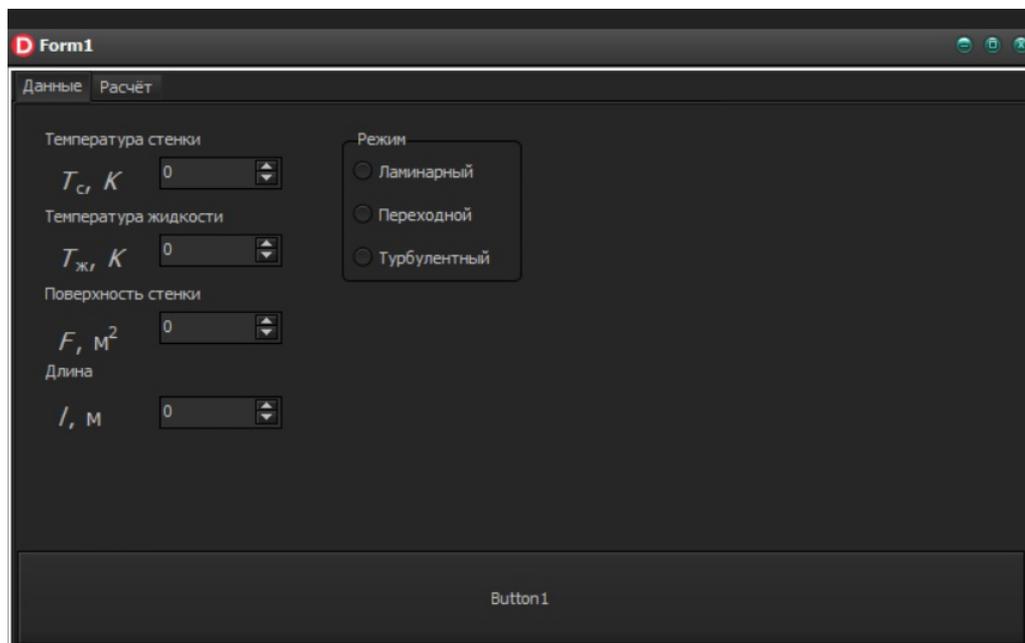


Рис. 1. Разработанная программа

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ ХЛОРЕЛЛЫ КАК СПОСОБ РАЗВИТИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

М. Оразбердиева, М. Аннаев, К. Гурдов, Дж. Анныев

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Одним из основных причин изменения климата является выброс в атмосферу в больших количествах вредных углекислых газов. Это происходит за счет увеличения с каждым годом потребностей населения в электрической энергии, роста количества населения, увеличения количества производственных и промышленных предприятий. В результате выбросов в атмосфере накапливаются парниковые газы, что вредно для жизнедеятельности человека, флоры и фауны и экологии в целом. С целью устранения или уменьшения этих негативных влияний возникает необходимость внедрения в производство перерабатывающих безотходных технологий.

Целью данной научной работы является культивирование штамма одноклеточной водоросли *Chlorella vulgaris* IFR № C-111 (далее – хлорелла) в трубчатом фотобиореакторе, а также изучение влияния на плотность хлореллы температуры окружающей среды и питание углекислым газом в периоде ее выращивания.

Очень велика роль одноклеточной водоросли хлореллы в уменьшении парниковых газов, выброшенных в атмосферу. Она во время своего роста потребляет углекислый газ (CO_2), а выделяет кислород (O_2). Хлорелла при впитывании 1 кг углекислого газа выделяет 727,3 г кислорода. Значит, используя углекислый газ, являющийся одним из вреднейших газов, выбрасываемых в воздух, она создает возможность получить экологически чистый и безотходный продукт.

Хлорелла – это микроскопическое водное растение, представитель зеленых водорослей. Используя суспензию хлореллы в рационе кормов сельскохозяйственных животных, можно добиться увеличения их веса на 35–40 % и сохранности поголовья до 99 %. Основной причиной такого результата можно назвать то, что хлорелла является уникальным биологическим продуктом. Ни одно из других растений, растущих в воде и на земле, не имеет свойство содержать в своем составе такое большое количество полезных компонентов.

В Туркменистане изучать *Chlorella vulgaris* начали еще в Институте Солнца Академии наук Туркменистана, где основным направлением работы стало их быстрое размножение в условиях Туркменистана, а объектом исследования был *Chlorella vulgaris* штамма ЛАРГ-3. Результаты работ опубликованы в книге под редакцией Л. Е. Рыбаковой «Использование солнечной энергии» в 1985 г.

Для нормального роста, созревания хлореллы и получения хорошего плода в основном достаточно света, тепла и углекислого газа. Поэтому очень выгодно выращивать хлореллу. Она в отличие от других наземных растений нетребовательна к почве и минеральным удобрениям. Так в отличие как хлореллу можно вырастить в аквариумах водохранилищ или специальных фотобиореакторах, то для нее подходят и необработанные земли или непригодные в сельском хозяйстве земли [1].

При недостатке углекислого газа процесса фотосинтеза не происходит, уменьшается количество и хлорофилла, и клеток хлореллы, и запасных пищевых веществ, в основном сокращается количество углерода на 1,5 раз. В то же время при обогащении состава подаваемого воздуха углекислым газом до 1,5–2 % его продуктивность еще больше увеличивается.

Получение энергоносителей из микроводорослей окажет гораздо меньшее воздействие на окружающую среду и продовольственную безопасность, чем из зерновых культур. Биомасса микроводорослей имеет высокую калорийность, низкую вяз-

кость и низкую плотность, повышенное содержание топливопригодных липидов в биомассе [2].

Главные преимущества микроводорослей [3]–[4]:

- высокая конверсионная эффективность фотонов (приблизительно 3–8 % против 0,5 % для наземных растений), которая дает возможность получать более высокие урожаи биомассы на гектар), и высокий рост клеток микроводорослей;

- высокая емкость поглощения углекислого газа;

- нетребовательны к качеству воды для роста, поэтому для их культивирования можно использовать сточные, загрязненные, соленые и другие воды;

- могут использовать в процессе жизнедеятельности азот и фосфор из различных источников сточных вод (например, сельскохозяйственные стоки, промышленные и муниципальные сточные воды), обеспечивая дополнительную выгоду биологической очистки сточных вод;

- для выращивания микроводорослей можно использовать пахотно непригодные, пустынные и засоленные земли, не подходящие для сельскохозяйственного производства пищевой продукции;

- производство несезонное, и сырье можно получать партиями почти круглый год;

- можно культивировать без использования удобрений и пестицидов;

- могут являться сырьем для широкого спектра продуктов (например, белки, полисахариды, пигменты, биополимеры, корма, удобрения и др.);

- организация производства биомассы микроводорослей не требует сложного оборудования и высокого уровня автоматизации производства.

В данной научной работе рассматриваются возможности выращивания путем использования возобновляемых источников энергии экологически чистой водоросли «Хлорелла вульгарис», ускоряющей рост животных, рыб и птиц, также растений в сельском хозяйстве и служащей полноценным пищевым веществом, способствующим повышению их устойчивости к болезням. Изучается влияние на ее плотность температуры окружающей среды и количества подаваемого углекислого газа (CO_2).

Культивирование *Chlorella vulgaris* IFR № С-111 в трубчатом фотобиореакторе представлено на рис. 1.



Рис. 1. Культивирование *Chlorella vulgaris* IFR № С-111 в трубчатом фотобиореакторе

Выполненная научно-исследовательская работа по выращиванию хлореллы была проведена на экспериментальной площадке научно-производственного центра «Возобновляемые источники энергии». Для этого использовался фотобиореактор в виде трубы с объемом 250 л, на этом оборудовании была выполнена работа с беспрерывным движением хлореллы в течение – 12 ч при подпитывании ее углекислым газом, проводились измерительные работы по измерению температуры окружающей среды и хлореллы. В работе использовался штамм *Chlorella vulgaris* IFR № C-111, являющийся одноклеточной водорослью. Для выращивания хлореллы была создана питательная среда «Тамия».

Таким образом, для нормального роста, созревания хлореллы и получения хорошего плода в основном достаточно света, тепла и углекислого газа. И так как она нетребовательна к почве и минеральным удобрениям, то хлореллу можно вырастить в водохранилищах, аквариумах или специальных фотобиореакторах, а также на необработанных землях или непригодных в сельском хозяйстве землях.

Влияние количества углекислого газа на плотность суспензии хлореллы показано на рис. 2.

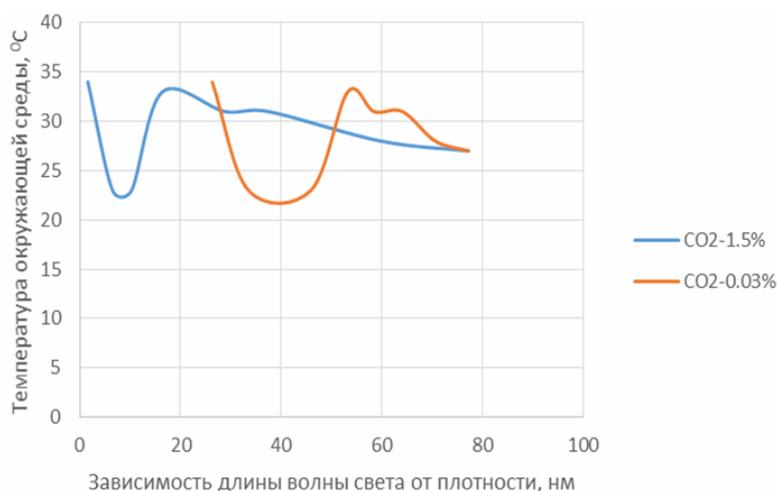


Рис. 2. Влияние количества углекислого газа на плотность суспензии хлореллы

В ходе научно-исследовательской работы во время развития *Chlorella vulgaris* (в течение восьми суток) при установлении температуры, выше 25 °C и подачи углекислого газа в составе воздуха до 1,5 % плотность хлореллы увеличилась до 1,6 нм, а в исследуемом образце (CO₂ – 0,03 %) этот показатель был равен 26,3 нм. В результате этого было установлено, что с повышением количества углекислого газа плотность хлореллы повышается, доказывая свою густоту, питательность, наличие клеток, т. е. высокую урожайность.

Литература

1. Held, P. Determination of Algal Cell Lipids Using Nile Red – Using Microplates to Monitor Neutral lipids in *Chlorella Vulgaris* / P. Held. – Режим доступа: <http://www.biotech.com/resources/articles/nile-red-dye-algal.html>. – Дата доступа: 15.04.2020.
2. Технология получения липидов из микроводорослей / Д. С. Дворецкий [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015.
3. Животноводство. Корм «суспензия хлореллы» для животноводства. – Режим доступа: <http://www.algobiotechnology.com/>.

4. Видоспецифические особенности роста зеленых водорослей при дополнительном углеродном питании. Сообщение 1. Скорость роста зеленых водорослей при максимальном насыщении среды CO₂ в открытой культивационной системе / В. Д. Романенко [и др.] // Гидробиолог. журн. – 2010. – Т. 46, № 1.

DESIGN OF THE HEAT PIPE HELIUM GREENHOUSE

A. Matyakubov, J. Batmanov, A. Agajanov

State Energy Institute of Turkmenistan, c. Mary

This scientific work presents the results of scientific research on the use and accumulation of solar energy for heat supply of a solar greenhouse.

For a real assessment of the problem, the following information can be cited as an example: in a greenhouse with a total area of 234 m² covered with polyethylene film must be installed, on the average, with 6–8 furnaces to provide a certain amount of warm air. One furnace consumes about 2448 m³/h of natural gas for four months, and during this time 8.6 kg of carbon dioxide (CO₂) is emitted from one furnace. As a result, taking into account the payment for the consumption of natural gas, the problem of the cost of the obtained products, energy conservation, and also environmental protection is very urgent.

To solve this problem, a solar greenhouse with an additional heating chamber was constructed at the research site of the State Energy Institute of Turkmenistan. In this structure, excess of solar and heat energy of the soil was accumulated in mountain stones, and carbon dioxide that emits soil (horse manure was used as a soil) was used to feed the *Chlorella vulgaris* suspension grown in the photobioreactor, which in its turn had a beneficial effect on its cultivation. To transfer heated air from the additional heating chamber to the solar greenhouse and the accumulated thermal energy of the soil, polyethylene pipes with holes were used.

Due to the use of the heat capacity of the materials (rock stones), a two-layer coating of the structure, compaction of the northern side with wool and accumulated heat energy, it was possible to achieve a positive temperature in the solar greenhouse in the minus environmental values.

The technologies and processes considered in this research are mainly renewable energies and technical (chemical reactions) solutions such as photovoltaic (PV) modules, phase exchange material (PCM), underground heat storage technologies, energy efficient heat pumps and facade materials for the better heat insulation.

In order to investigate the possibility of heating the greenhouse through heat pipelines, a helium greenhouse with an area of 24 m², and a volume of 54,4 m³ and an additional heat source with an inclination angle of 36° degrees covered with glass cover with an area of 7.5 m², with a volume of 7.5 m³ were installed in the State Energy Institute of Turkmenistan. The drawing of the helium greenhouse is shown in Figure 1 below.

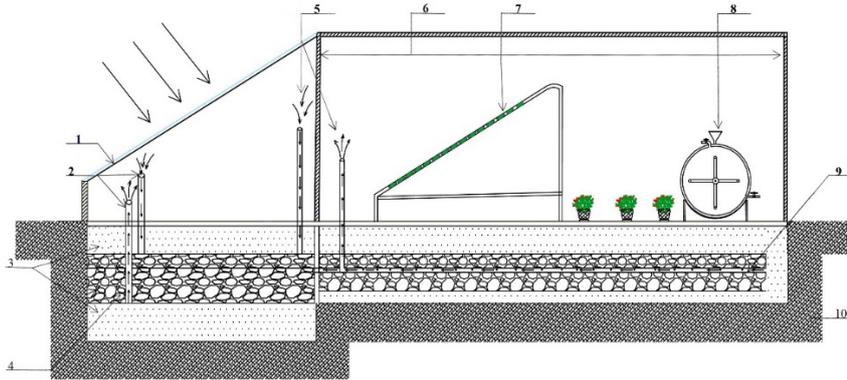


Fig. 1. General drawing of the helium greenhouse:

1 – outer glass cover of the heating chamber; 2 – inlet and outlet of the heat pipe at the bottom of the heating chamber; 3 – course layer; 4 – stone layer; 5 – entrance and exit of heat pipe at the bottom of the greenhouse; 6 – woolly wall; 7 – photobioreactor; 8 – biogas plant; 9 – heat pipes; 10 – soil layer

The amount of heat supplied through the ventilation air, which is calculated by the following expression:

$$Q_{air} = GC_p(T_1 - T_2),$$

where G – mass consumption of air from the fan; kg/hour; C_p – specific heat capacity of air at different temperatures, 0,241 J/kg · K; T_1 – the temperature at the output of the heat pipe °C; T_2 – the temperature at the inlet of the heat pipe, °C.

Mass air consumption from the fan is determined by the following expression:

$$G = V\rho,$$

where V – fan performance, Tidar RQA 12038HSL 220VAC series 170 m³/h [18]; ρ – air density at different temperatures, kg/m³.

The amount of heat transmitted to the greenhouse by solar radiation is calculated by the following expression:

$$Q_{rad} = \eta I_c F_{rad} \tau,$$

where η – the efficiency of the heat conversion of the beam equal to $\eta = 0,7$; I_c – solar radiation intensity, W/m²; τ – the heat transfer coefficient, for a polyethylene film, the coefficient value is assumed to be 0,35. It is estimated that solar radiation reaches half of the roof area:

$$F_{rad} = bL_k,$$

where L_k – typical roof dimensions, 6 m; b – the length of the roof, 4,8 m.

Execution of heat in the soil of the heating chamber for heating the greenhouse. In this method the soil heat of the heating chamber installed in front of the greenhouse was used to heat the greenhouse through the heat pumps.

The measurement and calculation results for the case when Execution of heat in the soil of the heating chamber for heating the greenhouse are shown in table.

Results of measurement and calculation of parameters

T, h	$\Delta T, K$	$\rho, kg/m^3$	$G, kg/h$	Q_{air}, W	$I_c, W/m^2$	Q_{rad}, W	Q_{bal}, W
08.00	2	1.282	217.94	122.08	19.1	135	257.08
10.00	14.1	1.228	208.76	824	221	1560	2374
12.00	15.4	1.222	207.74	896	380	2682	3578.4
14.00	14.1	1.228	208.76	824	536	3780	4604
16.00	6.2	1.263	214.71	373	250	1764	2137
18.00	10	1.246	211.82	592.8	0	0	592.8
20.00	10	1.246	211.82	592.8	0	0	592.8
22.00	10	1.246	211.82	592.8	0	0	592.8
00.00	10.6	1.243	211.31	627.4	0	0	627.4
2.00	12	1.237	210.29	706.8	0	0	706.8
4.00	11.4	1.24	210.8	672.9	0	0	672.9
6.00	10.9	1.242	211.14	644.5	0	0	644.5
8.00	14	1.228	208.76	650.2	23	162.3	812.5

The heat under the heating chamber was pumped through a special heat pump and fed to the underground heat pipelines of the helium greenhouse. In this case, the the effect of the heat amount supplied to the greenhouse on the heat level inside it is shown in Figure 2 below.

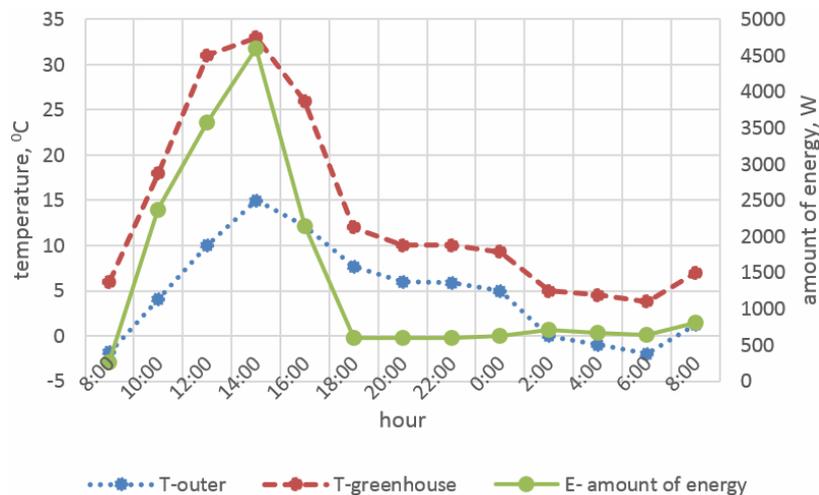


Fig. 2. Time dependence of the heat generated in the greenhouse by the use of heat in the heating chamber

Research work has been carried out in this helium greenhouse and the following results obtained: as can be seen from the dependence, the heating chamber was able to make a difference of at least +5 °C when using the soil temperature. This suggests that it is also important to use a heating chamber with an additional heat source. As also can be seen from the dependence, the temperature inside the greenhouse in the afternoon reaches a

temperature that is airy for the plants, therefore it was intended to collect the accumulated heat. The excess heat in the greenhouse during the day was transferred to the underground rocks through a heat pump, thus maintaining the normal temperature during the day in the greenhouse.

References

1. Кубис, В. А. Проектирование и опыт эксплуатации энергоэффективных теплиц (на примере Пензенской области) : монография / В. А. Кубис. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 128 с.
2. Banik, P. Performance and economic analysis of a floricultural greenhouse with distributed fan-pad evaporative cooling coupled with solar desiccation / P. Banik, A. Ganguly // SolEnergy. – 2017. – Iss. 147. – P. 439–447.
3. Solimon, A. Senior Design project: Hybrid Energy Integrator / A. Solimon, J. Adams, C. Reidl. – Drexel University, 2013.
4. Heat transfer and MLP neural network models to predict inside environment variables and energy lost in a semi-solar greenhouse / M. Taki [et al.] // Energy Build. – 2016. – Iss. 110. – P. 314–329.

ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ И ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПО РАЗВИТИЮ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ТУРКМЕНИСТАНА

О. Б. Сапарлыева

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Государственная программа по энергосбережению на 2018–2024 годы была утверждена Президентом Туркменистана Указом № 14900 от 15 июля 2016 г. согласно плану выполнения намеченных мероприятий для реализации в жизнь Государственной программы повышения результатов научных исследований и инновационных технологий в Туркменистане за период с 2017 по 2021 г.

Основные цели из указанной Государственной программы:

1. Для обеспечения стабильного развития экономики Туркменистана осуществить на высоком уровне рациональное использование энергетической отрасли и природных энергетических ресурсов.
2. В топливных запасах Туркменистана увеличить количество возобновляемых источников энергии, нетрадиционных энергетических ресурсов, видов отбираемого топлива, а также вторичных источников энергии.
3. Использование средств энергетики обуславливает обеспечение охраны окружающей среды, охраны жизни и здоровья населения.

Отдельное внимание уделяется мероприятиям, связанным с разработкой инновационных и ресурсосберегающих технологий.

Развитие ресурсосберегающих технологий является одним из направлений экономического развития Туркменистана. Это технологии, обеспечивающие производство продукции с минимально возможным потреблением топлива и других источников энергии, а также сырья, материалов, воздуха, воды и прочих ресурсов, используемых для технологических целей. Они включают в себя использование вторичных ресурсов, утилизацию отходов, а также рекуперацию энергии, замкнутую систему водообеспечения и др. Позволяют экономить природные ресурсы и избегать загрязнения окружающей среды [1].

Одними из таких технологий являются электростанции с комбинированным циклом. В Туркменистане для производства электроэнергии используются электрические станции с газотурбинными установками разных мощностей. На газотурбинных установках с помощью компрессора всасывается воздух с атмосферы и с повышенным

давлением подается в камеру сгорания. В результате сжигания газозвоздушной смеси в топочной камере образованные выхлопные газы используются для вращения турбины. При вращения турбины в электрическом генераторе производится электрическая энергия. Выходящие выхлопные газы из газотурбины имеют 54÷550 °С температуры. Это показывает, что тепловой энергии достаточно в атмосферном давлении, чтобы преобразовывать воду в пар. Полученный пар можно использовать в производстве электрической энергии. Электростанции, которые таким методом вырабатывают электрическую энергию, называются электростанциями с комбинированным циклом. Во главе Многоуважаемого Президента 8 сентября 2018 г. на территории Марыйской Государственной электростанции была введена в эксплуатацию электростанция с комбинированным циклом мощностью 1574 МВт, работающая на основе вторичных энергоресурсов. На этой электростанции установлено 6 турбин, из которых 4 – газотурбины, а 2 – паротурбины.

Особенностью электростанции с комбинированным циклом является то, что за счет экономии топлива можно увеличить коэффициент полезного действия обычной газотурбинной установки с 32–34 до 56,4 %. С помощью комбинированной электростанции можно экономить природный газ и уменьшить годовое количество вредных выбросов до 3,1 млн т. Внедрение этой электростанции дает возможность увеличить экспорт электроэнергии, создать новые рабочие места, повысить квалификацию рабочих [2].

Технологии по возобновляемым источникам энергии также относятся к ресурсосберегающим технологиям. Большие перспективы этой области и в области охраны окружающей среды в части рационального природопользования имеют достижения биотехнологии. Биотехнология – это область человеческой деятельности, которая характеризуется широким использованием биологических систем всех уровней в самых разнообразных отраслях науки, промышленного производства, медицины, сельского хозяйства и других сферах. Отличается от многих технологий сельского хозяйства, в первую очередь, широким использованием микроорганизмов: бактерий, грибов и водорослей. Это связано с тем, что микроорганизмы способны осуществлять самые разнообразные биохимические реакции. В качестве наиболее эффективного биотехнологического решения, способного сократить выбросы, можно привести получение биогаза при переработке биомассы. В условиях Туркменистана из единой и комбинированной биомассы был получен биогаз и определен его состав. Определенный состав биогаза из единичной биомассы содержит 0,18 % аргона, 24,75 % азота, 9,35 % водорода и 65,77 % метана. Биогаз из комбинированной биомассы содержит 0,1 % аргона, 3 % азота, 10,5 % водорода и 86,4 % метана. Отходы АПК, которые необходимо утилизировать, являются существенным энергетическим ресурсом, так как с разной степенью эффективности возможно получение биогаза почти из всех видов сельскохозяйственных отходов. Таким образом, развитие биогазовой энергетики – это не только возможное решение проблемы отходов, но и энергетических проблем и ресурсосбережения в сельском хозяйстве [5].

Современные комплексы по биотехнологической переработке могут превратить любые биологические отходы (жмых, солому, навоз – любое органическое вещество) в биогаз, который служит источником энергии и востребован в энергетике и промышленности. Использование в качестве топлива биомассы, получаемой на основе отходов сельскохозяйственного и промышленного производства, а также бытовой деятельности, является новым явлением в ресурсосбережении и масштабной энергетике. Биогазовая энергетика – это еще источник дешевых комплексных органических удобрений, которые образуются как субпродукт при производстве биогаза. Биогазовые установки решают проблемы расходов на энергоснабжение, которые составляют значительную

часть затрат предприятий агрокомплекса и пищевой промышленности и водоканалов. Биогазовая установка – надежная и экономически выгодная альтернатива магистральному природному газу и централизованному электроснабжению и защита от возможных сбоев в поставках газа и электроэнергии. Биогазовые технологии полностью решают проблемы утилизации органических отходов, а также сельского хозяйства, обеспечивают развитие новых рентабельных отраслей за счет доступности дешевого тепла и электроэнергии и удобрений. В настоящее время демонстрируются возможности Туркменистана в области производства электроэнергии из биомассы. Также внедряются в жизнь различные проекты и технологии по нахождению экологически чистых источников энергии.

В мире с каждым днем увеличивается количество развивающихся стран и производственных предприятий, и человечество постоянно борется за достойное существование на земле. Но, к сожалению, производственные предприятия в равной степени также влияют на состояние окружающей среды. И поэтому обязанностями каждого из нас являются сохранение биологического строения земли, бережное отношение и охрана окружающей среды от загрязнения, уменьшение количества выброса вредных веществ, рациональное и бережное использование энергоносителей.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Внедрение ресурсосберегающих технологий дает возможность увеличить экспорт электроэнергии и создает новые рабочие места.

2. За счет ресурсосберегающих технологий можно уменьшить годовое количество вредных выбросов в атмосферу.

3. Демонстрируются возможности Туркменистана в области производства электроэнергии из биомассы.

Развитие биогазовой энергетики – это не только возможное решение проблемы отходов, но и энергетических проблем и ресурсосбережения в сельском хозяйстве.

Л и т е р а т у р а

1. Миротворческие мосты в будущее // Туркмен. гос. издат. служба. – А. : ТГИС, 2011.
2. Цанев, С. В. Газотурбинные и паргазовые установки / С. В. Цанев, Д. В. Буров, А. Н. Ремезов. – М., 2002.
3. Гиниятуллина, Э. И. Использование альтернативных источников энергии на производственных предприятиях / Э. И. Гиниятуллина // Поволж. науч. вестн. – 2018. – № 1.
4. Полищук, В. Н. Упрощенный способ определения тепловой ценности биогаза / В. Н. Полищук. – Киев : Нац. ун-т биоресурсов и природопользования Украины, 2016.
5. Мансуров, Р. Е. Технико-экономический анализ возможностей свеклосахарного подкомплекса нижегородской области по выработке биогаза / Р. Е. Мансуров // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. Сер.: Соц. науки. – 2018. – № 4 (52).

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ТЕПЛОТИ З ДИМОВИМИ ГАЗАМИ ПРИ ПІДВИЩЕНІЙ КОНЦЕНТРАЦІЇ КИСНЮ В ДУТЬОВОМУ ПОВІТРІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

А. А. Дяченко

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Науковий керівник П. М. Гламаздін

Актуальність даного дослідження пояснюється потребою модернізації теплоелектростанцій, та як одного з елементів систем станції – енергетичних котлів.

Мета дослідження: підвищення енергетичної ефективності парових котлів за допомогою інтенсифікації процесів горіння в топці шляхом збагачення дуттьового повітря киснем.

Джерелами, що розкривають теоретичні основи збагачення дуттьового повітря киснем, стали статті [1]–[16].

Інститути Польщі, Китаю, Швеції, Фінляндії [1]–[5] розглядають процес в сукупності інтенсифікації процесів горіння та проблеми шкідливих викидів на спеціально розроблених енергетичних установках надкритичних параметрів для спалювання вугілля при 100 % концентрації кисню в псевдозрідженому шарі без фронту полум'я, з послідовним очищенням і конденсацією димових газів й рециркуляцією CO_2 в якості робочого тіла.

У цих джерелах [6]–[16] розглянутий процес збагачення дуттьового повітря киснем в теплогенеруючих установках, можливість застосування кисню в енергозберігаючих технологіях, запропонована методика оцінки енергоефективності і техніко-економічного аналізу використання дуття, проведений аналіз зниження викидів NO_x . Проте дослідження, проведені авторами стосуються в основному нагрівальних печей і використані в роботі як приклади для розрахунку характеристик і параметрів процесів, що відбуваються при збагаченні дуттьового повітря киснем.

Тепловий розрахунок котла ТП-100, за умови збагачення дуттьового повітря киснем проведений на основі методів і підходів, викладених в нормативному документі «Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод» 1973 р. [17], під редакцією Н. В. Кузнецова, В. В. Мітор, І. Е. Дубовського, Е. С. Карасіной.

Для проведення даного теплового розрахунку котла були прийняті наступні початкові умови і допущення:

1. Так як сумарна кількість домішок в повітрі не перевищує 1 % і вони не роблять істотного впливу на кількісні показники і фізико-хімічні процеси горіння палива, будемо вважати, що повітря складається тільки з азоту (79 %) і кисню (21 %).

Характеристики вугілля відповідають даним дослідження

2. Коефіцієнт надлишку повітря приймаємо $\alpha = 1$. В процесі проходження по газовому тракту котла коефіцієнт надлишку повітря не змінюється;

3. Кількість кисню, кількість повітря яка необхідна для спалювання 1 кг вугільного пилу відповідає теоретично необхідному, об'єми продуктів згорання також рівні теоретично необхідним.

4. Дуттьове повітря з різною концентрацією кисню, відповідно до дослідження, що проводиться, попередньо не підігрівається, має температуру $t_n = 20^\circ\text{C}$.

Термодинамічні характеристики повітря, азоту, кисню, водяної пари, двоокису вуглецю і інших газів (зокрема, при високих температурах), які використані при проведенні розрахунків, приведені в довідниках [18]–[19].

Залежність об'ємів необхідного кисню, повітря та продуктів згорання вугільного пилу від об'ємної частки кисню у дуттьовому повітрі (рис. 1).

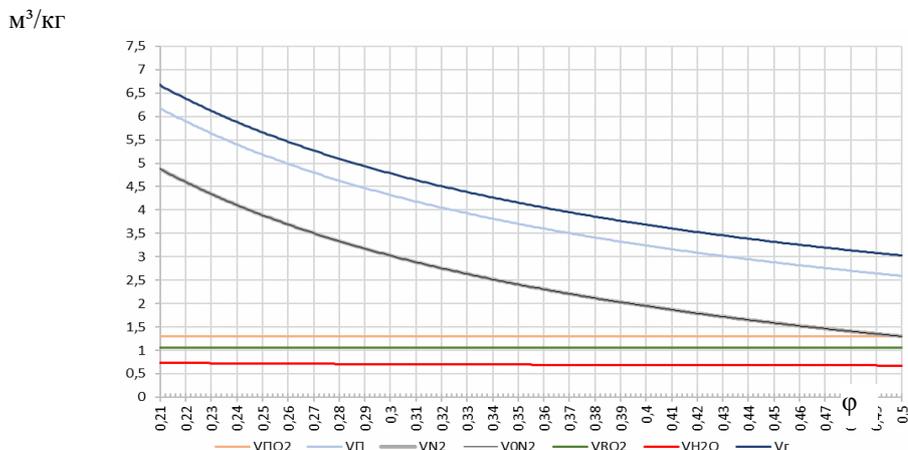


Рис. 1. Залежність об'ємів необхідного кисню, повітря та продуктів згорання вугільного пилу від об'ємної частки кисню у дуттьовому повітрі

Залежність витрат теплоти з димовими газами, %, від об'ємної частки кисню в дуттьовому повітрі (рис. 2).

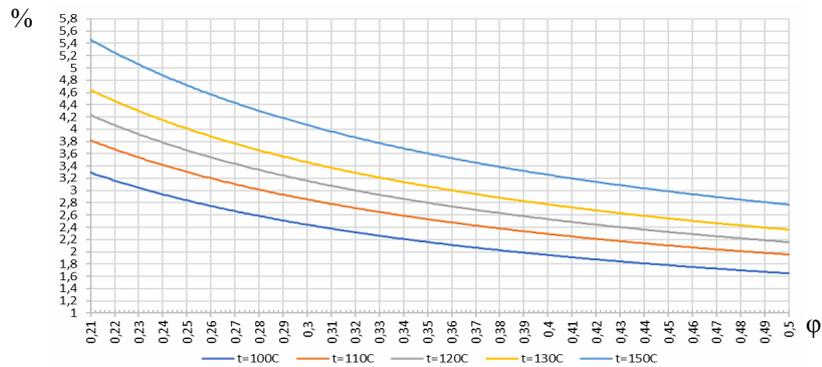


Рис. 2. Залежність витрат теплоти з димовими газами, %, від об'ємної частки кисню в дуттьовому повітрі

Із збільшенням концентрації кисню у дуттьовому повітрі відбувається:

- зменшення об'єму азоту у дуттьовому повітрі;
- зменшення об'єму дуттьового повітря;
- зменшення об'єму та об'ємної долі азоту у димових газах;
- зменшення об'єму та збільшення об'ємної долі водяних парів у вихідних газах;
- збільшення об'ємної долі трьохатомних газів при їх сталому об'ємі у вихідних газах;
- зменшення загального об'єму димових газів.

Література

1. Effects of gas and particle emissions on wall radiative heat flux in oxy-fuel combustion / P. Sanghyun [at al.] ; Sanghyun School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. – Suwon, Korea.
2. Yukun, Hu. CO₂ capture from oxy-fuel combustion power plants / Hu Yukun ; KTH Royal Institute of Technology, School of Chemical Science and Engineering Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes Stockholm. – Sweden.
3. Oxyfuel combustion of Spanish anthracite in fluidized bed / I. Guedea [at al.] – Spain : CIRCE.
4. Oxy-combustion of different coals in a circulating fluidized bed / M. Kosowska-Golachowska [at al.] ; Czestochowa University of Technology Institute of Thermal Machinery Armii Krajowej Czestochowa. – Poland.
5. Development of 2nd generation oxyfuel CFB technology – smallscale combustion experiments and model development under high oxygen concentrations / T. Pikkarainen ; Technical Research Centre of Finland.
6. Кулик, М. П. Аналіз наявних технологій розділення повітря для підвищення ефективності спалювання палива в теплоенергетиці / М. П. Кулик, Т. Ю. Кравець, М. М. Семерак ; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.
7. Штегман, А. В. Аспекти використання кисню при спалюванні низько-реакційного вугілля в котлах з рідким шлаковидаленням / А. В. Штегман ; ВТІ.
8. Використання кисню і збагаченого киснем повітря в нагрівальних пічах, колодязях, стендах розігрівання сталерозливних ковшів / І. Н. Карп [і інш.] ; Інститут газу НАН України. – Київ.
9. Ратников, П. Э. Оптимизация топливно-кислородных режимов сжигания газообразного топлива в теплогенерирующих установках / П. Э. Ратников, Д. В. Менделев // Металлургия : републ. межведомст. сб. науч. тр., Минск, 2011 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2011. – Вып. 33, ч. 1. – С. 86–100.
10. Экономические аспекты обогащения воздушного дутья кислородом в нагревательных и термических печах / С. М. Кабишков [і інш.] // Металлургия : републ. межведомст. сб. науч. тр., Минск, 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2014. – Вып. 35. – С. 8–16.

11. Технично-економическая ефективність використання дутья, збагаченого кислородом, в опалювальних котлах малої потужності / П. Э. Ратников [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. Энергетика. – 2013. – № 6. – С. 52–58.
12. Интенсификация тепловых процессов в высокотемпературных установках на примере нагревательных печей ОАО «БМЗ» путем обогащения воздушной смеси кислородом / С. М. Кабишов [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 218–221.
13. Методика оценки энергоэффективности обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива / В. И. Тимошпольский [и др.] // Энергоэффективность. – 2013. – № 1. – С. 32–34.
14. Эффективность применения кислорода при сжигании различных видов топлива / В. И. Тимошпольский [и др.] // Энергоэффективность. – 2013. – № 12. – С. 36–38.
15. Анализ эффективности технологических методов снижения выбросов NOx при сжигании углеводородного топлива в теплоэнергетических установках / С. М. Кабишков [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. Энергетика. – 2013. – № 2. – С. 48–53.
16. Мищенко, М. В. Повышение экономической эффективности процессов топливных теплоэнергетических установок путем обогащения технологического воздуха кислородом / М. В. Мищенко, В. А. Маслов, О. Л. Дзюбенко // Соврем. науч. исследования и инновации. – 2011. – № 7.
17. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н. В. Кузнецова [и др.]. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
18. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства газов / С. Л. Ривкин. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
19. Термодинамические свойства азота. ГСССД. Серия: монографии / В. В. Сычев [и др.]. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 352 с.

ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В ТЕПЛОВИХ СХЕМАХ ТЕЦ ТА ТЕС

С. А. Наталенко

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
м. Київ, Україна*

Науковий керівник П. М. Гламаздин

ККД циклу Ренкіна навіть в установках з високими параметрами пари не перевищує 50 %. У реальних установках через наявність внутрішніх втрат в турбіні значення ККД ще менше.

На величини ентальпій, впливають три параметри робочого тіла – початковий тиск p_1 і початкова температура T_1 перегрітої пари на вході в турбіну і кінцевий тиск p_2 на виході з турбіни.

Крім зміни параметрів пари підвищити економічність паросилових установок можна за рахунок ускладнення схеми самої установки.

Шляхи підвищення термічного ККД:

1. Підвищення початкового тиску p_1 . Така зміна збільшує термічний ККД на 5–7 %. Цей метод дає значне підвищення ефективності циклу, але в результаті підвищення p_1 збільшується вологість пара, що виходить з турбіни, що викликає передчасну корозію лопаток турбіни [3].

2. Збільшення початкової температури T_1 . При такій зміні температури циклу термічний ККД зростає на 4–6 %. Недоліком цього методу є те, що для пароперегрівача потрібний жароміцний метал, температура перегрітої пари може досягати до 650 °С [3].

3. Одночасне підвищення тиску p_1 і температури T_1 . Термічний ККД росте на 4–5 %.

4. Зниження тиску p_2 . В результаті термічний ККД циклу збільшується на 5–8 %. Знижуючи тиск p_2 можна досягти на виході з конденсатора температури, яка дорівнює температурі навколишнього середовища, але при цьому в конденсаційному пристрої доведеться створювати вакуум [3].

5. Використання вторинного (проміжного) перегріву пара. Підвищення ККД в даному циклі незначне, всього 2–3 %, і така схема вимагає втручань в конструкцію турбіни і її ускладнення.

6. Застосування регенеративного циклу. Збільшення ККД при використанні регенерації становить 10–15 % і зростає зі збільшенням кількості відборів пари [3].

7. Застосування теплофікаційного циклу.

8. Зниження температури конденсації [3].

Варіант зниження температури в конденсаторах турбіни. схема підключення.

Одним із самих простих методів є пониження температури конденсації в конденсаторі турбіни. У цьому методі не треба втручатись в конструкцію турбіни і щось змінювати конструктивно. Достатньо встановити парокompресійний тепловий насос [2] перед конденсатором, який буде охолоджувати воду, що подається в нього. Чим більше будемо понижати температуру охолоджуючої води, тим краще буде проходити процес конденсації, а отже ККД буде зростати.

Теплообмінник-випарник теплового насоса розміщується на подавальному трубопроводі охолоджуючої води, що направляєється в конденсатор турбіни, знижуючи її температуру. Схема підключення теплового насоса показана на рис. 1.

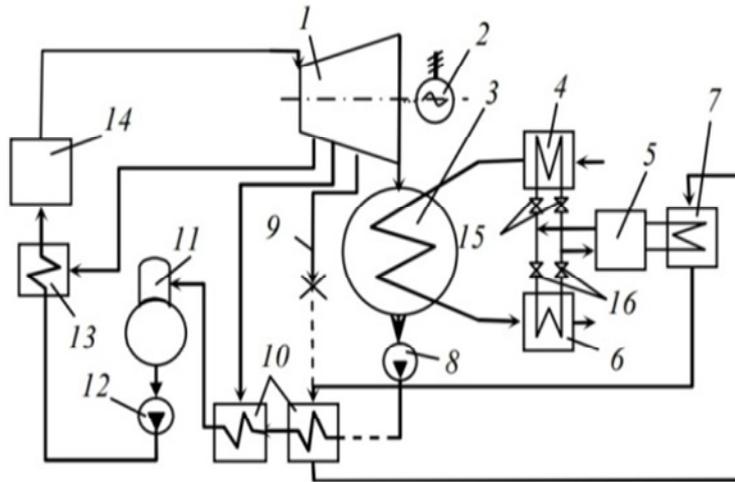


Рис. 1. Схема підключення теплового насоса: 1 – парова турбіна; 2 – електрогенератор; 3 – конденсатор парової турбіни; 4, 6 – теплообмінники-випарники теплового насоса; 5 – тепловий насос; 7 – теплообмінник-конденсатор теплового насоса; 8 – конденсаційний насос; 9 – трубопровід останнього відбору парової турбіни; 10 – підігрівачі низького тиску парової турбіни; 11 – деаератор; 12 – живильний насос; 13 – підігрівач високого тиску; 14 – парогенератор; 15, 16 – засувки підключення теплообмінників-випарників

Використання теплових насосів для зниження температури в конденсаторах турбіни. Використання теплового насоса для пониження температури конденсації, я дослідив на прикладі Бурштинської теплової електростанції.

Термічний ККД циклу визначається [1]:

$$n_T^{\text{per}} = \frac{i_1 - i_2 - \sum_j^n 1\alpha_j (i_j^{\text{II}} - i_2)}{i_1 - i_j^{\text{B}'}}$$

α – частка витрати робочого тіла, яке відводиться у певному відборі пари.

Обчислюється за формулою

$$\alpha_1 = \frac{i_n^{B'} - i_n^B}{i_n^{\text{II}} - i_n^B}$$

Як ми бачимо на діаграмі присутня заштрихована ділянка $a-b-c-d$. Її площа – це тепловтрати в циклі. Якщо охолодити воду для конденсації з 38 до 35°C, то лінія T_2 опуститься нижче, тим самим зменшуючи площу $a-b-c-d$, тобто тепловтрати зменшаться. На рис. 2 штриховою лінією позначено зменшення тепловтрат при охолодженні води для конденсації на проектних 3 °С.

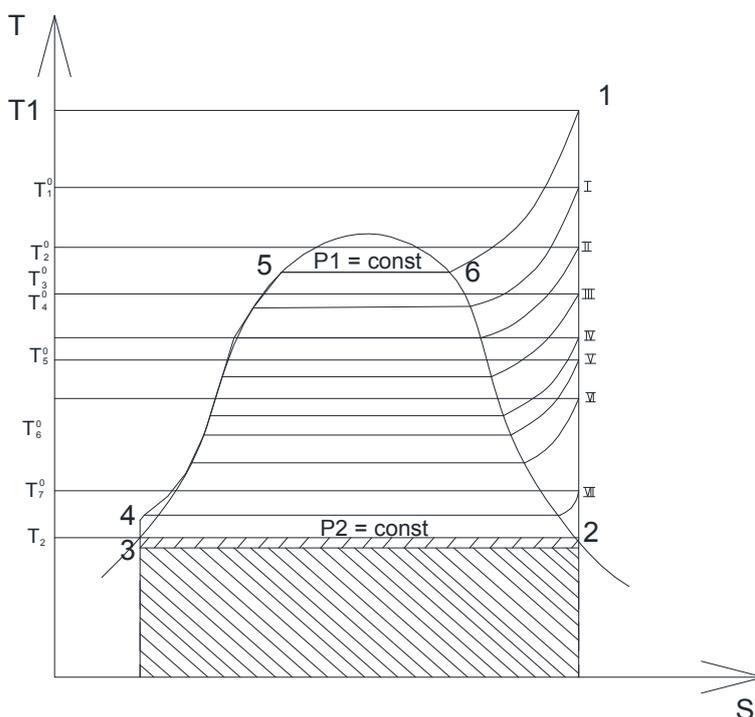


Рис. 2. Регенеративний цикл паросилової установки Бурштинської ТЕС

Параметри пари, який відбирається з турбіни (таблиця).

Параметри пари, який відбирається з турбіни

Номер відбору	Кількість відбору, т/год	Тиск відбору, кгс/см ²	Температура відбору, °С
1	33,6	36,9	395
2	37,2	25	345
3	17,2	11,3	320
4	24,4	6,03	298
5	12,3	2,63	290
6	23	1,22	210
7	17	0,25	73

Тиск пари, при якому проходить відбір ρ_n^0 , де n – номер відбору пари; i_n^B – ентальпія живильної води, яка подається насосами в підігрівач № n ; i_n^{Π} – ентальпія пари, n -го відбору; $i_n^{B'}$ – ентальпія насиченої води, які отримали в результаті змішування перегрітого пара і не догрітої до температури кипіння води, при відповідному тиску:

$$\alpha_1 = \frac{i_n^{B'} - i_n^B}{i_n^{\Pi} - i_n^B};$$

$$\alpha_1 = \frac{1037 - 659,65}{3200 - 659,65} = 0,148.$$

Аналогічно розраховуємо частку витрати робочого тіла, яке відводиться у відборі для інших шести відборів пари з турбіни:

$$i_1 - i_2 - \alpha_1(i_1^{\Pi} - i_2) - \alpha_{II}(i_2^{\Pi} - i_2) - \alpha_{III}(i_3^{\Pi} - i_2) - \alpha_{IV}(i_4^{\Pi} - i_2) - \alpha_V(i_5^{\Pi} - i_2) - \alpha_{VI}(i_6^{\Pi} - i_2) - \alpha_{VI}.$$

Отже, при наявних 38 °С ККД циклу складає 39,3 %.

Другий розрахунок термічного ККД проводимо з пониженою температурою конденсаційної води, а саме 35 °С:

$$i_1 - i_2 - \alpha_1(i_1^{\Pi} - i_2) - \alpha_{II}(i_2^{\Pi} - i_2) - \alpha_{III}(i_3^{\Pi} - i_2) - \alpha_{IV}(i_4^{\Pi} - i_2) - \alpha_V(i_5^{\Pi} - i_2) - \alpha_{VI}(i_6^{\Pi} - i_2) - \alpha_{VI}.$$

1. З розвитком технологій і обладнання для виготовлення теплових насосів великої потужності з'явилась можливість їх використання в теплових схемах ТЕС та ТЕЦ.

2. Використання теплових насосів в схемах ТЕС та ТЕЦ для зниження температури конденсації в конденсаторах водяної пари після турбіни дає можливість підвищити ККД паросилового циклу.

3. При використанні теплових насосів з тою ж метою на ТЕЦ дає можливість ефективно міняти співвідношення навантаження теплового та електричного по мірі їх змін протягом доби.

Література

1. Вукалович, М. П. Техническая термодинамика / М. П. Вукалович, И. И. Новиков.
2. Янговский, Е. И. Парокомпрессионные теплонасосные установки / Е. И. Янговский, Ю. В. Пустовалов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 144 с.
3. Режим доступа: <https://sites.google.com/site/osnoviteplotehnikitagidravliki/rozdil-drugij-osnovi-tehnicnoie-termodinamiki/-16-teoreticni-cikli-gazoturbinnih-ta-parosilovih-ustanovok/4-sposobi-pid-visenna-ekonomichnosti-parosilovoie-ustanovki>.

ОЦЕНКА УСТАНОВКИ АКТИВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ПРЕДПРИЯТИИ БЕЛАРУСИ**М. Н. Поздняков, С. Н. Коротченко***Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель Н. А. Попкова

У потребителей электроэнергии появился новый способ выхода из энергосистемы. Потребители могут объединяться в активный энергетический комплекс (АЭК) с собственной генерацией и сетевой инфраструктурой. Основной плюс АЭК – существенная экономия расходов на энергоснабжение при сохранении связи с внешней энергосистемой.

Принципиально АЭК является микроэнергосистемой, состоящей из установок собственной генерации, своей внутренней электросетевой инфраструктуры и своего внутреннего промышленного потребителя. Все это вместе объединено структурой, включающей в себя цифровые решения: программно-аппаратный комплекс (ПАК) и управляемое интеллектуальное соединение (УИС), с помощью которых осуществляется регулирование производства и потребления электроэнергии внутри АЭК, а также технологическое взаимодействие энергосистемы с сетью потребителя.

Регулирование производства и потребления электрической энергии (мощности) осуществляется с применением УИС. Архитектурно ПАК и УИС АЭК включает в себя аппаратную и программную часть. Аппаратная часть состоит из полупроводниковых устройств, обеспечивающих управление коммутацией и дополнительные функции РЗА, и интеллектуальной. Программная часть реализует математические алгоритмы и ограничительные механизмы АЭК. Аппаратная часть УИС устанавливается на фидерах, обеспечивающих подключение АЭК к энергосистеме, на шинах генераторов, а также на каждом из фидеров, которыми подключены электроустановки потребителей АЭК. Программная часть реализована в виде двухуровневой системы, состоящей из расчетного балансирующего модуля и периферийных управляющих модулей. Устройства УИС должны устанавливаться на границе балансовой принадлежности каждого АЭК, в том числе объектов, обеспечивающих производство электрической энергии и в точках присоединения энергопринимающих устройств к распределительным устройствам.

Цель проекта АЭК – в первую очередь, привлечь предприятия среднего бизнеса, для которых совместное использование генерирующей мощности становится новым, ранее недоступным фактором повышения эффективности производства.

Так, нами было решено взять предприятие в Беларуси средней мощности, оценить возможность его модернизации путем установки на него АЭК, а также экономические, экологические последствия и влияния его на энергосистему района, в котором оно располагается.

Было рассмотрено несколько вариантов. Был выбран Климовичский комбинат хлебопродуктов (КХП). Предприятие с установленной электрической мощностью 2,5 МВт, паровыми и водогрейными котлами, работающими на газу, печном и древесном топливе.

В данной ситуации было решено заменить, исходя из необходимой тепловой мощности, старые котлы на новые электрические марки КЭП-630/0,4 и КЭВ-400/0,4 с баком накопителем. Потребление электроэнергии предприятием возросло на 1 МВт. Отталкиваясь от этого, мы выбирали мощность АЭК. Среднегодовая скорость ветра в районе КХП составляет 6 м/с, что является достаточным условием для нормальной работы ветряка.

Нами было решено установить 2 ветряка DEC DF103 номинальной мощностью 2,5 МВт каждый. Ветряки выдают в среднем 20 % от своей номинальной мощности, значит суммарно будут выдавать около 1 МВт. Ветровая энергия является экологически чистой, что уменьшает выбросы вредных веществ от нашего предприятия.

Для оценки эффективного использования АЭК необходимо рассчитать экономический эффект и срок его окупаемости:

$$\mathcal{E}_{\text{Год}} = P_{\text{до}} - P_{\text{после}},$$

где $\mathcal{E}_{\text{Год}}$ — экономический эффект от реализации проекта за год, р.; $P_{\text{до}} - P_{\text{после}}$ — затраты на оплату электроэнергии и сырья для котельных установок до и после реализации проекта, р.

Оплата за электроэнергию осуществляется по двухставочному тарифу:

$$\Pi = 365 \cdot \alpha P'_{\text{max}} + b \mathcal{E}_0,$$

где α — основная ставка за киловатт заявленной мощности; b — дополнительная ставка за каждый кВт ч; р./год; P'_{max} — среднегодовая мощность предприятия, участвующая в максимуме энергосистемы; \mathcal{E}_0 — электроэнергия, отпущенная предприятию за год;

$$\Pi_{\text{до}} = 365 \alpha P'_{\text{max}} + b \mathcal{E}_0 = 365 \cdot 0,86 \cdot 1796,6 + 0,23 \cdot 13813078 = 3685595 \text{ р/год};$$

$$\Pi_{\text{до}} = 365 \alpha P'_{\text{max}} + b \mathcal{E}_0 = 365 \cdot 0,86 \cdot 1100,0 + 0,23 \cdot 12553080 = 318848 \text{ р/год}.$$

Затраты на покупку сырья (газ, древесина) для котельных установок за год составляют $P_{\text{сырья}} = 568533,9$ р/год, тогда:

$$P_{\text{до}} = \Pi_{\text{до}} - \mathcal{Z}_{\text{сырья}} = 3685595 + 568533,9 = 4254129,9 \text{ р/год};$$

$$P_{\text{после}} = \Pi_{\text{после}} = 3181848 \text{ р/год}.$$

Теперь определим экономический эффект за год:

$$\mathcal{E}_{\text{Год}} = P_{\text{до}} - P_{\text{после}} = 4254129,9 - 3181848 = 1072280,9 \text{ р/год}.$$

Итогом расчета будет являться определение срока окупаемости АЭК:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\mathcal{Z}}{\mathcal{E}_{\text{Год}}},$$

где \mathcal{Z} — затраты на покупку, доставку и установку ветряков, электродвигателей, бака накопителя и трансформаторов;

$$T_{\text{ок}} = \frac{\mathcal{Z}}{\mathcal{E}_{\text{Год}}} = \frac{6801988,2}{1072280,9} = 6,35 \text{ лет}.$$

В итоге мы получаем проект, который требует единовременных больших капитальных вложений с достаточно быстрым сроком окупаемости в 6,35 лет. Данный проект позволяет многим предприятиям обновить свои котельные установки на современные электрические, не нагружая дополнительно энергосистему, также снижая энергопотребление в пики энергосистемы благодаря гибкому потреблению электроэнергии котлов. Данный проект является экологически чистым, потому что мы используем энергию ветра и котельные установки без выброса вредных веществ.

Литература

1. Бердиков, Р. Н. Политика инновационного развития и модернизации ОАО «ФСК ЕЭС» / Р. Н. Бердиков. – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru>. – Дата доступа: 30.03.2021.
2. Ганэ, В. А. Управление деятельностью инновационного предприятия на контрактных рынках высокотехнологичных проектов / В. А. Ганэ, И. А. Гончарук // Белорус. экон. журн. – 2010. – № 4. – С. 78–89.
3. Парр, Э. Программируемые контроллеры. Руководство для инженера : пер. с англ. / Э. Парр. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Е. М. Гецман, Н. А. Попкова

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Один из показателей энергетической безопасности страны – доля собственных энергоресурсов в ее топливном балансе. Для Республики Беларусь, в полной мере не обеспеченной собственными топливно-энергетическими ресурсами, важно отслеживать мировые энергетические тренды и анализировать их влияние на экономику страны для выработки рациональной энергетической политики.

Единая энергетическая модель нашей страны представляет собой централизованную систему с учетом особенностей каждой области, в частности, наличия запасов собственных энергоресурсов, в которой большая часть электроэнергии вырабатывается крупными станциями, а затем поставляется потребителям. Преимущество данной системы состоит в том, что благодаря ограниченному числу генераторов удается достаточно просто поддерживать необходимый баланс между производством и использованием электричества.

Специфика и основа энергетической модели – теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) – паротурбинные и парогазовые), конденсационные электростанции (КЭС) и котельные. Система энергообеспечения остается в основном углеводородной. Ее основу составляют КЭС и ТЭЦ, а также многочисленные блок-станции на базе когенерационных установок. Кроме того, в ее состав входят ГЭС с установленной мощностью около 250 МВт и введенные ветроэнергетические установки [1].

**Данные электрогенерирующих мощностей Республики Беларусь
по состоянию на 01.01.2021 г.**

Категория энергообъекта	Количество, шт.	Установленная электрическая мощность, МВт
Белорусская АЭС (РУП БелАЭС) (прием в эксплуатацию в I-м квартале 2021 г.)	1	1 194,00
<i>Итого АЭС</i>	1	1 194,00
Тепловые электростанции высокого давления	12	8 148,57
Малые тепловые электростанции	30	651,62
Гидроэлектростанции (ГРЭС)	24	88,11
Ветроэлектрическая станция (ВЭС)	1	9,00
<i>Итого энергоисточники на балансе ГПО «Белэнерго»</i>	67	8 897,31
<i>С учетом БелАЭС</i>	1	10 091,31
Блок-станции	338	1176,688
<i>Итого по энергосистеме на 01.01.2021 г.</i>	67 + 338	10 073,99
<i>С учетом БелАЭС</i>	1	11 267,99

Доля ТЭЦ (все основные и малые ТЭЦ) составляет 40,7 и 36,4 % относительно установленной мощности энергосистемы без учета и с учетом энергоблока № 1 Белорусской АЭС соответственно (табл. 1). Они имеют наибольшую эффективность в отопительный период в связи с высокими тепловыми нагрузками. При этом при проектировании установленная мощность генерирующего оборудования ТЭЦ выбирается исходя из условия полного обеспечения теплоснабжения населения и промышленных потребителей региона (зона теплоснабжения ТЭЦ) в период максимальных тепловых нагрузок. Отметим, что электропотребление Республики Беларусь на промышленные организации составляет около 60 %, население потребляет 20 % (городское/сельское население – 70/30 %), на непромышленных потребителей – 11 %, на сельскохозяйственные нужды – около 7 %, городской и железнодорожный транспорт – около 2 % [2].

Межотопительный период характеризуется высокой потребностью в эффективных конденсационных мощностях, т. е. ТЭЦ, работающие по конденсационному циклу, менее экономичны и имеют значительные ограничения мощности вне отопительного периода из-за недостаточной охлаждающей способности градирен, недостаточных тепловых нагрузок для обеспечения полной загрузки Р-турбин и т. п.). При этом доля КЭС (Березовская ГРЭС, Лукомльская ГРЭС, ТЭЦ-5) составляет 46,7 и 41,7 % относительно установленной мощности энергосистемы без учета и с учетом энергоблока № 1 Белорусской АЭС соответственно.

Проанализировав структуру генерирующих объектов в стране, высокая степень концентрации мощностей представлена выделением доминирования тепловой энергетики, а также относительно небольшой степенью развития объектов распределенной генерации (табл. 2). Однако доля потребительских блок-станций с разбивкой по виду топлива составляет 11,7 и 10,4 % относительно установленной мощности энергосистемы без учета и с учетом энергоблока № 1 Белорусской АЭС соответственно.

Таблица 2

Данные по установленной мощности блок-станций, работающих параллельно с Объединенной энергетической системой (ОЭС) Беларуси, по состоянию на 01.01.2021 г.

Виды топлива	Количество, шт.	Установленная мощность, МВт
Итого по блок-станциям	338	1176,688
Невозобновляемые источники:	166	785,119
– природный газ	155	684,601
– попутный нефтяной газ	5	42,26
– ВЭР	6	58,258
Возобновляемые источники (ВИЭ):	172	391,569
– солнце	70	160,31
– ветер	41	102,652
– вода	28	7,278
– биогаз	24	37,259
– древесное топливо	3	3,08
– иные (сточные воды)	1	0,5
– биомасса	5	80,04

Согласно приведенным данным табл. 2, видно, что доля ВИЭ (с учетом блок-станций) составляет 4,9 и 4,3 % относительно установленной мощности энергосистемы без учета и с учетом энергоблока № 1 Белорусской АЭС соответственно. Можно отметить, что среди ВИЭ наибольшую долю занимают вода (энергия движения водных потоков) и ветер.

Намечаемый ввод атомной электростанции мощностью около 2400 МВ окажет значительное влияние на формирование и изменение структуры генерирующих мощностей в баланс ОЭС Беларуси, предназначенных для покрытия переменной части суточных графиков электрической нагрузки. При существующем уровне потребления электрической энергии есть необходимость резервирования в любой момент времени энергоблока большой единичной мощности и сложности, связанные с балансированием энергосистемы в период минимальных нагрузок (ночное время).

После ввода в работу БелАЭС будет резко сокращаться выработка электроэнергии на КЭС, в том числе на современных парогазовых энергоблоках Лукомльской ГРЭС, Березовской ГРЭС и Минской ТЭЦ 5. Остальные энергоблоки КЭС будут переведены в холодный резерв с включением в работу в основном в периоды плановых остановок энергоблоков АЭС. Следовательно, в покрытии переменной части графика нагрузки должны участвовать как маневренные генерирующие мощности, относящиеся к пикорезервным источникам и представляющие собой ГЭС, газотурбинные энергоустановки, так и отдельные источники на парогазовых блоках.

Для эффективного использования существующих мощностей нужен рост потребления электрической энергии. Для обеспечения данного роста потребления электрической энергии необходимо широкое использование электроэнергии для нужд теплоснабжения, развитие электромобильного транспорта, создание энергоем-

ких промышленных производств. Рост электропотребления должен стимулироваться соответствующей тарифной политикой, направленной на выравнивание суточного графика нагрузки.

В Беларуси необходимо исследовать разработки в сфере ВИЭ, способствующие созданию новых экспортных рынков (рапс, древесные паллеты, биобутанол, оборудование и технологии), что позволит диверсифицировать отечественный энергоэкспорт и полнее включиться в международные цепочки разделения труда в сфере энергетики.

В ближайшей перспективе по результатам мирового опыта основную долю рынка займут гибридные проекты, в которых ВИЭ, в первую очередь, солнечные электростанции будут комплектоваться накопителями энергии. В дальнейшем системы хранения энергии станут реальной альтернативой генерирующим активам любого типа, а также расширению сетей.

Л и т е р а т у р а

1. Белэнерго. – Режим доступа: <https://www.energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/osnovnye-pokazateli/>. – Дата доступа: 26.03.2021.
2. Данильченко, А. Энергетический кризис, проблемы структурной перестройки и перспективы развития белорусской энергетики / А. Данильченко, Л. Падалко // Энергет. финансово-экон. ситуация в Беларуси. – 2009. – С. 19–37.

ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ С УЧЕТОМ БелАЭС

Т. Д. Ковалева

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научные руководители: П. И. Климович, Е. М. Гецман

Данная работа направлена на исследование режимов работы энергосистемы Беларуси с учетом Белорусской атомной электростанции (БелАЭС).

На основе статистических данных по работе энергосистемы Республики Беларусь за последнее время были изучены режимы работы энергосистемы.

Развитие Белорусской энергосистемы направлено на повышение надежного и бесперебойного электроснабжения. Под энергосистемой понимаются генерирующие источники и сетевая инфраструктура энерго- и теплоснабжающих организаций, входящих в состав государственного производственного объединения электроэнергетики «Белэнерго», и электрогенерирующие источники других владельцев. В соответствии с Концепцией энергетической безопасности Республики Беларусь, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23.12.2015 г. № 1084 [1]: энергетическая безопасность – состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энергетическими ресурсами приемлемого качества, от угроз нарушения бесперебойности энергоснабжения.

Для обеспечения энергетической безопасности в условиях таких особенностей энергетической сферы, как невозможность работы «на склад» ввиду отсутствия развитых, доступных и экономически целесообразных способов хранения больших объемов электроэнергии и соответственно постоянной необходимости поддержания баланса между генерацией и постоянно изменяющимся потреблением, а также для обеспечения возможности проведения ремонтных работ на оборудовании и объектах энергетической отрасли, обеспечения экономически эффективной работы отрасли

необходимо обеспечение качественного планирования и ведения режимов работы энергосистемы. В таких условиях ввод в баланс мощностей знакового для Белорусской энергосистемы объекта – Белорусской атомной электростанции, первой АЭС на территории Республики Беларусь, с проектной установленной мощностью на уровне 2400 МВт, оказывает значительное влияние, как на саму энергосистему, так и на планирование ее режимов.

Общая структура генерации (выработки) для отопительного и межотопительного периодов до ввода Белорусской АЭС представлена на рис. 1, 2 на примере характерных периодов (январь и июль 2020 г.) [2].

Для отопительного периода характерна значительная доля ТЭЦ (54 %) и меньшая – КЭС (36 %), а в межотопительный – преобладание доли КЭС (63 %) в связи со значительным снижением «тепловой» нагрузки и соответственно снижением теплофикационной выработки ТЭЦ (25 %).



Рис. 1. Структура генерации в Объединенной энергетической системе (ОЭС) Беларуси в январе 2020 г.

Рис. 2. Структура генерации в ОЭС Беларуси в июле 2020 г.

Общая структура генерации (выработки) для отопительного периода после ввода Блока 1 БелАЭС представлена на рис. 3 на примере характерного периода (января 2021 г.).

В январе 2021 г. доля БелАЭС составила около 16 % в связи с тем, что вывод ее на номинальную мощность состоялся только с 12 января, до этого момента ее мощность находилась в пределах 75 % и изменялась в сторону уменьшения в рамках испытаний или до 0 % при проведении остановов для ремонтных работ. При работе АЭС на 100 % мощности замещение выработки КЭС и ТЭЦ увеличится.

Изменения относительно аналогичной структуры генерации до ввода БелАЭС: АЭС обеспечила не только замещение генерации КЭС, но и частичное замещение генерации ТЭЦ.



Рис. 3. Структура генерации в ОЭС Беларуси в январе 2021 г.

Замещение выработки ТЭЦ в основном обусловлено фактом работы АЭС в базовой части графика покрытия потребления, непривлечением АЭС к регулированию посредством изменения активной мощности и, как следствие, вынужденными и более длительными (в сравнении с периодом до ввода Блока 1 БелАЭС) разгрузками ТЭЦ ниже теплового графика.

Основными вопросами по интеграции БелАЭС в баланс ОЭС Беларуси при существующем уровне потребления электрической энергии являются необходимость резервирования в любой момент времени энергоблока большой единичной мощности и сложности, связанные с балансированием энергосистемы в период минимальных нагрузок (ночное время).

При существующем уровне электропотребления после ввода в работу БелАЭС будет резко сокращаться выработка электроэнергии на КЭС, в том числе на современных парогазовых энергоблоках Лукомльской ГРЭС, Березовской ГРЭС и Минской ТЭЦ-5. Остальные энергоблоки КЭС будут переведены в холодный резерв с включением в работу в основном в периоды плановых остановок энергоблоков АЭС.

После ввода АЭС существенно осложняются режимы работы ТЭЦ, будет кардинально снижен объем выработки электроэнергии по комбинированному циклу совместно с отпуском тепловой энергии, длительный период времени ТЭЦ будут работать на техническом минимуме.

Для балансирования в ночные часы в перспективных режимах предусмотрено использование электрических котлов как в отопительный период с целью отпуска тепловой энергии для отопления и горячего водоснабжения, так и в межотопительный период с целью горячего водоснабжения.

Для резервирования энергосистемы необходима реализация проектов по строительству пико-резервных источников суммарной мощностью 800 МВт. Для их реализации определены четыре площадки – Лукомльская ГРЭС (150 МВт), Новополоцкая ТЭЦ (100 МВт), Минская ТЭЦ-5 (300 МВт), Березовская ГРЭС (250 МВт).

Для эффективного использования существующих мощностей необходим рост потребления электрической энергии с 39–40 (на сегодняшний момент достигает по Беларуси) до 47–50 млрд кВт · ч в год. Для обеспечения данного роста потребления электрической энергии необходимо широкое использование электроэнергии для нужд теплоснабжения, развитие электромобильного транспорта, создание энергоемких промышленных производств. Рост электропотребления должен стимулироваться

соответствующей тарифной политикой направленной на выравнивание суточного графика нагрузки.

Важным направлением деятельности является развитие экспорта электроэнергии. Ряд неэффективных мощностей на электростанциях величиной около 1000 МВт после ввода в эксплуатацию двух энергоблоков БелАЭС подлежат выводу из эксплуатации (два энергоблока класса 300 МВт – на Лукомльской ГРЭС, два энергоблока по 215 МВт – на Березовской ГРЭС).

Литература

1. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь : утв. Постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 23.12.2015 г. № 1084. – 13 с.
2. Концепция развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года : утв. Постановлением Мин-ва энергетики Респ. Беларусь от 25.02.2020 г. № 7.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И АНАЛИЗ СИСТЕМ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН

М. А. Новиков

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Брянский государственный технический
университет», Российская Федерация*

Научный руководитель А. А. Обозов

Работа двигателей внутреннего сгорания оценивается комплексом эксплуатационно-технических показателей. В настоящее время наиболее актуальными и важными из них являются показатели токсичности отработавших газов (ОГ). Это обусловлено как ухудшением экологической обстановки, так и ужесточением требований, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания современными нормативными документами на токсичность ОГ. К нормируемым токсичным компонентам ОГ дизелей относятся оксиды азота NO_x, монооксид углерода CO, некие несгоревшие углеводороды СН, сажа (углерод С) или твердые частицы. К нормируемым токсичным компонентам ОГ относятся оксиды серы, альдегиды, фенолы и их производные кетоны и др. В связи с данной проблемой возникает потребность в поиске новых решений по снижению токсичности ОГ и их дезактивации.

Основными конструктивными и регулировочными параметрами, которые оказывают влияние на эффективные и экологические показатели дизельных двигателей, являются:

- степень сжатия;
- форма камеры сгорания;
- интенсивность движения воздушного заряда;
- количество и ориентация сопловых отверстий и конструктивные особенности распылителя форсунки;
- характеристика топливоподачи (количество стадий, количество топлива в каждой стадии, угловой интервал между порциями и угол начала подачи топлива);
- максимальное давление подачи топлива;
- газодинамические характеристики впускных и выпускных каналов ГБЦ;
- система рециркуляции отработавших газов;

На данный момент существуют программы и методы позволяющие моделировать рабочий процесс двигателя. Их можно разделить на две группы: это термоди-

намические и численные. Наиболее известные комплексы, поддерживающие технологию Computational Fluid Dynamic: FIRE (AVL, Австрия), STAR-CCM+ (Computational Dynamics Ltd., Великобритания), KIVA (Los Alamos, США), VECTIS (Ricardo, Великобритания), ANSYS (ANSYS Inc., США) и IFP 3D (IFP, Франция). Данные программы позволяют моделировать: течения в трубопроводах различной конфигурации, процессы топливоподачи, испарения и сгорания топлива, движение топливных пленок на поверхностях деталей и т. д. Также следует отметить отечественные программные комплексы ДИЗЕЛЬ-РК, ИМПУЛЬС, ВОЛНА и ПОТОК. Программный комплекс DIESEL-RK активно развивается и не уступает по возможностям, точности и времени счета зарубежным аналогам. Широкое применение данных продуктов ограничивается следующими факторами: трудоемкость процесса подготовки и настройки расчетных моделей, для проведения расчетов требуются мощные вычислительные ресурсы, продолжительное время счета, а также достоверность полученных результатов моделирования внутрикамерных процессов не всегда удовлетворительна.

Совершенствование рабочего процесса не может быть проведено в однофакторном эксперименте, так как является достаточно сложным и требует многопараметровой оптимизации с учетом всех возможных факторов. Вопрос повышения экологических показателей решается комплексно, потому что показатели двигателя зависят от множества факторов. По этой причине необходимо провести исследования влияния каждого фактора на показатели двигателя в отдельности. Внесение изменений в конструкцию двигателя несет за собой большие финансовые и временные вложения. Из-за этого основной возможностью совершенствования рабочего процесса существующих конструкций двигателей и вновь разрабатываемых являются системы топливоподающей аппаратуры с электронным управлением и рециркуляции отработавших газов, также к перспективным направлением на сегодняшний момент можно отнести применение смеси нефтяного топлива с добавками биотоплив из возобновляемого растительного сырья.

Один из основных методов повышения экологических характеристик – вмешательство в рабочий процесс двигателя, и к нему относится изменение температуры рабочего процесса.

Образование оксидов азота в цилиндре двигателя происходит лавинообразно при достижении определенной температуры, по этой причине для снижения вредных выбросов в ОГ необходимо снижать температуру цикла. Для изменения температуры воздушного заряда в цилиндре двигателя требуется раньше закрывать впускной клапан до НМТ, тогда в последней фазе такта впуска воздушный заряд будет расширяться и охлаждаться. Этот способ носит название цикла Миллера. Он дает снижение фактической степени сжатия рабочей смеси относительно геометрической при сохранении неизменной степени расширения. Таким образом, смесь в двигателе Миллера сжимается меньше, чем должна была бы сжиматься в двигателе Отто такой же механической геометрии. Это позволяет увеличить геометрическую степень сжатия выше пределов, обуславливаемых детонационными свойствами топлива, приводя фактическое сжатие к допустимым значениям за счет вышеописанного «укорочения цикла сжатия».

Одним из методов, влияющих на рабочий процесс, является применение двухтопливной подачи смеси. Принцип работы данного метода заключается в одновременной подаче в камеру сгорания двух видов топлива. Основное топливо здесь дизельное, а дополнительное – газ метан.

Рассмотрим применение водорода. При питании двигателя бензином с 5%-й добавкой водорода и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05$ максимальная мощность двигателей сохраняется на уровне мощности базового двигателя. При этом на 30 % снижается расход бензина, значительно уменьшается эмиссия оксидов углерода и углеводородов и существенно повышается топливная экономичность. Концентрация углеводородов в отработавших газах снижается при этом в 2–3 раза, а концентрация оксидов углерода несколько возрастает вследствие увеличения максимальной температуры цикла и наличия свободного кислорода в зоне реакции при $\alpha = 1,05$.

Система рециркуляции отработавших газов СРОГ – в двигателях внутреннего сгорания, представляющая собой клапан, соединяющий на некоторых режимах работы задроссельное пространство впускного коллектора с пространством выпускного коллектора. В двигателях с рециркуляцией часть отработавших условно инертных газов попадает в цилиндры как балласт. При этом, с одной стороны, происходит снижение максимальной температуры горения, а с другой – сокращается количество избыточного воздуха. Оба этих фактора вызывают существенное уменьшение выбросов оксидов азота, образующихся при высоких температурах и являющихся одними из самых токсичных веществ.

Одним из способов снижения вредных выбросов с ОГ является применение систем повышающих качество параметров впрыска и распыла топливо-воздушной смеси в цилиндре двигателя. К таким системам можно отнести систему аккумуляторного типа «Common Rail» – система подачи топлива, применяемая в дизельных двигателях. В системе типа «Common Rail» насос высокого давления нагнетает дизельное топливо под высоким давлением (до 500 МПа, в зависимости от режима работы двигателя) в общую топливную магистраль существенного объема. Управляемые электроникой электрогидравлические форсунки с электромагнитным или пьезоэлектрическим приводом управляющих клапанов впрыскивают дизельное топливо под высоким давлением в цилиндры. В зависимости от конструкции форсунок и класса двигателя может впрыскиваться до 11 порций топлива за 1 цикл.

Эффективным средством улучшения показателей токсичности ОГ дизелей является применение смеси нефтяного топлива с добавками биотоплив из возобновляемого растительного сырья. Двигатели работающего на смесях нефтяного дизельного топлива с добавками в количестве 10 % по объему растительных масел (рапсового, подсолнечного, соевого и др.) улучшают показатели по выбросам ОГ по различным компонентам в среднем 16 %.

Второй способ решения этой проблемы – это конструктивные доработки системы выпуска двигателя, к ним относятся каталитические нейтрализаторы, сажевые фильтры, использование мочевины.

Методы термической нейтрализации основывается на электрическом или химическом доокислении вредных веществ, содержащихся в отработавших газах двигателя. В устройствах каталитической нейтрализации используются окислительно-восстановительные реакции для химического доокисления (оксид углерода, сажа) или восстановления (оксиды азота) продуктов неполного окисления топлива при протекании их через активную зону (жидкий или твердый каталитический материал) нейтрализатора. Наибольшей эффективностью в отношении снижения содержания в ОГДВС основных токсических компонентов и соответственно наибольшей распространенностью в двигателе- и машиностроении характеризуются нейтрализаторы с каталитическим материалом на основе благородных металлов – платины и палладия, обладающие степенью нейтрализации 70–90 %.

Одним из важнейших элементов системы нейтрализации дизельного двигателя

является противосажевый фильтр – часть выхлопной системы автомобиля с дизельным двигателем. Предназначен для уменьшения количества сажи в отработанных газах. Представляет собой керамический блок из карбида кремния с большим количеством тонких каналов для прохода отработанных газов. Частицы сажи, задерживаясь на поверхности этих каналов, под действием повышенной температуры и других факторов окисляются и, превращаясь в углекислый газ, выбрасываются в атмосферу с выхлопными газами. Конструктивно размещается в отдельном металлическом корпусе и находится непосредственно после турбины или же после катализатора (или после второго катализатора, если их два).

Жидкостная система нейтрализации вредных выбросов в ОГ или SCR-нейтрализатор представляет собой закрытую систему, через которую проходит очищенный от сажи выхлоп дизеля. Жидкость «Эдблю» заливается в автономный бачок и подается в выхлопной патрубок дозированно перед поступлением в нейтрализатор. Смешанный газ поступает в блок нейтрализатора SCR, где происходит химическая реакция распада оксида азота за счет входящего в состав мочевины аммиака. Молекулы аммиака, соединяясь с оксидом азота, расщепляют последний на безвредные для человека и окружающей среды компоненты. После полного цикла очистки в атмосферу попадает минимальное количество вредных веществ, параметр ОГ соответствует протоколу Евро-5 и Евро-6.

Проводимый анализ позволил выявить наиболее актуальные на данный момент возможности повышения экологических характеристик двигателей внутреннего сгорания и определить дальнейшие направления исследования в данной области.

Литература

1. Дмитриевский, Е. В. Электронное управление двигателями внутреннего сгорания : учеб. пособие / Е. В. Дмитриевский, А. А. Обозов, М. А. Новиков. – Брянск : БГТУ, 2018. – 195 с.
2. Рогалев, В. В. Курсовое проектирование двигателей внутреннего сгорания: Тепловой расчет : учеб. пособие / В. В. Рогалев, Е. В. Дмитриевский. – Брянск : БГТУ, 2017. – 131 с.
3. Рогалев, В. В. Планирование эксперимента при испытаниях двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособие / В.В. Рогалев. – Брянск : БГТУ, 2014. – 111 с.
4. Хайруллин, А. Х. Влияние характеристики топливоподачи и настроек топливоподающей аппаратуры на экономические и экологические показатели автомобильного дизеля : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / А. Х. Хайруллин. – К., 2017. – 220 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПОЛЕЙ СУТОЧНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ УКРУПНЕННОЙ БАЛАНСОВОЙ ГРУППЫ «МИНЖИЛКОМХОЗ» РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

В. М. Спитальников

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

Цель работы – разработка методического обеспечения и исследование на его основе закономерностей формирования суточных режимов потребления газа для укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» региональной системы газоснабжения (РСГС) в целях повышения эффективности ее функционирования.

Теоретической и методологической основой работы являются положения системного анализа. Для информационного описания укрупненной балансовой группы

«Минжилкомхоз» РСГС использовалась информационная база данных (ИБД). Для морфологического описания системы применялся корреляционно-регрессионный анализ. Функциональное описание системы основывалось на положениях регрессионного анализа и методах сглаживания временных рядов.

Получены результаты: в структуре годового потребления газа РСГС доля укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» достигает за разные годы следующих значений: 2012 г. – 7,3 %; 2013 г. – 7,3 %; 2014 г. – 7,9 %; 2015 г. – 6,7 %; 2016 г. – 6,7 %; 2017 г. – 6,6 %. В состав указанной группы входит 114 балансовых элементов.

Для построения структурных полей « $V_{сут} - t_{сут}$ » сформирована информационная база данных за 2012–2017 гг., содержащая сведения по суточному расходу газа и среднесуточной температуре наружного воздуха. Возможность сравнения и оценки устойчивости вида структурных полей появилась вследствие пересчета исходных данных из натуральных единиц (газ – в тыс. м³, а температура наружного воздуха – в °С) в относительные, безразмерные единицы. Среднесуточная температура наружного воздуха пересчитана в градусы по Кельвину и далее отнормирована относительно нулевого значения в К, что позволило перейти к относительным значениям температуры. В результате весь возможный суточный ряд температуры наружного воздуха за год представлен диапазоном от 0,9 до 1,1 о. е. Суточные значения объема потребления газа также представлены в относительных единицах. За базисное значение суточного расхода газа по укрупненной балансовой группе принято среднесуточное значение на годовом интервале времени. В результате появилась возможность проводить анализ и сравнение структурных полей « $V_{сут} - t_{сут}$ » за различные годы, а также сохранять конфиденциальность информации.

Произведена оценка степени тесноты связи между « $V_{сут} - t_{сут}$ » по укрупненным балансовой группе «Минжидкомхоз». Установлен высокий коэффициент корреляции между среднесуточной температурой и суточным потреблением газа. За различные годы $R(t_{сут} - V_{сут})$ находится в диапазоне от –0,92 до –0,96.

Для укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» были построены структурные поля за 2012–2017 гг. и определен их вид (рис. 1): поле с четким расслоением $V_{сут}$ на две температурные области, определяемые состоянием системы отопления («включено» либо «отключено») и перекрытием этих областей в зоне неустойчивого, неопределенного состояния РСГС (от 0 до 8 °С). Для анализа структурных полей предложено выделить 4 диапазона изменения температуры: первый температурный диапазон – 0,9–0,97 о. е., что соответствует диапазону среднесуточной температуры от –27,3 до –8,2 °С; второй температурный диапазон – от 0,97 до 1 о. е., что соответствует диапазону среднесуточной температуры от –8,2 до 0 °С; третий температурный диапазон – 1,0–1,03 о. е., что соответствует диапазону среднесуточной температуры от 0 до ±8 °С; четвертый температурный диапазон – более 1,03 о. е., что соответствует среднесуточной температуре более +8 °С.

В табл. 1 приведены показатели структуры суточного расхода газа по температурным диапазонам за 2012–2013 гг.

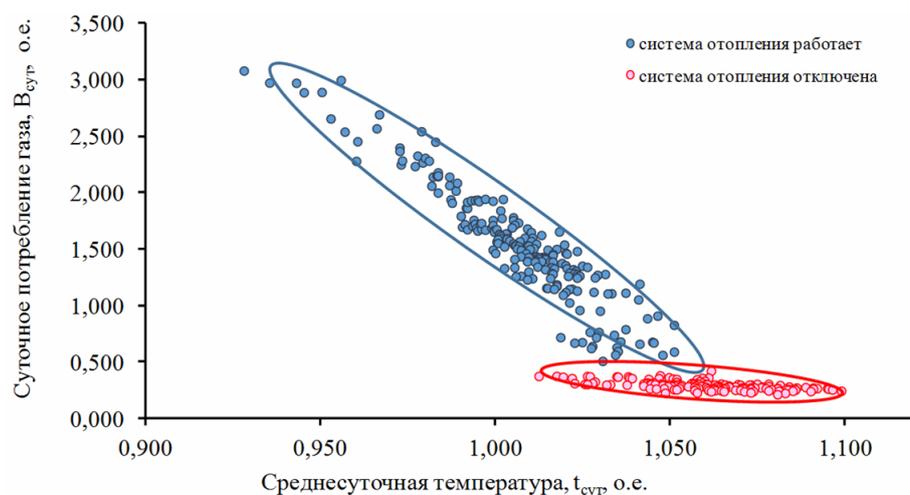


Рис. 1. Вид структурного поля « $B_{сут} - t_{сут}$ » укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз»

Таблица 1

**Показатели зон структурных полей « $B_{сут} - t_{сут}$ » группы «Минжилкомхоз»
Гомельской РСГС за 2012–2013 гг.**

Наименование показателя	Температура наружного воздуха, $t_{сут}$, о. е.			
	0,9–0,97 о. е.	0,97–1 о. е.	1–1,03 о. е.	1,03–1,1 о. е.
	От –27,3 до –8,2 °С	От –8,2 до 0 °С	От 0 до 8 °С	Больше 8 °С
2012 г.				
Среднесуточное потребление газа, $B_{сут\ ср}$, о. е.	2,617	1,747	1,305	0,322
Количество суток попавших в диапазон, N , сут	42	52	79	193
Максимальное суточное потребление газа, $B_{сут\ макс}$, о. е.	3,106	2,112	1,803	1,129
Минимальное суточное потребление газа, $B_{сут\ мин}$, о. е.	1,923	1,347	0,328	0,217
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,299	0,193	0,277	0,017
Коэффициент вариации по газу V , %	11,4	11,1	21,2	5,2
Изменение температуры в диапазоне, о. е.	0,07	0,03	0,03	0,07
Коэффициент чувствительности, K_{χ}	16,89	25,51	49,18	13,02
2013 г.				
Среднесуточное потребление газа, $B_{сут\ ср}$, о. е.	2,459	1,907	1,356	0,367
Количество суток попавших в диапазон, N , сут	16	75	83	191
Максимальное суточное потребление газа, $B_{сут\ макс}$, о. е.	2,767	2,342	1,853	1,095
Минимальное суточное потребление газа, $B_{сут\ мин}$, о. е.	2,201	1,600	0,296	0,187

Окончание табл. 1

Наименование показателя	Температура наружного воздуха, $t_{\text{сут}}$, о. е.			
	0,9–0,97 о. е.	0,97–1 о. е.	1–1,03 о. е.	1,03–1,1 о. е.
	От –27,3 до –8,2 °С	От –8,2 до 0 °С	От 0 до 8 °С	Больше 8 °С
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,144	0,181	0,383	0,227
Коэффициент вариации по газу V , %	5,8	9,5	28,2	62,0
Изменение температуры в диапазоне, о. е.	0,07	0,03	0,03	0,07
Коэффициент чувствительности, $K_{\text{ч}}$	8,09	24,75	51,89	12,97
Минимальное суточное потребление газа, $V_{\text{сут мин}}$, о. е.	2,280	1,464	0,303	0,215
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,249	0,263	0,385	0,197
Коэффициент вариации по газу V , %	9,2	13,7	30,2	55,9
Изменение температуры в диапазоне, о. е.	0,07	0,03	0,03	0,07
Коэффициент чувствительности, $K_{\text{ч}}$	10,24	35,93	54,63	15,20

Установлены следующие закономерности формирования суточного потребления газа от среднесуточной температуры наружного воздуха:

1. Четвертая область, соответствующая самой высокой температуре наружного воздуха, объединяет наибольшее количество суток от годового значения (от 53 до 46 %). Для данной области коэффициент чувствительности суточного расхода газа от изменения температуры составляет от 10,34 до 14,41.

2. Первая область, соответствующая самой низкой температуре наружного воздуха, включает наименьшее количество дней на годовом интервале и характеризует наиболее тяжелые по температуре и по продолжительности сутки зимнего периода. Так, в 2015 г. в данную область попало лишь 7 суток с максимальным суточным потреблением газа 2,177 о. е., что соответствовало «теплой зиме». В 2012 г. в данную область вошло 42 дня с максимальным суточным потреблением газа 1,983 о. е. Для первой области характерен более низкий коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$ относительного изменения потребления газа ΔV при относительном изменении температуры наружного воздуха Δt , что свидетельствует о вхождении группы «Минжилкомхоз» в зону «насыщения» по максимальному потреблению газа: технологическое отопительное оборудование рассчитано на определенный максимум нагрузки. Так, в 2013 г. $K_{\text{ч}}$ составил 8,09, а максимальное его значение – 16,89 отмечено в 2012 г. Общих закономерностей в динамике $K_{\text{ч}}$ первой области за период 2012–2017 гг. не выявлено.

3. Вторая область с температурным диапазоном от –8,2 до 0 °С, или 0,97–1 о. е., отличается более высоким коэффициентом чувствительности относительного изменения потребления газа при относительном изменении температуры наружного воздуха по сравнению с первой областью. В 2017 г. $K_{\text{ч}}$ составил 10,24, в то же самое время в 2015 г. $K_{\text{ч}}$ был самым максимальным за исследуемый период – 35,91.

4. Третья область – с температурным диапазоном от 0 до 8 °С – является областью неустойчивой работы группы «Минжилкомхоз», поскольку по температурным режимам возможным является как включенное состояние системы отопления, так и нерабочее состояние. $K_{\text{ч}}$ для данной области в несколько раз превышает $K_{\text{ч}}$ четвертой и первой областей: 2012 г. – $K_{\text{ч III}} / K_{\text{ч IV}} = 3,77$; 2013 г. – $K_{\text{ч III}} / K_{\text{ч IV}} = 4$; 2014 г. – $K_{\text{ч III}} / K_{\text{ч IV}} = 3,75$;

2015 г. – $K_{ч III} / K_{ч IV} = 3,58$; 2016 г. – $K_{ч III} / K_{ч IV} = 4,2$; 2017 г. – $K_{ч III} / K_{ч IV} = 3,59$. Анализ динамики среднесуточного потребления газа, $V_{сут ср}$ по выделенным зонам указывает на вполне логичную закономерность снижения $V_{сут ср}$ с ростом температуры. Но в то же самое время из данных табл. 1 видно, что $V_{сут макс}$ зоны более высокой температуры превышает $V_{сут мин}$ зоны более низкой температуры. На примере данных 2012 г. это выглядит следующим образом: $V_{сут макс IV} > V_{сут мин III}$, $V_{сут макс III} > V_{сут мин II}$, $V_{сут макс I} >> V_{сут мин II}$ (табл. 2).

Таблица 2

Данные 2012 г.

Наименование показателя	Температура наружного воздуха, $t_{сут}$ о. е. / °С			
	0,9–0,97 о. е.	0,97–1 о. е.	1–1,03 о. е.	1,03–1,1 о. е.
	От –27,3 до –8,2 °С	От –8,2 до 0 °С	От 0 до 8 °С	Больше 8 °С
2012 г.				
	I область	II область	III область	IV область
Максимальное суточное потребление газа, $V_{сут макс}$, о. е.	3,106	2,112	1,803	1,129
Минимальное суточное потребление газа, $V_{сут мин}$, о. е.	1,923	1,347	0,328	0,217

Так, в 2012 г. превышение $V_{сут макс}$ четвертой области над $V_{сут мин}$ третьей области было в 3,44 раза, по третьей и второй превышение составило 33,8 %, а по второй над первой – 9,8 %.

НАПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИИ ИМПОРТИРУЕМОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ С УЧЕТОМ ИНТЕГРАЦИИ БелАЭС

М. П. Малашенко

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

Научный руководитель Н. В. Грунтовиц

Целью работы является разработка новых направлений экономии природного газа с учетом ввода в эксплуатацию БелАЭС, изменения как режимов работы объединенной энергосистемы, так и теплоисточников, не входящих в систему ГПО «Белэнерго».

По результатам работы за 2020 г. Республика Беларусь импортирует 83,3 % валового потребления топливно-энергетических ресурсов (далее – ТЭР), в основном указанные поставки производятся из одной страны. Данные факты крайне негативно влияют на индикаторы энергетической безопасности.

Справочные данные: доля доминирующего поставщика энергоресурсов в общем импорте ТЭР за 2019 г. составила 99,6 %, прогноз 2020 г. – 85 %. Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР за 2019 г. составила 62,2 %, прогноз 2020 г. – 57 %.

Одна из основных задач на ближайшую перспективу – максимальное сокращение зависимости поставок импортируемых углеводородов и, в частности, природного газа. Основным инструментом для достижения данной цели является реализация

Государственной программы «Энергосбережение» на 2021–2025 годы», которая предусматривает экономию 2,5–3,0 млн т условного топлива (далее – т у. т.) за счет повышения эффективности действующих энергоустановок Белорусской энергетической системы на основе использования инновационных технологий с внедрением с учетом экономической целесообразности систем утилизации теплоты уходящих дымовых газов и вывода из эксплуатации неэффективных источников, реализации мероприятий по увеличению доли электрической энергии в конечном потреблении энергоресурсов с уменьшением потребления первичного импортируемого углеводородного топлива, создания автоматизированных систем управления теплоснабжающих и теплопотребляющих комплексов, включая комплексы «источники – тепловые сети – потребители», с управлением тепловыми и гидравлическими режимами, осуществления дальнейшей модернизации и технического перевооружения производств с внедрением современных энергосберегающих технологий, оборудования и материалов, повышения эффективности технологических процессов с углублением автоматизации и электрификации промышленного производства, использования электрической энергии для целей создания оптимального микроклимата в производственных помещениях, в том числе инфракрасных излучателей, максимального увеличения использования вторичных энергетических ресурсов, компрессионных электрических тепловых насосов для нужд отопления и горячего водоснабжения как в жилом, так и в промышленном секторах.

Вместе с тем имеется ряд направлений повышения энергоэффективности, которые в ближайшей перспективе необходимо рассматривать как драйверы повышения энергоэффективности, и в силу межведомственных разногласий и финансовых затруднений в настоящее время они не нашли должной широкой поддержки при реализации проектов.

Рассмотрим внедрение абсорбционных тепловых насосов для утилизации тепла оборотного водоснабжения, обеспечивающего охлаждение технологического оборудования промышленных предприятий. На предприятиях имеются низкотемпературные тепловые вторичные энергетические ресурсы (далее – ВЭР), теплота которых в количестве около 250 Гкал/ч рассеивается в окружающую среду с оборотной водой, обеспечивающей охлаждение технологического оборудования. Общий потенциал энергосбережения на предприятиях может дать экономию природного газа в стране около 270 млн м³ в год. Требуемые инвестиции для реализации мероприятия на всех промышленных предприятиях – около 0,12 млрд USD. Срок возврата инвестиций составит около 5 лет.

В 2022–2023 гг. с учетом разработки технико-экономического обоснования целесообразно внедрить абсорбционные тепловые насосы для утилизации тепла оборотного водоснабжения, обеспечивающего охлаждение технологического оборудования, на следующих промышленных предприятиях (см. таблицу).

Объем замещения природного газа на промышленных предприятиях Беларуси

Наименование проекта	Мощность, МВт	Объем замещения природного газа, млн м ³
ОАО «Светлогорский ЦКК»	12,8	7,3
ОАО «Пинский мясокомбинат»	2,0	0,6
ОАО «Криница»	1,5	0,45
ОАО «Рогачевский МКК»	2,0	0,6

Окончание

Наименование проекта	Мощность, МВт	Объем замещения природного газа, млн м ³
Сморгонское РУП «Жилищно-коммунальное хозяйство»	10,0	3,0
ОАО «Слуцкий мясокомбинат»	1,0	3,0
ОАО «Гродно Азот»	3,5	10,0

Кроме того, абсорбционные тепловые насосы для утилизации тепла оборотного водоснабжения, обеспечивающего охлаждение технологического оборудования, целесообразно внедрить на таких предприятиях, как ОАО «Мозырская соль», завод «Полимир» ОАО «Нафтан», ОАО «Минский моторный завод» ОАО «МТЗ», ОАО «МАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ», ОАО «БелАЗ», ОАО «Интеграл», на некоторых мясоперерабатывающих предприятиях, что позволит согласно расчетам заместить около 46 млн м³ природного газа в год.

В соответствии с Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24 июня 2020 г. № 360 «О подготовке к работе в осенне-зимний период 2020/2021 года» в организациях, подчиненных ГПО «Белэнерго», к осенне-зимнему периоду 2020/2021 гг. создан запас мазута топочного в объеме не менее 350 тыс. т.

Для создания и поддержания требуемых условий хранения мазута топочного необходимо затратить около 186 тыс. Гкал тепловой энергии в год и соответственно использовать около 27,5 млн м³ природного газа.

Вместе с тем целесообразно обеспечить теплоснабжение мазутных хозяйств от электрокотлов, что позволит исключить использование природного газа для создания и поддержания требуемых условий хранения мазута топочного.

Перевод мазутного хозяйства на электронагрев на энергоисточниках ГПО «Белэнерго» (Западная МТЭЦ (г. Пинск), Лидская МТЭЦ, Северная МТЭЦ (г. Гродно), Молодечненская МТЭЦ, Солигорская МТЭЦ, Восточная РК-2 (г. Брест), Южная РК (г. Брест), РК «Северная» (г. Витебск), РК «Рогачевская» (г. Рогачев)), на которых уже установлены электрокотлы, позволит снизить использование природного газа около 2 млн м³ в год. Требуемая мощность электрокотлов на теплоснабжение мазутных хозяйств составляет около 3 МВт при постоянном нагреве и около 9 МВт – при нагреве в период минимальных нагрузок.

Суммарный потенциал установки электрокотлов в организациях ГПО «Белэнерго» для нагрева мазута топочного составляет около 70 МВт при постоянном нагреве и около 210 МВт – при нагреве в период минимальных нагрузок.

Перевод термических печей с природного газа на современные электротехнологии является перспективным мероприятием не только в отношении экономии топливно-энергетических ресурсов, но и приводит к изменению структуры потребления энергоресурсов в сторону увеличения использования электрической энергии, что также повышает энергоэффективность производства промышленной продукции, ее качество и конкурентоспособность.

На предприятиях республики эксплуатируются более 3500 печей для нагрева и термообработки металлов. В 2019 г. потребление импортируемого природного газа на технологические нужды организациями Минпрома составило около 240 млн м³.

Суммарная установленная мощность электрических печей, которыми могут быть заменены газопламенные печи, составляет около 120–130 МВт. Технически целесообразным будет перевод на электронагрев примерно 40–55 % газопламенных

печей, что соответственно составляет около 70 МВт установленной электрической мощностью. При двухсменном режиме работы оборудования (4140 ч) увеличение потребления электроэнергии составит около 290 млн кВт · ч. Ожидаемый объем замещения природного газа составит около 56 млн м³ природного газа.

В 2021 г. при условии гибкой тарифной политики целесообразно обеспечить перевод на электронагрев около 15 МВт газопламенных печей, что позволит заместить около 12 млн м³ природного газа.

Если организовать совместную утилизацию теплоты за счет установки абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (далее – АБТН) на ТЭЦ для охлаждения низкотемпературных тепловых ВЭР промышленных предприятий сопряженного промышленного узла (например, Мозырская ТЭЦ – ОАО «Мозырский НПЗ», Гродненская ТЭЦ-2 – ОАО «ГродноАзот», Новополоцкая ТЭЦ – ОАО «Нафтан» завод «Полимир») и использовать теплоту, рассеиваемую в окружающую среду, для нагрева сетевой воды, то возможно только на крупных ТЭЦ Беларуси достичь экономии природного газа в стране около 0,36 млрд м³ в год.

Справочные данные: для оценки экономической эффективности таких технических решений в условиях Республики Беларусь по исходным данным РУП «Гомельэнерго», техническим условиям ОАО «Мозырский НПЗ» разработано технико-экономическое обоснование пилотного проекта для промышленного узла Мозырская ТЭЦ – ОАО «Мозырский НПЗ» внедрения АБТН суммарной тепловой мощностью до 105 МВт, где показаны хорошие результаты – экономия природного газа 21,4 млн м³ в год, требуемые инвестиции для реализации проекта составляют 16 млн USD, срок окупаемости проекта – около 5 лет.

Также проведена оценка мероприятия по использованию на Светлогорской ТЭЦ низкотемпературных тепловых ВЭР ОАО «Светлогорский ЦКК» для теплоснабжения г. Светлогорска. Внедрение АБТН суммарной тепловой мощностью до 105 МВт позволит снизить использования импортируемого природного газа за счет утилизации низкотемпературных тепловых ВЭР около 17,7 млн м³ в год, а при переводе Светлогорской ТЭЦ в режим котельной и передаче электрической нагрузки на Белорусскую АЭС – еще на 84 млн м³ в год. Требуемые инвестиции для реализации проекта составляют около 16 млн USD. Аналогичные технические решения по сопряжению ТЭЦ и промышленных предприятий на протяжении около 10 лет апробированы на ТЭЦ в Южной Корее и Китае.

В первую очередь, необходимо реализовать мероприятия на следующих сопряженных промышленных узлах: Минская ТЭЦ-2 – ОАО «Коммунарка», Мозырская ТЭЦ – ОАО «Мозырский НПЗ», Гродненская ТЭЦ-2 – ОАО «Гродно Азот», Минская ТЭЦ-3 – ОАО «МТЗ», Новополоцкая ТЭЦ – завод «Полимир» ОАО «Нафтан», Светлогорская ТЭЦ – ОАО «Светлогорский ЦКК», что позволит заместить около 179 млн м³ природного газа.

Суммарно технически доступный потенциал использования вторичных тепловых ресурсов в Республике Беларусь может заместить около 2,5 млрд м³ в год импортируемого природного газа.

**ОЦЕНКА СХОЖЕСТИ ВИДА СТРУКТУРНЫХ ПОЛЕЙ СУТОЧНОГО
ПОТРЕБЛЕНИЯ ГАЗА ДЛЯ УКРУПНЕННОЙ БАЛАНСОВОЙ
ГРУППЫ «МИНЖИЛКОМХОЗ»
РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

В. М. Спитальников

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

Цель работы – оценка схожести вида структурных полей укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» региональной системы газоснабжения (РСГС) в целях повышения эффективности ее функционирования.

Теоретической и методологической основой работы являются положения системного анализа. Для информационного описания укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» РСГС использовалась информационная база данных (ИБД). Для морфологического описания системы применялся корреляционно-регрессионный анализ. Функциональное описание системы основывалось на положениях регрессионного анализа и методах сглаживания временных рядов.

Впервые в качестве информационной основы научных исследований функционирования РСГС принята суточная статистика по объемам потребляемого газа, среднесуточным значениям температуры за 2012–2017 г. Для построения полей « $V_{сут} - t_{сут}$ » среднесуточная температура наружного воздуха пересчитана в градусы по Кельвину, отнормирована относительно среднегодового значения. Это позволило работать только с положительными относительными значениями суточной температуры. В результате весь возможный суточный ряд температуры наружного воздуха за год представлен диапазоном от 0,9 до 1,1 о. е. Суточные значения объема потребления газа также отнормированы относительно среднегодового значения. Это сделало возможным проводить анализ и сравнение структурных полей « $V_{сут} - t_{сут}$ » за различные годы.

Для укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» было установлено, что коэффициент корреляции между суточным потреблением газа и среднесуточной температурой наружного воздуха « $V_{сут} - t_{сут}$ » за шестилетний период находится в диапазоне от $-0,92$ до $-0,96$, что указывает на достаточно высокую связь между указанными факторами.

В целом структурное суточное поле « $V_{сут} - t_{сут}$ » относится к виду с четким расчленением на две области, определяемые состоянием системы отопления («включено» либо «отключено»), и перекрытием этих областей в зоне неустойчивого, неопределенного состояния РСГС.

В табл. 1 представлены результаты расчета парной корреляции между рядами укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» Гомельской РСГС за 2012–2017 гг.

Таблица 1

Оценка коэффициента парной корреляции R между рядами значений $B_{сут}$ за 2012–2017 гг.

Укрупненная балансовая группа «Минжилкомхоз» РСГС в разные годы	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
2012	1	0,941	0,941	0,903	0,946	0,934
2013	0,941	1	0,918	0,909	0,933	0,929
2014	0,941	0,918	1	0,881	0,924	0,898
2015	0,903	0,909	0,88	1	0,913	0,898
2016	0,946	0,933	0,924	0,913	1	0,926
2017	0,934	0,929	0,898	0,898	0,926	1

Высокие значения коэффициентов корреляции R между рядами значений $B_{сут}$ свидетельствуют об устойчивости вида структурных полей « $B_{сут} - t_{сут}$ » во времени и их практически полном наложении друг на друга, что позволяет говорить об универсальности моделей, описывающих данные поля.

Построение моделей суточного, среднемесячного потребления газа по РСГС произведено отдельно для отопительного периода и отдельно для сниженных значений $B_{сут}$ летнего периода. Поля, представляющие собой зависимость $B_{сут} = F(t)$ и $B_{ср.мес} = F(t)$, описаны уравнениями вида $B_{сут} = -at + b_{усл.-пост}$ и $B_{ср.сут30} = -at_{ср.сут30} + b_{усл.-пост}$ (рис. 1). Коэффициент наклона прямой « a », который представляет собой тангенс угла между прямой и положительным направлением температурной оси, принят как сезонный коэффициент потребления газа.

Выполним анализ результатов моделирования. Виды структурных полей устойчивы за шестилетний период. Если рассмотреть результаты моделирования 2012 г., то видно, что у моделей, построенным как по фактическим, так и по сглаженным данным, высокий коэффициент детерминации отопительного периода – 0,944 и 0,996. Коэффициенты детерминации моделей отключенного состояния системы отопления составляют 0,392 (по фактическим данным) и 0,872 (по сглаженным данным).

Что касается сезонного коэффициента « a », то для отопительного периода он практически в 12,86 раз выше режима отключенного состояния системы отопления.

Схожие закономерности обнаружены для структурных полей суточного расхода газа от температуры наружного воздуха и для 2013–2017 гг. У всех моделей, построенных по сглаженным данным (независимо от года), отмечается высокий коэффициент детерминации. Для моделей отопительного периода R_2 составил: 2013 г. – 0,992; 2014 г. – 0,991; 2015 г. – 0,954; 2016 г. – 0,985; 2017 г. – 0,995. Для моделей области отключенного состояния системы отопления R_2 составил: 2013 г. – 0,942; 2014 г. – 0,88; 2015 г. – 0,88; 2016 г. – 0,939; 2017 г. – 0,926.

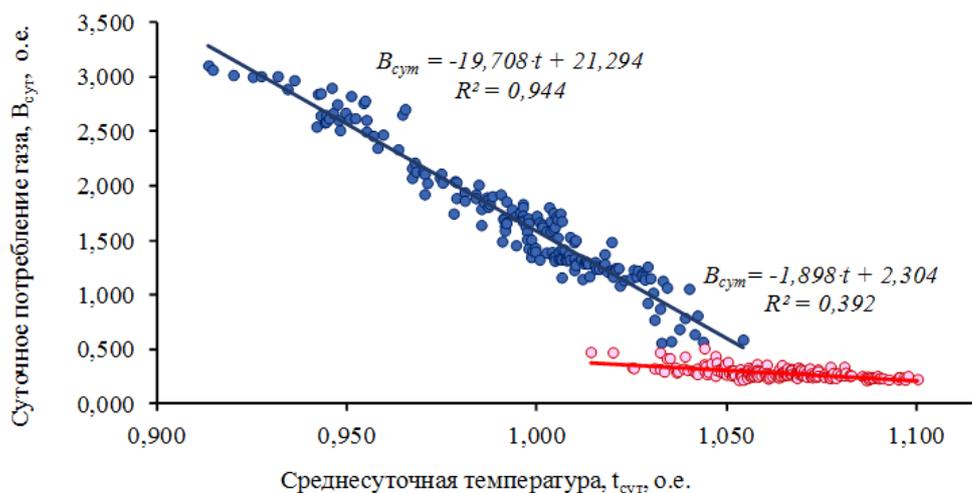


Рис. 1. Модели $B_{сут} = F(t_{сут})$ укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» РСГС за 2012 г., построенные по суточным несглаженным данным

В табл. 2 представлены сводные значения результатов моделирования суточного расхода газа для укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» РСГС по сглаженным данным (30 суток).

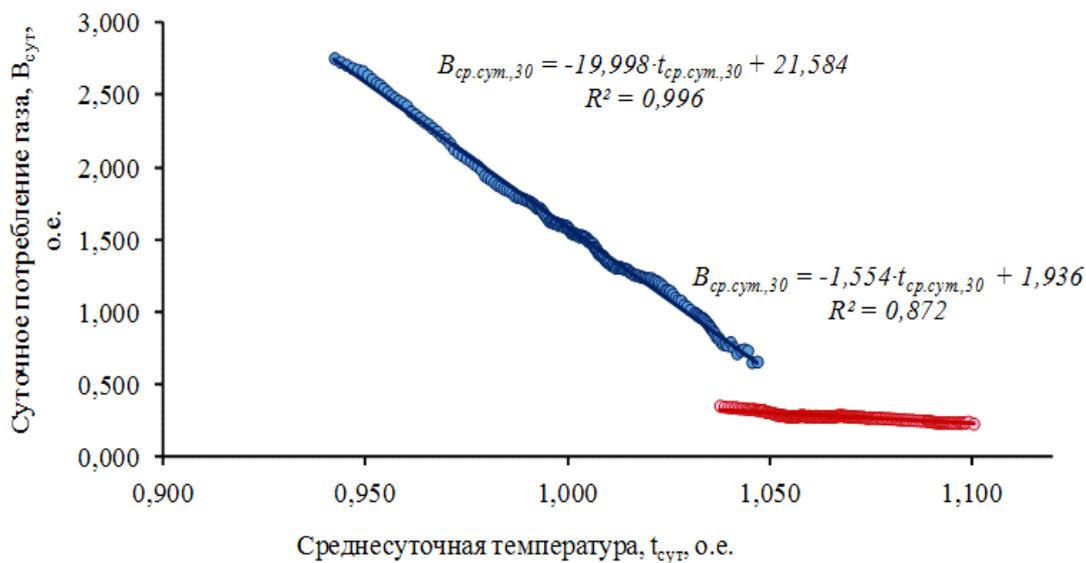


Рис. 2. Модели $B_{сут} = F(t_{сут})$ укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» РСГС за 2012 г., построенные на основе сглаженных (30 суток) данных

Характеристики моделей суточного расхода газа от температуры наружного воздуха (по сглаженным данным) для двух режимов укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз» РСГС даны в табл. 2.

Таблица 2

**Суточный расход газа от температуры наружного воздуха
(по сглаженным данным) для двух режимов укрупненной
балансовой группы «Минжилкомхоз» РСГС**

Наименование укрупненной балансовой группы, подгруппы	Год	Отопительный период (режим 1) $B_{\text{ср.сут30}} = -at_{\text{ср.сут30}} + b_{\text{усл.-пост}}$			Система отопления отключена (режим 2) $B_{\text{ср.сут30}} = -at_{\text{ср.сут30}} + b_{\text{усл.-пост}}$		
		Вид уравнения	Сезонный коэффициент, a	Условно-постоянная, не зависящая от температуры, $b_{\text{усл.-пост}}$	Вид уравнения	Сезонный коэффициент, a	Условно-постоянная, не зависящая от температуры, $b_{\text{усл.-пост}}$
Группа «Минжилкомхоз»	2012	$B_{\text{ср.сут30}} = -19,99 \times t_{\text{ср.сут30}} + 21,58$ $R_2 = 0,996$	-19,99	21,58	$B_{\text{ср.сут30}} = -1,554 \times t_{\text{ср.сут30}} + 1,94$ $R_2 = 0,872$	-1,544	1,94
	2013	$B_{\text{ср.сут30}} = -20,175 \times t_{\text{ср.сут30}} + 21,842$ $R_2 = 0,992$	-20,175	21,842	$B_{\text{ср.сут30}} = -1,556 \times t_{\text{ср.сут30}} + 1,933$ $R_2 = 0,942$	-1,556	1,933
	2014	$B_{\text{ср.сут30}} = -19,733 \times t_{\text{ср.сут30}} + 21,423$ $R_2 = 0,991$	-19,733	21,423	$B_{\text{ср.сут30}} = -1,141 \times t_{\text{ср.сут30}} + 1,521$ $R_2 = 0,880$	-1,141	1,521
	2015	$B_{\text{ср.сут30}} = -22,433 \times t_{\text{ср.сут30}} + 24,255$ $R_2 = 0,95$	-22,433	24,255	$B_{\text{ср.сут30}} = -4,523 \times t_{\text{ср.сут30}} + 5,116$ $R_2 = 0,88$	-4,523	5,116
	2016	$B_{\text{ср.сут30}} = -18,559 \times t_{\text{ср.сут30}} + 20,265$ $R_2 = 0,985$	-18,559	20,265	$B_{\text{ср.сут30}} = -1,435 \times t_{\text{ср.сут30}} + 1,797$ $R_2 = 0,939$	-1,435	1,797
	2017	$B_{\text{ср.сут30}} = -23,103 \times t_{\text{ср.сут30}} + 24,797$ $R_2 = 0,995$	-23,103	24,797	$B_{\text{ср.сут30}} = -1,231 \times t_{\text{ср.сут30}} + 1,597$ $R_2 = 0,922$	-1,231	1,597

Качество моделирования, оцененное с использованием коэффициента детерминации R^2 , можно оценить как высокое. Соотношение между сезонными коэффициентами моделей составляет: 2012 г. – 12,86; 2013 г. – 12,97; 2014 г. – 17,3; 2015 – 4,95; 2016 г. – 12,93; 2017 – 18,77.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПОЛЕЙ СУТОЧНОГО
ПОТРЕБЛЕНИЯ ГАЗА УКРУПНЕННОЙ БАЛАНСОВОЙ
ПОДГРУППЫ «МИНПРОМ»
РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

М. П. Малашенко

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

Целью работы является исследование структурных полей потребления газа для укрупненной балансовой группы «Минпром» региональной системы газоснабжения (РСГС) в целях повышения эффективности ее функционирования.

Теоретической и методологической основой работы являются положения системного анализа. Для информационного описания укрупненной балансовой группы «Минпром» РСГС использовалась информационная база данных (ИБД). Для морфологического описания системы применялся корреляционно-регрессионный анализ. Функциональное описание системы основывалось на положениях регрессионного анализа и методах сглаживания временных рядов.

Рассмотрим полученные результаты. Подгруппа «Минпром», входящая в состав укрупненной балансовой группы «Промышленность» РСГС, включает в свой состав 27 промышленных предприятий. В структуре годового потребления газа РСГС доля укрупненной балансовой подгруппы «Минпром» достигает за разные годы следующих значений: 2012 г. – 34,64 %; 2013 г. – 33,39 %; 2014 г. – 33,74 %; 2015 г. – 34,02 %; 2016 г. – 37,56 %; 2017 г. – 39,65 %.

Для подгруппы «Минпром» было установлено, что коэффициент корреляции между суточным потреблением газа и среднесуточной температурой наружного воздуха « $B_{сут} - t_{сут}$ » имеет средние значения (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между среднесуточной температурой наружного воздуха и суточным потреблением газа подгруппы «Минпром»

Подгруппа укрупненной балансовой группы «Промышленность» РСГС	Коэффициенты корреляции между среднесуточной температурой наружного воздуха и суточным потреблением газа $R(t_{сут} - P_{сут})$					
	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Подгруппа «Минпром»	-0,76	-0,77	-0,64	-0,39	-0,63	-0,67

Для укрупненной балансовой подгруппы «Минпром» построены структурные поля « $B_{сут} - t_{сут}$ » за 2012–2017 гг. (рис. 1). Для анализа структурных полей предложено выделить 4 диапазона изменения температуры: первый температурный диапазон – 0,9–0,97 о. е., что соответствует диапазону среднесуточной температуры от –27,3 °С до –8,2 °С; второй температурный диапазон – от 0,97 до 1 о. е., что соответствует диапазону среднесуточной температуры от –8,2 до 0 °С; третий температурный диапазон – 1,0–1,03 о. е., что соответствует диапазону среднесуточной температуры от 0 °С до +–8 °С; четвертый температурный диапазон – более 1,03 о. е., что соответствует среднесуточной температуре более +8 °С.

В табл. 2 приведены показатели структуры суточного расхода газа по температурным диапазонам за 2016–2017 гг.

Установлены следующие закономерности формирования суточного потребления газа от среднесуточной температуры наружного воздуха:

– четвертая область, соответствующая самой высокой температуре наружного воздуха, объединяет наибольшее количество суток от годового значения (от 53 до 46 %). Для данной области коэффициент вариации по суточному потреблению газа находится в диапазоне от 8,4 % в 2012 г. до 39,8 % в 2016 г. Это свидетельствует о неустойчивости режимов работы предприятий, входящих в состав данной подгруппы в летний период;

– первая область, соответствующая самой низкой температуре наружного воздуха, включает наименьшее количество дней на годовом интервале и характеризует наиболее тяжелые по температуре и по продолжительности сутки зимнего периода. Так, в 2015 г. в данную область попало лишь 7 суток с максимальным суточным потреблением газа 1,395 о. е., что соответствовало «теплой зиме». В 2012 г. в данную область вошло 42 дня с максимальным суточным потреблением газа 1,742 о. е. Для первой области, как и для четвертой, характерен более низкий (по сравнению со второй и четвертой областью) коэффициент вариации суточного потребления газа относительно второй и третьей областей;

– вторая область с температурным диапазоном от $-8,2$ до 0 °С, или 0,97–1 о. е. и третья область с температурным диапазоном от 0 до 8 °С отличаются более высоким коэффициентом вариации суточного потребления газа, который в 1,3–1,5 раза превышает коэффициент вариации четвертой и первой областей.

Структурное поле « $V_{сут} - t_{сут}$ » подгруппы «Минпром» имеет следующий вид: без четкого расслоения на области, определяемые состоянием системы отопления («включено» либо «отключено»), слабая тенденция роста суточного потребления газа при снижении температуры наружного воздуха. Анализ структурных полей суточного расхода газа для подгруппы «Минпром» указывает на необходимость учета не только температурного фактора при прогнозировании расхода газа, но и поиск других факторов, связанных с промышленным производством: изменение объема производственной программы, качество сырья, износ технологического оборудования, или изменение его состава.

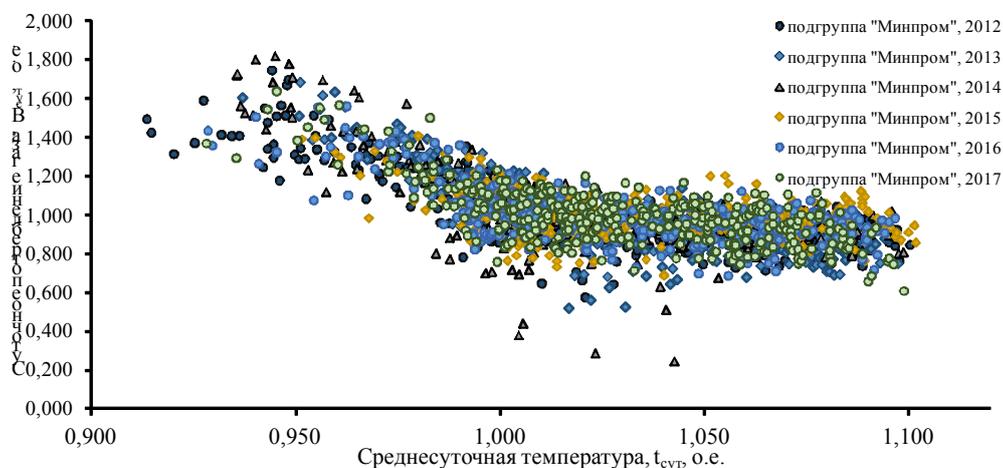


Рис. 1. Вид структурного поля « $V_{сут} - t_{сут}$ » укрупненной балансовой группы «Минжилкомхоз»

**Показатели зон структурных полей « $B_{\text{сут}} - t_{\text{сут}}$ » группы «Минпром» РСФС
за 2016–2017 гг.**

Наименование показателя	Температура наружного воздуха, $t_{\text{сут}}$, о. е.			
	0,9–0,97 о. е.	0,97–1 о. е.	1–1,03 о. е.	1,03–1,1 о. е.
	От –27,3 до –8,2 °С	От –8,2 до 0 °С	От 0 до 8 °С	Больше 8 °С
2012 г.				
Среднесуточное потребление газа, $B_{\text{сут ср}}$, о. е.	1,380	1,098	0,956	0,909
Количество суток, попавших в диапазон, N , сут	42	52	79	193
Максимальное суточное потребление газа, $B_{\text{сут макс}}$, о. е.	1,742	1,353	1,202	1,069
Минимальное суточное потребление газа, $B_{\text{сут мин}}$, о. е.	1,079	0,780	0,575	0,712
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,142	0,145	0,116	0,077
Коэффициент вариации по газу V , %	10,3	13,2	12,1	8,4
2013 г.				
Среднесуточное потребление газа, $B_{\text{сут ср}}$, о. е.	1,478	1,211	0,992	0,880
Количество суток, попавших в диапазон, N , сут	42	52	79	193
Максимальное суточное потребление газа, $B_{\text{сут макс}}$, о. е.	1,681	1,464	1,224	1,136
Минимальное суточное потребление газа, $B_{\text{сут мин}}$, о. е.	1,283	0,864	0,518	0,524
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,114	0,116	0,145	0,099
Коэффициент вариации по газу V , %	7,7	9,6	14,7	11,3
2014 г.				
Среднесуточное потребление газа, $B_{\text{сут ср}}$, о. е.	1,507	1,136	0,970	0,912
Количество суток, попавших в диапазон, N , сут	27	42	116	180
Максимальное суточное потребление газа, $B_{\text{сут макс}}$, о. е.	1,814	1,571	1,167	1,083
Минимальное суточное потребление газа, $B_{\text{сут мин}}$, о. е.	1,115	0,699	0,286	0,244
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,197	0,187	0,139	0,092
Коэффициент вариации по газу V , %	13,1	16,5	14,4	10,1
Среднесуточное потребление газа, $B_{\text{сут ср}}$, о. е.	1,273	1,125	0,985	0,970

Окончание табл. 2

Наименование показателя	Температура наружного воздуха, $t_{\text{сут}}$, о. е.			
	0,9 – 0,97 о. е.	0,97 – 1 о. е.	1 – 1,03 о. е.	1,03 – 1,1 о. е.
	От –27,3 до –8,2 °С	От –8,2 до 0 °С	От 0 до 8 °С	Больше 8 °С
2015 г.				
Количество суток, попавших в диапазон, N , сут	7	48	131	179
Максимальное суточное потребление газа, $V_{\text{сут макс}}$, о. е.	1,395	1,405	1,212	1,201
Минимальное суточное потребление газа, $V_{\text{сут мин}}$, о. е.	0,982	0,865	0,730	0,685
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,144	0,124	0,101	0,083
Коэффициент вариации по газу V , %	11,3	11,1	10,2	8,6
2016 г.				
Среднесуточное потребление газа, $V_{\text{сут ср}}$, о. е.	1,391	0,931	1,031	0,972
Количество суток, попавших в диапазон, N , сут.	18	74	97	177
Максимальное суточное потребление газа, $V_{\text{сут макс}}$, о. е.	1,959	1,929	1,752	1,660
Минимальное суточное потребление газа, $V_{\text{сут мин}}$, о. е.	0,485	0,279	0,155	0,074
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,501	0,514	0,459	0,386
Коэффициент вариации по газу V , %	36,0	55,2	44,5	39,8
2017 г.				
Среднесуточное потребление газа, $V_{\text{сут ср}}$, о. е.	1,450	1,117	1,006	0,925
Количество суток, попавших в диапазон, N , сут.	12	55	129	169
Максимальное суточное потребление газа, $V_{\text{сут макс}}$, о. е.	1,635	1,497	1,197	1,165
Минимальное суточное потребление газа, $V_{\text{сут мин}}$, о. е.	1,258	0,757	0,764	0,607
Среднеквадратическое отклонение, σ , о. е.	0,113	0,134	0,099	0,106
Коэффициент вариации по газу V , %	7,8	12,0	9,8	11,5

ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ «УМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ» В СИСТЕМУ ГОРОДСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ТУРКМЕНИСТАНЕ

А. Матъякубов, А. Азадова, Б. Атаджанов

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

В наше время требования к надежности уличного освещению по международным стандартам повышаются. В уличном освещении все еще используются люминесцентные лампы высокого давления. В системе уличного освещения имеются свои преимущества и недостатки: потери электрической энергии в ЛЭП при передаче на большие расстояния, зависимость освещенности от качества напряжения, также су-

ществуют потери в ПРА и ИЗУ. В результате всех упомянутых выше недостатков возникает ряд дополнительных затрат.

В современном мире почти всем странам удалось преодолеть эту проблему с помощью применения ВИЭ, которые считаются «энергией будущего», используя солнечную и ветровую энергии.

Для устранения или уменьшения недостатков уличного освещения на научно-исследовательской площадке Государственного энергетического института Туркменистана проводятся научные исследования со светодиодным светильником, питание которого осуществляется с помощью солнечной панели. В светильнике встроены датчики движения и освещенности, аккумуляторная батарея и контроллер уровня заряда.

На сегодняшний день в Туркменистане существует около 220 тыс. опор уличного освещения, из них:

- 54 тыс. шт. светильников типа РКУ с лампами ДРЛ мощностью 250 Вт;
- 103,5 тыс. шт. светильников типа ЖКУ с лампами ДНаТ мощностью 400 Вт;
- 41,5 тыс. шт. светодиодных светильников с мощностью лампы 210 Вт;
- 21 тыс. шт. светодиодных светильников с мощностью лампы 180 Вт.

Одна из самых освещенных улиц г. Мары – это улица Кемине, длина ее составляет примерно 2 км. Осветительные опоры расставлены по краям улицы, расстояние между ними – 24 м., общее количество светильников – 42 шт. на каждую сторону. Тип установленных светильников – типа ЖКУ с лампами ДНаТ мощностью 400 Вт. Срок их службы составляет примерно 5,5 года.

Расчитаем годовое потребление электрической энергии на улице Кемине на освещение при существующих светильниках:

$$W_1 = P \cdot N \cdot T = 0,4 \cdot 84 \cdot 4120 = 138432 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

В данной научной работе предлагается замена существующих ламп ЖКУ с лампами ДНаТ мощностью 400 Вт на светодиодные лампы – светодиодный консольный РWL 200 Вт. Сравнительная характеристика ламп приведена в таблице.

Наименование характеристики	ДнаТ 400	Светодиодный консольный РWL 200W IP66
Потребляемая мощность, Вт	400	200
Световой поток, лм	33800	34000
Срок службы, ч	24000	50000
Напряжение, В	220–230	90–305

Годовое потребление электрической энергии на улице Кемине при замене ламп ДНаТ на светодиодные источники света:

$$W_2 = P \cdot N \cdot T = 0,2 \cdot 84 \cdot 4120 = 69216 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Экономия электрической энергии при замене составит:

$$\Delta W = 138432 - 69216 = 69216 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

В тепловых электрических станциях Туркменистана для выработки 1 кВт · ч. электрической энергии удельный расход топлива (природного газа) равен $b = 0,487 \text{ м}^3/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, следовательно, каждый год экономия природного газа составит:

$$B = b \cdot \Delta W = 0,487 \cdot 69216 = 33708,2 \text{ м}^3,$$

при этом каждый год в атмосферу земли будет на 62,4 т меньше выбросов CO₂.

Также в этой работе предлагается установка солнечных панелей (светодиодные лампы номинальным напряжением 18–36 В), в комплект которой входит солнечная панель мощностью 325 Вт, светодиодный светильник мощностью 200 Вт и два аккумулятора емкостью 200 А/ч. Интенсивность солнечного излучения на всей территории Туркменистана составляет 700–800 Вт/м² [2].

Уличный светодиодный светильник с номинальной мощностью 60 Вт установленный на научно-исследовательской площадке ГЭИТ, представлен на рис. 1.



Рис. 1. Уличный светодиодный светильник с номинальной мощностью 60 Вт, установленный на научно-исследовательской площадке ГЭИТ

Светильник начинает освещать улицу при уровне освещенности менее 75 лк и прекращает утром, когда уровень освещенности на улице больше 75 лк.

Вольт-амперная характеристика светильника мощностью 60 Вт приведена на рис. 2.

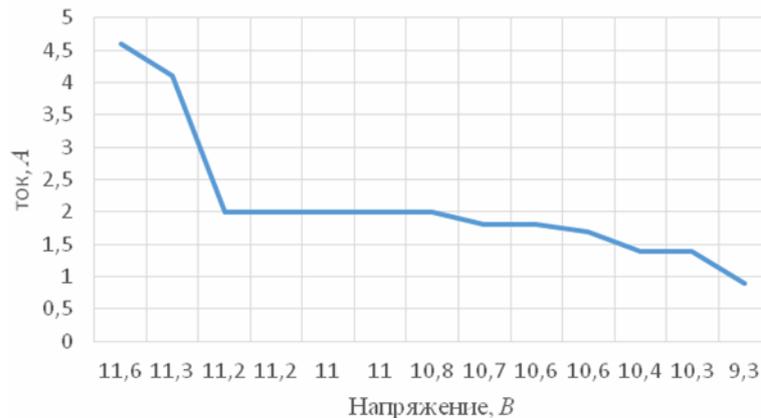


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика светильника мощностью 60 Вт

Зависимость уровня освещенности от времени суток дана на рис. 3.

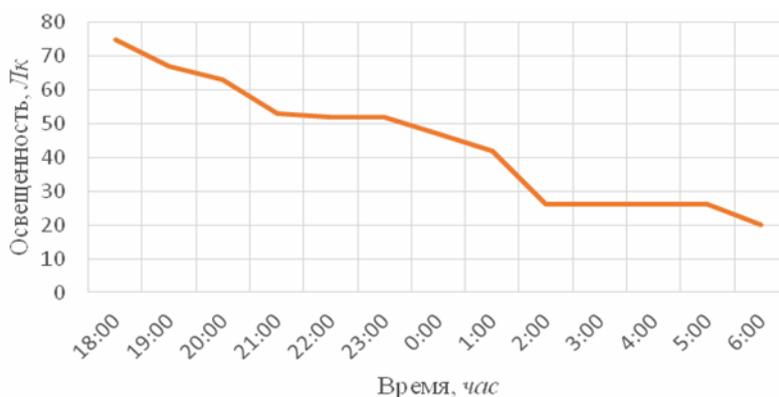


Рис. 3. Зависимость уровня освещенности от времени суток

Как видно из рис. 3, уровень освещенности напрямую зависит от времени; это программное обеспечение осуществляется с помощью контроллера.

При внедрении данной технологии в год экономия природного газа составит:

$$B = b \cdot \Delta W = 0,487 \cdot 138432 = 67416,4 \text{ м}^3$$

природного газа, при этом каждый год в атмосферу Земли будет на 124,8 т меньше выбросов CO₂.

В результате проведенной научной работы можно с уверенностью сказать о том, что в Туркменистане есть большой потенциал по использованию солнечной энергии: замена всех светильников с газоразрядными лампами высокого давления позволит увеличить экспорт газа, приведет к уменьшению выбросов углекислого газа, но высокая цена за оборудование солнечных элементов и очень маленькая цена за оплату электрической энергии в Туркменистане на сегодняшний день препятствуют развитию ее использования.

Литература

1. Режим доступа: <https://powerlux.com.ua/product/svetilnik-svetodiodnyy-konsolnyy-pwl-200w-6500k-ip/0c301fb9aed611ea/>. – Дата доступа: 01.03.2021.
2. Джумаев, А. Научно-технический и методологический анализ ресурсов и развития солнечной энергии в Туркменистане : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / А. Джумаев. – Ашхабат, 2016.

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ БАЛКАНСКОЙ ОБЛАСТИ ТУРКМЕНИСТАНА

А. Я. Джумаев

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Постановлением Президента Туркменистана от 4 декабря 2020 г. утверждена «Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики до 2030 года». Национальная стратегия Туркменистана по развитию возобновляемой энергетики разрабатывалась с целью диверсификации топливно-энергетических ресурсов, увеличения экспортного потенциала природного газа и электрической энергии, обеспечения удаленных регионов недорогостоящей и чистой энергией, повышения уровня жизни населения и развития промышленности, а также достижения целей устойчивого развития и Парижского соглашения по климату [1].

13 марта 2021 г. на рассмотрение парламентариев Туркменистана был вынесен проект Закона «О возобновляемых источниках энергии». Закон был принят Меджлисом и подписан Президентом Туркменистана. В соответствии с приоритетами государственной политики Президента Гурбангулы Бердымухамедова в Туркменистане уделяется большое внимание вопросам охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов, планомерного перехода к «зеленой экономике». В нефтегазовом секторе, электроэнергетике, химической промышленности, транспорте, других сферах и отраслях внедряются инновационные, экологически чистые технологии. Наша страна является членом Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA), активно сотрудничает в этой области с ПРООН, ОБСЕ и другими международными организациями. В этой связи особую актуальность имеет новый Закон, который определяет правовую, организационную, экономическую и социальную основы деятельности в области возобновляемых источников энергии и регулирует возникающие отношения, связанные с их использованием, включая энергию солнца, ветра, естественного движения водных потоков, тепла земли и окружающей среды, антропогенные источники первичных энергоресурсов (биомасса, биогаз и иное топливо, получаемое из органических отходов) [2].

Применение фотоэлектрических солнечных станций (ФСС) экономически целесообразно при обоснованной оценке генерируемой и потребляемой мощностей, а также оптимальном соотношении используемых источников энергии для энергообеспечения объектов и территории. При этом, чтобы спрогнозировать и осуществить это, использовать достоверные данные о потенциале солнечной энергии в заданной географической точке с учетом изменчивости прихода солнечной радиации, а также разные варианты расположения источников электрической энергии на рассматриваемой территории. Как известно, методы расчета валового потенциала солнечной энергии основаны на общеизвестном принципе: данные, приведенные для расположенной горизонтальной приемной поверхности для точки с определенными географическими координатами, пересчитываются по эмпирическим формулам, предложенным в литературе на произвольно ориентированную поверхность. Выбор методики расчета зависит от имеющихся исходных данных и условий работы рассматриваемой электроэнергетической установки [3], [4]. В [4] предложена методика, которая сочетает в себе разные подходы, представленная в виде компьютерной программы оценки потенциала солнечной энергии в заданной точке на основе комбинации метода применения дневного профиля поступления солнечной радиации при абсолютной чистом небе и актинометрических данных из электронной базы NASA. При помощи вышеуказанных методик были рассчитаны значения интенсивности солнечной радиации для Балканской области Туркменистана (см. таблицу).

В таблице приведены следующие данные: географические координаты населенных пунктов Балканской области Туркменистана (и некоторых населенных пунктов пограничной области) и соответствующие им годовые значения интенсивности солнечной радиации на наклонную поверхность (угол наклона $\beta = 36^\circ$), а также рассчитанные значения интенсивности солнечной радиации на наклонную поверхность с помощью линейной интерполяции. Изменение годовой интенсивности солнечного излучения в зависимости от северной широты местности для населенных пунктов показано на рис. 1.

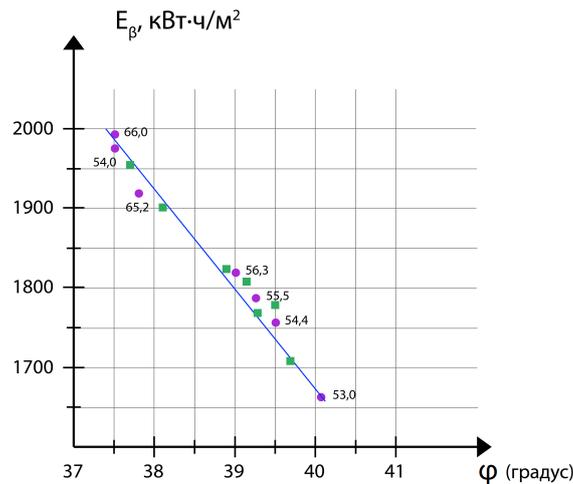


Рис. 1. Изменение годовой интенсивности солнечного излучения в зависимости от северной широты местности

Данные о географических координатах и годовой интенсивности солнечного излучения населенных пунктов Балканской области Туркменистана

Населенный пункт	Географические координаты		E_{β} , кВт · ч/м ²	Линейная интерполяция E_{β} , кВт · ч/м ²
	ϕ , градус с. ш.	ψ , градус в. д.		
Gasanguly	37,5	54,0	1970,323	–
Çarşangy	37,5	66,0	1993,407	–
Atamyrat	37,8	65,2	1919,328	–
Serdar	39,0	56,3	1832,0	1813,27
Bereket	39,3	55,5	1781,86	1788,61
Balkanabat	39,5	54,4	1759,69	1752,71
Türkmenbaşy	40,1	53,0	1665,257	–
Bassmaýili	38,95	56,48	–	1836,61
Ýarty Gala	38,17	56,23	–	1900,17
Agaç-Arbat	37,7	54,78	–	1951,88
Ajy guýy	39,76	54,96	–	1718,77
Aýdyng	39,42	54,83	–	1772,99

Годовая интенсивность солнечной радиации для населенных пунктов на территории Балканской области Туркменистана изменяется от 1718,77 кВт · ч/м² до 1970,323 кВт · ч/м². Используя вышеуказанную методику, была рассчитана годовая интенсивность солнечной радиации для 24 населенных пунктов Туркменистана для угла наклона $\beta = 36^{\circ}$. Для других населенных пунктов это было определено с помощью линейной интерполяции.

При помощи известных методик были рассчитаны значения интенсивности солнечной радиации для населенных пунктов Балканской области Туркменистана и с помощью линейной интерполяции – для населенных пунктов, не имеющих исходных данных в базе данных NASA. Было проведено сравнение расчетной инсоляции в

населенных пунктах, найденных на основе данных из базы NASA, и рассчитанных с помощью линейной интерполяции. Результаты расчета показали, что годовые значения инсоляции для населенных пунктов незначительно отличаются и находятся в пределах 0,4–2,0 %. В результате можно сделать вывод, что для оценки потенциала солнечной энергии на предварительном этапе проектирования фотоэлектрических солнечных станций в любой точке на территории области могут использоваться данные об интенсивности солнечного излучения, рассчитанной или измеренной в некоторых населенных пунктах Балканской области Туркменистана.

Литература:

1. Türkmenistanyň Prezidentiniň Karary bilen tassyklanan «Türkmenistanda 2030-njy ýyly çenli gaýtadan dikeldilýän energetikany ösdürmek boýunça Milli Strategiýa». – Aşgabat, 2020ý.
2. Gaýtadan dikeldilýän energiýa çeşmeleri hakynda Türkmenistanyň Kanuny. – Aşgabat ş. 2021-nji ýylyň 13-nji marty.
3. Лукутин, Б. В. Возобновляемые источники энергии : учеб. пособие / Б. В. Лукутин. – Томск : Из-во Том. политехн. ун-та, 2008. – 184 с.
4. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии : учеб. пособие / А. А. Бурмистров [и др.] ; под. ред. В. И. Виссарионова. – 2-е изд., стер. – М. : МЭИ, 2009. – 144 с.
5. Nazarow, S. Türkmenistanyň welaýatlarynda Günüň energiýasyny ulanmak mümkinçiligi / S. Nazarow, A. Jumaýew // Türkmenistanda ylym we tehnika. – 2019. – № 6.

СИСТЕМА УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ФИДЕРАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Д. Нурмухаммедов, Э. Шахымов, Я. Акымова

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Для решения вопроса оперативного мониторинга распределения электроэнергии в контактной сети требуется совместно с коммерческим учетом электроэнергии осуществлять технический учет, а именно – контроль расхода по фидерам контактной сети (ФКС). Такая автоматизированная система учета электроэнергии на фидерах контактной сети (АСУЭФКС) позволит не только определять объем потерь и величину небаланса, но и выявлять перетоки мощности между подстанциями, вызывающие дополнительные потери. В настоящее время при анализе режимов работы систем тягового электроснабжения используются аналитические и вероятностно-статистические подходы. Методология, теоретическое наполнение и информационно-технологическое сопровождение функционирования автоматизированных систем управления потреблением электроэнергии в объемах тягового электропотребления строятся только на базе информации, получаемой из АСКУЭ. Развитие систем учета электроэнергии на фидерах контактной сети позволит оперативно анализировать режимы работы системы тягового электроснабжения как единого целого, сравнивать текущие показатели на смежных подстанциях, что даст возможность анализировать электрические параметры сетей. Сеть многофункциональных счетчиков электроэнергии, синхронизированных между собой, расположенных в различных узлах энергосистемы, позволит в режиме реального времени предоставлять информацию о текущем состоянии, как отдельных объектов, так и всей энергосистемы в целом. Предложенная методика может использоваться как для определения параметров электрических режимов, так и для параметров схем замещения тяговой сети. Задача получения синхронизированных измерений, которая возникает для распределенных объектов электроэнергетики, может решаться с помощью штатной системы синхронизации, существующей в системе передачи данных ОАО «РЖД». Эта систе-

ма обеспечивает точность синхронизации до 0,1 с. Глобальные системы ГЛОНАСС и GPS дают возможность повысить точность синхронизации на несколько порядков. Функциональная схема системы учета электроэнергии на фидерах контактной сети представлена на рис. 1. Предлагается вести оперативный учет как на выводах выпрямительных (выпрямительно-инверторных) преобразователей, так и на каждом фидере контактной сети.

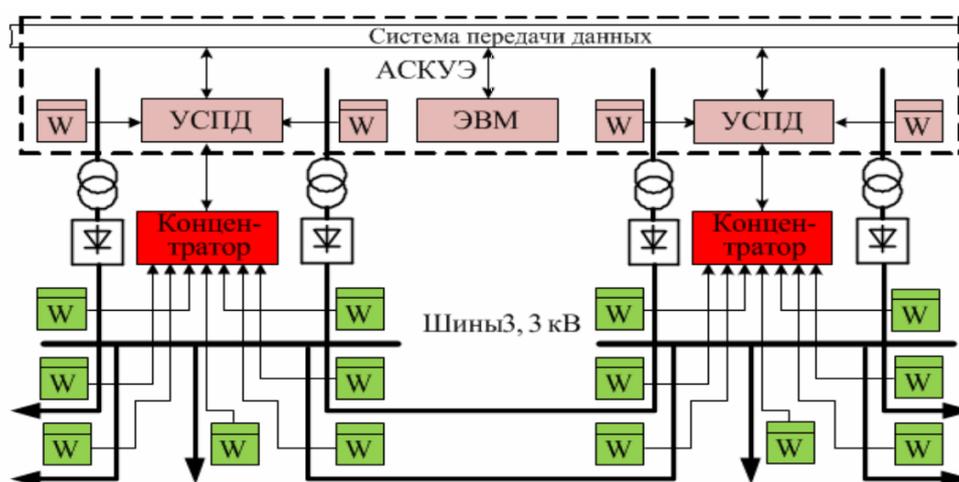


Рис. 1. Функциональная схема системы учета электроэнергии на фидерах контактной сети

Данные с каждого счетчика передаются на концентраторы, которые хранят информацию за заданный период, создают архивы, передают информацию на верхний уровень информационной системы. Для реализации системы учета электроэнергии концентраторы подключаются к устройствам сбора и передачи данных (УСПД), к которым уже подключены счетчики переменного тока системы АСКУЭ. Использование подсистем АСКУЭ позволит синхронно определять расход электроэнергии, как принятой от системы внешнего электроснабжения, так и отданной в нагрузку. Такой подход дает возможность определять небаланс электроэнергии по каждой подстанции и корректировать уровень небаланса в контактной сети. Рассмотрим системы учета электроэнергии на ФКС постоянного тока.

Структурная схема построена по принципу распределенной вычислительной системы, что определяется двумя независимыми условиями. Первое условие состоит в гальванической изоляции цепей ввода аналогового сигнала от цифровых цепей вывода обработанных данных с высокими требованиями к величине пробивного напряжения. Второе условие состоит в том, что по мере обработки данных изменяются методы этой обработки, т. е. при вводе аналоговых сигналов формируется непрерывный поток преобразованных в цифровой вид данных с равномерной дискретизацией, однако после получения основных вычисляемых значений появляется задача архивирования, управления протоколами передачи данных и управления всей системой в целом. Поэтому система учета электроэнергии разделена на две части.

Измерительный преобразователь подключается к токовому шунту с номинальным выходным напряжением 75 мВ. Резистивный делитель напряжения обеспечивает на выходе напряжение, близкое к 0,5 В, при номинальном входном напряжении 3000 В. Измерительный блок состоит из трех частей: аналого-цифрового преобразователя (АЦП), блока обработки и оптического интерфейса. АЦП преобразует сигнала

лы, пропорциональные напряжению и току, в цифровые отсчеты. В нем предусмотрена температурная компенсация погрешности, а также периодическая коррекция аддитивной погрешности. АЦП соединен с блоком обработки по интерфейсу SPI. Измерительный блок осуществляет измерение сигналов тока и напряжения, вычисляет активную мощность на основе мгновенных значений сигналов тока и напряжения, определяет действующие значения тока и напряжения, создает графики нагрузки. Период вывода данных составляет 5 с, что облегчает дальнейший подсчет потребленной энергии. Блок обработки реализован на одноплатном компьютере «Тион-про-28», который обеспечивает максимально обработку, эффективное распределение, архивирование данных, управление прибором в целом и поддержку протоколов обмена по цифровым интерфейсам. Этот микрокомпьютер является высоко интегрированным устройством и имеет в своем составе почти все необходимые порты для реализации интерфейсов связи. Передача данных в концентратор осуществляется с помощью волоконно-оптической линии связи. Волоконно-оптический интерфейс построен на основе оптического приемопередатчика Netlink НТВ-1100 и оптического коммутатора Dlink DES-3200-28F. Передача информации происходит с помощью интерфейса Ethernet, что обеспечивает высокую скорость передачи данных. Оптический коммутатор позволяет подключить к концентратору до 24 измерительных блоков. Концентратор предназначен для сбора данных от измерительных блоков, архивирования, построения графиков потребления, дополнительной обработки информации, подсчета расхода электроэнергии по всей подстанции. Отображение текущих значений и местное управление осуществляется с помощью сенсорного экрана. Оптический порт является технологическим и предназначен для загрузки, отладки и конфигурирования программы в микроконтроллере. Связь АСУЭФКС через существующий УСПД с подсистемой верхнего уровня осуществляется через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus RTU. Программное обеспечение верхнего уровня, необходимое для работы системы, устанавливается на те же серверы, что и применяемые в АСКУЭ.

Предложенная система позволит определять режимы электропотребления на каждом участке, по каждому фидеру, оценивать уровень загрузки оборудования, эффективность рекуперативного торможения, а также высчитывать потери электроэнергии в реальном времени. Сравнение режимов текущего энергопотребления с энергооптимальными режимами позволит в реальном времени управлять системой электроснабжения. Система может использоваться для сетей тягового электроснабжения как переменного, так и постоянного тока, разница лишь в используемых датчиках тока и напряжения.

Литература

1. Степанов, Ю. А. Оптимизация измерительного комплекса учета электрической энергии и релейной защиты / Ю. А. Степанов, Д. Ю. Степанов. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 208 с.
2. Джонсон, Г. Высокоскоростная передача цифровых данных / Г. Джонсон. – М. : Вильямс, 2005. – 1024 с.
3. Парк, Д. Передача данных в системах контроля и управления / Д. Парк, С. Маккей, Э. Райт. – М. : Группа ИДТ, 2007. – 480 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Н. Алланазаров, Ш. Ылясова, Ч. Мулкиев

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Климатические и географические условия Туркменистана позволяют использовать возобновляемые источники энергии в нашей стране. Это, в частности, помогает улучшить энергообеспечение сельского населения и территорий, удаленных от центра. Одним из видов возобновляемых источников энергии является солнечная энергия. Климатические и географические условия Туркменистана позволяют получать солнечную энергию, активно использовать ее в промышленных и электрических областях для получения электрической и тепловой энергии [1]–[4]. Чтобы фотоэлектрическая электростанция обеспечивала необходимое количество электроэнергии, необходимо правильно подобрать элементы, входящие в ее состав. Вырабатываемая мощность фотоэлектрической солнечной установки зависит от солнечной радиации, полезного коэффициента солнечных панелей, ее общей площади и относительного положения горизонта. В табл. 1 показано среднее потребление электроэнергии в месяц для проживающей в одном доме семьи из 6 человек.

Таблица 1

Среднее потребление электроэнергии в месяц для проживающей в одном доме семьи из 6 человек

Потребитель электроэнергии	Мощность, кВт	Количество	Среднее время работы	Месячный расход электроэнергии, кВт · ч
Лампы освещения	0,06	10	5 ч в сутки	90
Чайник	2	1	0,5 ч в сутки	30
Конвектор (обогреватель)	1	1	4 ч в сутки (с учетом пауз)	120
Телевизор	0,3	1	5 ч в сутки	45
Стиральная машина	1,5	1	6 ч в неделю	36
Компьютер	0,3	1	2 ч в сутки	18
Микроволновая печь	1,2	1	0,5 ч в день	18
Пылесос	1,2	1	30 мин в неделю	3
Холодильник	1	1	2 ч в сутки (с учетом пауз)	60
Утюг	1,2	1	1,5 ч в неделю	7,2
Насос водоснабжения	1,5	1	При среднем включении 80 раз в сутки на 20 с	20
<i>Итого</i>				447,2

В табл. 1 приведены данные о потреблении электроэнергии бытовой техникой за месяц. Средняя потребляемая мощность составляет 14,9 кВт · ч в день. Проведем расчет фотоэлектрической солнечной электростанции в автономном режиме с учетом потребления этой электроэнергии. Электроэнергию, которую солнечные панели будут вырабатывать за день, можно определить по следующей формуле:

$$P_{\Pi} = ESN_{\Pi}\eta_{\Pi}\eta_{T},$$

где P_{Π} – электроэнергия, вырабатываемая солнечной панелью за сутки, кВт · ч; E – солнечная радиация на 1 м² площади в среднем за сутки, кВт · ч; S – площадь солнечной панели, м²; N_{Π} – количество солнечных панелей; η_{Π} – эффективность солнечной панели; η_{T} – коэффициент тепла солнечной панели (на летний сезон – 85 %, на зимний сезон – 1).

Количество солнечных панелей можно определить по следующей формуле, чтобы обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей за счет фотоэлектрической солнечной станции:

$$N_{\Pi} = \frac{P_C}{ES\eta_{\Pi}\eta_{T}},$$

где $P_C = P \cdot 1,2$ – следует учитывать потери в электрических проводах, солнечных контроллерах и инверторах, а также рост потребляемой мощности на 20 % из-за увеличения нагрузки и постепенного снижения эффективности фотоэлектрических элементов во время работы. Тогда:

$$P_C = P \cdot 1,2 = 14,9 \cdot 1,2 = 17,88 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Выработка солнечной панели зависит от количества солнечного излучения, которое она получает. Для г. Мары среднее количество радиации на 1 м² в сутки равно следующим данным (табл. 2) [4].

Таблица 2

Полученные данные

Месяцы	кВт · ч / (м ² · день)
Январь	2,3
Февраль	3,25
Март	4,1
Апрель	5,22
Май	6,33
Июнь	7
Июль	6,93
Август	6,27
Сентябрь	5,21
Октябрь	3,75
Ноябрь	2,66
Декабрь	2,02

Далее мы выполним расчет на примере солнечной панели SIM350-24-PERC-5BB [5]. Как видно из табл. 2, самый низкий период солнечной радиации в течение года – в декабре. Мы определим количество фотоэлектрических солнечных панелей

в соответствии с минимальным периодом солнечной радиации, чтобы без перебоев обеспечивать потребителей электроэнергией за счет фотоэлектрических солнечных станций.

Рассчитаем количество необходимых солнечных панелей:

$$N_{\Pi} = \frac{P_c}{ES\eta_{\Pi}\eta_T} = \frac{17,88}{2,02 \cdot 1,94 \cdot 0,18 \cdot 1} = 25.$$

Теперь выполним расчет выбора преобразователя постоянного тока в переменный с изменением величины напряжения.

Критерии выбора инвертора: $U_{\text{ИНВ}} \geq U_{\text{ФЭМ}} (U_{\text{АБ}})$ – входное напряжение инвертора должно быть равно или больше максимальному напряжению выдаваемой солнечной батареей (в том числе напряжением холостого хода батарей) или АКБ. $U_{\text{ИНВ}} = U_{\text{сети}}$ – выходное напряжение инвертора должно быть равно напряжению питаемых потребителей (сети). $P_{\text{ИНВ}} \geq P_{\text{общ,сети}}$ – мощность, выдаваемая инвертором должна быть больше или равна мощности сети, увеличенной на 30 % [10]. Пиковая мощность инвертора должна соответствовать пусковой мощности самого мощного электроприемника или быть больше ее. Инвертор должен быть той системы, напряжения и частоты, что и питаемая им сеть.

При выборе инвертора учитывается вся суммарная нагрузка приборов, подключаемых к инвертору, увеличенная, как минимум, на 30 % [10]. Выбранный на эту мощность инвертор позволит запускать такие электроприборы, как компрессорный холодильник, насосы и другие с пусковыми мощностями, в 3–4 раза превышающими паспортный.

Рассчитаем мощность инвертора, увеличенную на 30 % [10]:

$$P_{\text{ИНВ}} = P \cdot 1,3 = 14,9 \cdot 1,3 = 19,37 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Анализируем мощность и условно выбираем инвертор SILA PRO 20kW 48V [6]. Обеспечение ночных потребителей требует накопления электроэнергии. Для этого используются аккумуляторные батареи. В наших расчетах мы будем использовать аккумулятор SunStone Power MLG 200Ah 12V [7]. Рассчитаем расход емкости для батареи [8]:

$$\Delta C = \frac{P_c}{U_{\text{ИНВ}}},$$

где P_c – номинальная мощность нагрузки; $U_{\text{ИНВ}}$ – номинальное напряжение нагрузки.

$$\Delta C = \frac{P_c}{U_{\text{ИНВ}}} = \frac{17880}{48} = 372,5 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Глубокий разряд может вывести аккумулятор из строя. Поэтому производители аккумуляторов устанавливают конечное напряжение разряда, при достижении которого аккумулятор необходимо отключать от нагрузки и заряжать. Чтобы аккумулятор служил долго, его нельзя разряжать более чем на 70–80 % [8]. Степень разряженности аккумуляторных батарей (АКБ) СЭС:

$$C = \frac{100 \cdot P_c}{S_{\Pi} \cdot U_{\text{ИНВ}}},$$

где – S_{Π} степень разреженности АКБ.

Наиболее тяжелым режимом эксплуатации АКБ СЭС является зимнее время. Поэтому при расчетах степень разреженности АКБ – $S_{\Pi} = 70 \%$:

$$C = \frac{100 \cdot P_c}{S_{\Pi} \cdot U_{\text{ИНВ}}} = \frac{100 \cdot 17880}{70 \cdot 48} = 532,1 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Количество последовательно включенных аккумуляторных батарей в ветви фотоэлектрической солнечной станции можно определить по следующей формуле:

$$n = \frac{U_{\text{ИНВ}}}{U_a},$$

где U_a – напряжение отдельной аккумуляторной батареи. $U_a = 12$ В для выбранной батареи

$$n = \frac{U_{\text{ИНВ}}}{U_a} = \frac{48}{12} = 4.$$

Количество параллельных ветвей в аккумуляторной батарее СЭС:

$$m = \frac{C}{C_a},$$

где C_a – емкость отдельной аккумуляторной батареи. $C_a = 200$ А · ч согласно выбранной батарее;

$$m = \frac{C}{C_a} = \frac{532,1}{200} = 2,66, \text{ округляем до } 3.$$

Тогда общее число отдельных аккумуляторных батарей в аккумуляторной батарее СЭС соответствует:

$$N = m \cdot n = 3 \cdot 4 = 12.$$

В результате расчетов мы получили количество АКБ, равное 12 шт. Очевидно, что расчет дает завышенную требуемую емкость аккумуляторной батареи. Для более точного определения требуемой емкости необходимо, как можно точнее учесть изменение графика нагрузки на интервале ночного времени суток. Солнечные контроллеры используются для контроля и регулировки заряда аккумулятора на фотоэлектрической станции.

Условия выбора солнечного контроллера: $U_{\text{контр}} \geq U_{\text{ФЭМ}}$ – входное напряжение солнечного контроллера должно быть равно или больше максимального напряжения, выдаваемого солнечной батареей (в том числе напряжения холостого хода батарей). $U_{\text{контр}} \geq U_a$ – выходное напряжение солнечного контроллера, должно быть равно или

больше максимального напряжения заряжаемой им АКБ. $I_{\text{контр}} \geq I_{\text{зар.аб}}$ – ток заряда, выдаваемый солнечным контроллером, должен быть больше или равен максимальному току заряда АКБ. Солнечный контроллер должен подходить к типу АКБ (т. е. уметь заряжать данную АКБ).

Максимальный ток заряда АКБ определяется согласно формуле [9]:

$$I_{\text{зар.аб}} = 0,1 \cdot C_a = 0,1 \cdot 200 = 20 \text{ А.}$$

Исходя из количества параллельно соединенных ветвей $m \cdot AB$, выбираем количество, равное 4 шт. DELTA PWM-2420 контроллеров на ток 20 А.

В данной работе рассмотрены принципы расчета, выбора и работы систем электроснабжения с использованием нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Проведен расчетный анализ фотоэлектрической солнечной электростанции для обеспечения жилья электроэнергией в условиях автономного электроснабжения. Показано, что применение нетрадиционных источников энергии на данный момент вызывает большие затраты по сравнению с традиционными источниками энергии, но более экологично. В дальнейшем нужно продолжить разработку в данном направлении, так как использование нетрадиционных источников энергии открывает большие перспективы в развитии малой энергетики в удаленных и экологически чистых районах Туркменистана.

Л и т е р а т у р а

1. Государственная программа по энергосбережению на 2018–2024 годы. – Ашхабат, 2018.
2. Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 года. – Ашхабат, 2020.
3. Джумаев, А. Основы энергосбережения / А. Джумаев, Х. Солтанов. – Ашхабат : Наука, 2018.
4. Джумаев, А. Научно-технический и методологический анализ ресурсов и развития солнечной энергии в Туркменистане : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / А. Джумаев. – Ашхабат, 2016.
5. Режим доступа: https://nsk-electro.ru/solar_battery/monocrystalline/sim350-24-perc-5bb.
6. Режим доступа: <https://clever-energy.ru/shop/система-трехфазных-инверторов-sila-pro-20квт/>.
7. Режим доступа: <https://realsolar.ru/kontrollery-zaryada/kontrollery-delta/delta-pwm/pwm-2420/>.
8. 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>.
9. Коровин, Н. В. Химические источники тока : справочник / Н. В. Коровин, А. М. Скундин. – М. : МЭИ, 2003.
10. Охоткин, Г. П. Методика расчета мощности солнечных электростанций / Г. П. Охоткин // Вестн. Чувашского ун-та. – 2013. – № 3.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК В МЕСТНЫХ УСЛОВИЯХ

Д. Нурмухаммедов, В. Данатаров, Р. Нурыев

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Метод предполагает поочередное целенаправленное рассмотрение отказов элементов электроустановки с влиянием их последствий в нормальном и ремонтном состояниях. Расчет ведется в табличной форме, причем по вертикали фиксируется ряд учитываемых элементов (i -й ряд), а по горизонтали – ряд расчетных режимов (j -й ряд) [1]–[2].

Элементами электроустановки являются присоединения (генераторы, трансформаторы, линии), выключатели и сборные шины.

В ряд учитываемых элементов электроустановки (i -й ряд) включаются те элементы, отключение которых приводит к снижению генерируемой мощности или ограничению выдачи электроэнергии в систему или местным потребителям. Исходными данными для расчета являются частота отказов ω_i , среднее время восстановления $T_{в.}$, частота μ и длительность плановых ремонтов T_p элементов электроустановки.

Для режимного ряда (j -й) определяются значения относительной длительности режимов q_j . Относительная длительность нормального режима:

$$q_0 = 1 - \sum_{j=1}^n q_j.$$

Проектирование схемы электрических соединений ведут в два этапа: сначала разрабатывают структурную схему, а затем выбирают электрические схемы распределительных устройств (РУ) разных напряжений.

При проектировании структурной схемы варьируемыми элементами обычно являются только трансформаторы (автотрансформаторы) блоков и связей между РУ. Поэтому рассматривают отказы этих элементов и их расчетные последствия. На этом этапе принимают, что схемы РУ во всех вариантах одинаковы. Поскольку число элементов структурной схемы относительно невелико, то таблицу расчетных связей здесь можно не составлять [1]–[4].

Среднегодовой недоотпуск электроэнергии в систему из-за отказов трансформатора моноблока (без генераторного выключателя) определяют по выражению

$$\Delta W_{\Gamma} = P_{\text{ном}} \frac{T_{\text{уст}}}{8760} \omega_{\Gamma} (1 - q_{\text{р.б}}) T_{\text{в.т}},$$

где $T_{\text{уст}}$ – число часов использования установленной мощности генератора; ω_{Γ} , $T_{\text{в.т}}$ – частота отказов и среднее время восстановления трансформатора; $q_{\text{р.б}}$ – вероятность ремонтного состояния блока, определяемая выражением

$$q = \frac{\omega T_{\text{в.}} + \mu T_{\text{р.}}}{8760}.$$

Если в блоке установлен генераторный выключатель, то среднегодовой недоотпуск электроэнергии определяют как

$$\Delta W_{\Gamma} = P_{\text{ном}} \frac{T_{\text{уст}}}{8760} (\omega_{\Gamma} T_{\text{в.т}} + \omega_{\text{в.}} T_{\text{в.в}}) (1 - q_{\text{р.б}}) T_{\text{в.т}}.$$

Если в блоке с генератором включен автотрансформатор (АТБ), то при этом всегда предусматривается генераторный выключатель. Отказ АТБ или генераторного выключателя (ВГ) может приводить не только к потере мощности энергоблока, но и аварийному снижению мощности других энергоблоков ΔP_{Γ} , переток которой осуществляется через АТБ. Дополнительный недоотпуск электроэнергии в систему:

$$\Delta W_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пер}} \frac{T_{\text{уст}}}{8760} (\omega_{\Gamma} T_{\text{в.т}} + \omega_{\text{в.}} T_{\text{в.в}}) (1 - q_{\text{р.б}}).$$

Ущерб от недоотпуска электроэнергии для электростанций определяется по выражению

$$Y = Y_c + Y_f + Y_{пт},$$

где Y_c – ущерб системе, связанный с внеплановым восстановительным ремонтом, включение менее экономичных резервных агрегатов и увеличение потерь в сети; Y_f – ущерб от снижения частоты; $Y_{пт}$ – ущерб от внеземных нарушений электроснабжения для потребителя.

Аварии со снижением частоты особо тяжелые и редкие. За счет устройств АЧР частота обычно быстро восстанавливается. Поэтому ущербом Y_f в последующих расчетах можно пренебречь вследствие того, что он значительно меньше значений $Y_{о.с}$ и $Y_{о.пт}$ [1].

При технико-экономическом сравнении вариантов структурных схем электростанций и подстанций в целевую функцию (приведение затрат) следует включать возможный ущерб от ненадежности электроустановки. При этом важно избежать ошибок от применения несопоставимых цен на оборудование.

Если в расчетах используются цены на основе новейшей рекламной и справочной литературы, то значения удельных ущербов должны быть соответственно пересчитаны. Избежать грубых ошибок в расчетах можно, пересчитав значения $Y_{о.с}$, $Y_{о.пт}$ в текущем долларовом эквиваленте.

Ущерб от ненадежности электростанции при этом определяется:

$$Y = Y_{о.с} \cdot \Delta W_c + Y_{о.пт} \cdot \Delta W_{пт},$$

где ΔW_c – недоотпуск электроэнергии в энергосистему; $\Delta W_{пт}$ – недоотпуск электроэнергии местным потребителям.

Произведем наглядный пример в качестве вывода.

Пример. Определить возможный годовой недоотпуск электроэнергии для структурной схемы КЭС 3×500 мВт, представленной на рис. 1.

Исходные данные. Энергоблоки $P_{пт} = 500$ МВт; $T_{уст} = 7000$ ч/год. Местный промышленный район на напряжении 220 кВ: $P_{\max} = 300$ кВт; $\cos\varphi = 0,85$. Показатели надежности элементов приведены в таблице.

Показатели надежности элементов

Элементы	ω , 1/год	T_v , ч/1	μ , 1/год	T_p , ч/1
Энергоблоки 500 мВт	11	120	1	600
Трансформаторы и АТ с $U_{в.н} = 500$ кВ	0,04	200	1	70
Генераторные выключатели $U_n = 20$ кВ	0,04	20	0,33	60

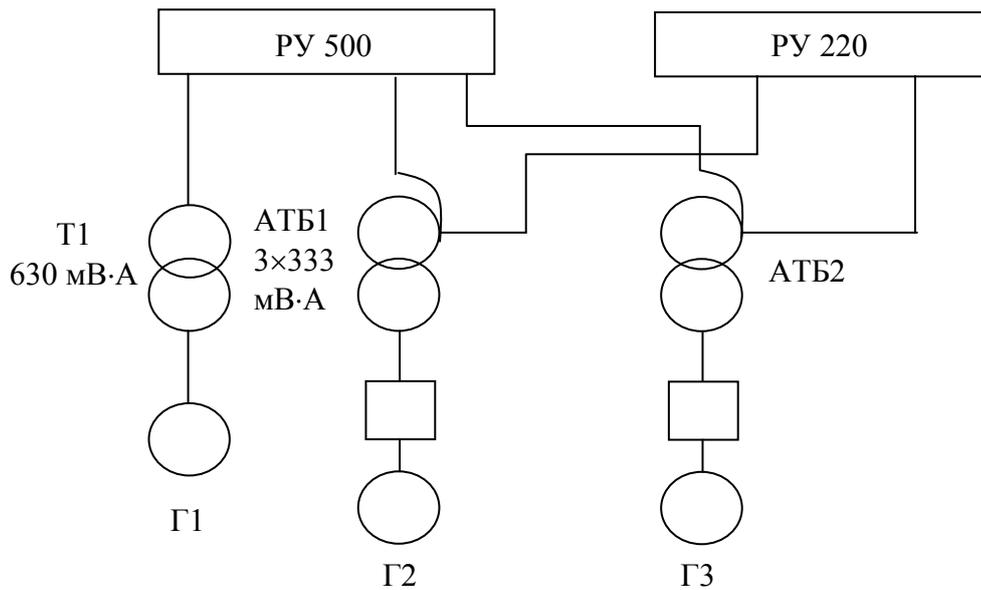


Рис. 1. Вариант структурной схемы КЭС с тремя энергоблоками

Решение:

1. Определяем вероятность ремонтных режимов элементов:
- энергоблока

$$q_{p,б} = \frac{11 \cdot 120 + 1 \cdot 600}{8760} = 0,219;$$

- группа трех однофазных автотрансформаторов блока АТБ

$$q_{p,б} = 3 \cdot \frac{0,04 \cdot 200 + 70}{8760} = 3 \cdot 0,0089 = 0,0267.$$

2. Вычисляем по (1) среднегодовой недоотпуск электроэнергии в систему из-за отказов трансформаторов блока:

$$\Delta W_{\Gamma} = 500 \cdot 10^3 \frac{7000}{8760} 0,04(1 - 0,219)200 = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}.$$

3. Определяем по (3) среднегодовой недоотпуск электроэнергии генератора в систему из-за отказов в группе из однофазных АТБ и генераторного выключателя:

$$\Delta W_{\Gamma} = 500 \cdot 10^3 \frac{7000}{8760} (3 \cdot 0,04 \cdot 200 + 0,04 \cdot 20)(1 - 0,219) = 7,74 \cdot 10^6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}.$$

4. Оценим последствия потери транзитной мощности из-за аварийных отключений АТБ.

Оставшийся в работе АТБ сможет передать всю транзитную мощность, так как

$$1,4S_{\text{ном}} = 1400 > \frac{300}{0,85} = 353 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Наиболее тяжелая, аварийная ситуация, когда отказ АТБ (или ВГ) происходит во время ремонта другого АТБ.

Средняя длительность аварии такого рода:

$$\begin{aligned} \sum \omega_i q_j T_{ij} &= 2(\omega_{\text{атб}} q_{\text{рат}} \cdot 0,5T_{\text{рат}} + \omega_{\text{в}} q_{\text{рат}} T_{\text{о.п}}) = \\ &= 2(0,04 \cdot 0,0267 \cdot 0,5 \cdot 70 + 0,04 \cdot 0,0267 \cdot 1,0) = 0,0769 \frac{\text{ч}}{\text{год}}. \end{aligned}$$

Расчетное время оперативных переключений $T_{\text{о.п}}$ принято – 1 ч.

При нарушении связи между РУ 500 и 200 кВ недоотпуск мощности в сеть 220 кВ составит 300 МВт.

Среднегодовой недоотпуск из-за потери транзита мощности:

$$\Delta W_{\text{г}} = 300 \frac{7000}{8760} 0,0769 = 18,43 \cdot 10^3 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}.$$

5. Суммарный среднегодовой недоотпуск электроэнергии в систему составляет:

$$\Delta W_{\Sigma} = 2,5 \cdot 10^6 + 2 \cdot 7,74 \cdot 10^6 + 0,018 \cdot 10^6 = 18,0 \cdot 10^6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}.$$

Главная схема электрических соединений в ремонтных режимах, как правило, имеет не очень хорошую надежность. Последствия отказов элементов схемы в ремонтных режимах приводит к отключению большего количества присоединений и соответственно большему снижению генерируемой мощности или недостатку электроэнергии потребителям.

Литература

1. Околович, М. Н. Проектирование электрических станций / М. Н. Околович. – М. : Энергоиздат., 1982. – 400 с.
2. Гук, Ю. Б. Проектирование электрической части станций и подстанций / Ю. Б. Гук, В. В. Кантан, С. С. Петрова. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.
3. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций : учеб. для вузов / Б. Н. Неклепаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
4. Электрическая часть электростанций и подстанций : учеб. для вузов / А. А. Васильев [и др.] ; под ред. А. А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

РОЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

И. В. Петров

*Жлобинское межрайонное отделение филиала Госэнергонадзора
по Гомельской области*

Научный руководитель Н. В. Грунтовиц

Техническое диагностирование электрических двигателей традиционно рассматривается как компонент эксплуатационной надежности функционирования энергооборудования. Техническое диагностирование состояния оборудования, как до ремонта, так и после него, позволяет увеличить срок его службы, значительно со-

кращает стоимость ремонтных работ и их продолжительность. В ряде случаев при удовлетворительном техническом состоянии оборудования возможен отказ от проведения ремонта. Опыт проведения диагностирования для оценки технического состояния электрических двигателей на различных предприятиях Республики Беларусь показывает динамику увеличения надежности их эксплуатации. Так, например, на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» создан и успешно работает отдел вибродиагностики, который тесно сотрудничает с механическим отделом предприятия. При обнаружении дефекта направляется заявка механикам цеха, оборудование с дефектом выводится в ремонт.

Назначением диагностирования является выявление неисправностей и предупреждение отказов, поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования доремонтного и межремонтного ресурса [1], [2]. Кроме того, в последние годы некоторые предприятия стали проводить так называемый входной контроль, т. е. диагностирование систем или отдельных узлов перед вводом оборудования в эксплуатацию. Область применения и формы оценки комплексного технического диагностирования представлена на рис. 1.

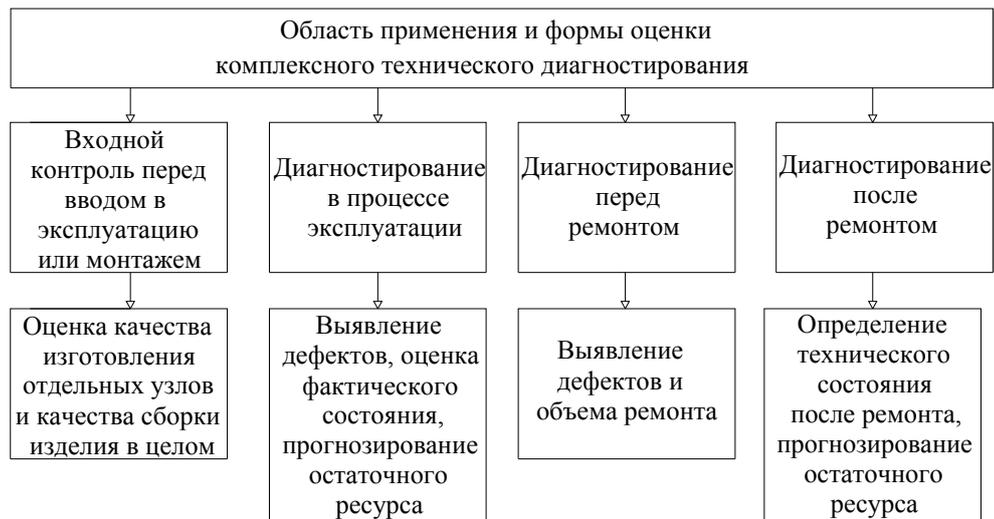


Рис. 1. Область применения и формы оценки комплексного технического диагностирования

В настоящее время существует значительное количество методов неразрушающего контроля, позволяющих проводить тестирование оборудования и выявлять дефекты без нарушения целостности оборудования. Однако далеко не все эти методы являются универсальными. Поэтому в вопросе качественного проведения технического диагностирования важен комплексный подход.

Качество работы любой технической системы имеет тенденцию со временем наработки к ухудшению из-за изменения свойств материалов изделий под влиянием внутренних и внешних факторов.

Применение совместно нескольких современных методов и способов диагностирования при оценке технического состояния объекта повышает вероятность выявления дефекта на ранней стадии его развития, позволяет управлять старением оборудования и состоит в том, чтобы свести к минимуму число внезапных отказов.

Кроме того, нормативная документация по системе технического обслуживания и ремонта электрических двигателей устарела и требует доработки.

Так, в соответствии с п. 9 [3] у всех электродвигателей ответственных механизмов после восстановительного или капитального ремонта и реконструкции, между ремонтами вибрация измеряется в микронах. При данном подходе к измерению вибрация механизма определяется в частотном диапазоне до 200 Гц, что является диагностированием по общему уровню и не позволяет выявить в подшипниках двигателей возможные дефекты и осуществить прогнозирование срока службы подшипникового узла.

В соответствии с п. 5.6.22 [4] допускается работа агрегатов с повышенной вибрацией подшипников электродвигателей, сочлененных с механизмами, работающими в тяжелых условиях, у которых вращающиеся рабочие части быстро изнашиваются, а также электродвигателей, сроки эксплуатации которых превышают 15 лет, в течении времени, необходимого для устранения причины повышения вибрации. Данное утверждение является сомнительным, так как повышенная вибрация подшипникового узла может привести к ее выходу из строя и, как следствие – к выходу из строя всего агрегата, остановки технологической линии. Подобный подход может привести к простоям, браку продукции.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ показал, что в Республике Беларусь применяемая нормативная техническая база по эксплуатации электрооборудования устарела и составлена без учета современных методов и способов технического диагностирования.

2. Необходимо ввести в практику входной контроль, т. е. диагностирование систем или отдельных узлов перед вводом оборудования в эксплуатацию, диагностический мониторинг основного энергетического оборудования в процессе эксплуатации, а планирование и проведение капитальных ремонтов выполнять только по результатам комплексного технического диагностирования, что позволит повысить надежность эксплуатации, сэкономить значительные финансовые средства и увеличить межремонтный интервал.

Литература

1. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФА–М, 2013. – 271 с.
2. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Библиогр., 1996. – 276 с.
3. СТП 09110.20.366–08. Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы / Стандарт ГПО «БЕЛЭНЕРГО». – Минск, 2008.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. ТКП 181–2009 (02230). – Минск : Минэнерго.

РАБОТА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СХемой СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА – ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ» ПРИ ОДНОФАЗНОЙ НАГРУЗКЕ

А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга

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

Научный руководитель М. А. Прищепов

Несимметрию напряжений обуславливает несимметрия электрических нагрузок. При этом трехфазные электроприемники питаются несимметричным напряжением, а однофазные – оказываются под повышенным или пониженным напряжением. Отклонение напряжения у электроприемников может превысить допустимое значение.

При несимметричном режиме существенно ухудшаются условия работы как самих электроприемников, так и иных элементов сети, снижается надежность работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом. Несимметрия токов и напряжений вызывает дополнительные потери мощности, снижает срок службы электрооборудования, уменьшает экономические показатели его работы.

Уменьшить несимметрию напряжений можно применением специальных корректирующих устройств. При выборе способов и средств повышения качества электроэнергии авторы считают целесообразным применение относительно недорогих, простых и надежных по конструктивному исполнению устройств, которые не требуют особых условий эксплуатации и не предъявляют высоких требований к квалификации обслуживающего персонала. Одним из средств повышения качества напряжения являются трансформаторы со специальными схемами соединения обмоток. В системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей авторы рассматривают возможность использования для этого трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» [1], [2].

Проведенные авторами теоретические исследования работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке, в том числе принцип компенсации симметричных составляющих нулевой последовательности [3], [4], подтвердили, что снижение несимметрии напряжений происходит вследствие компенсации составляющих нулевой последовательности, а их остаточные значения обусловлены падениями напряжений от токов нулевой последовательности на активных сопротивлениях фаз вторичной обмотки. Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода. При этом магнитная система трансформатора уравновешена.

Также авторами были проведены экспериментальные исследования, подтверждающие способность трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивать наиболее высокий уровень симметрии напряжений на его выводах по сравнению с другими схемами при несимметричном характере нагрузки [5].

Рассматривался режим, когда ток в одной из фаз изменялся в пределах от 0 до $1,2I_n$, а в двух других фазах был равен нулю.

Измерялись линейные и фазные напряжения трансформаторов высшей и низшей сторон, токи низшей стороны, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности при помощи анализатора качества напряже-

ния Fluke 425. Коэффициенты несимметрии первичных напряжений по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» практически равны нулю. Зависимости коэффициентов несимметрии напряжений вторичной стороны от токов нагрузки приведены на рис. 1 и 2, из которых видно, что рост несимметрии нагрузки вызывает увеличение коэффициентов несимметрии напряжений.

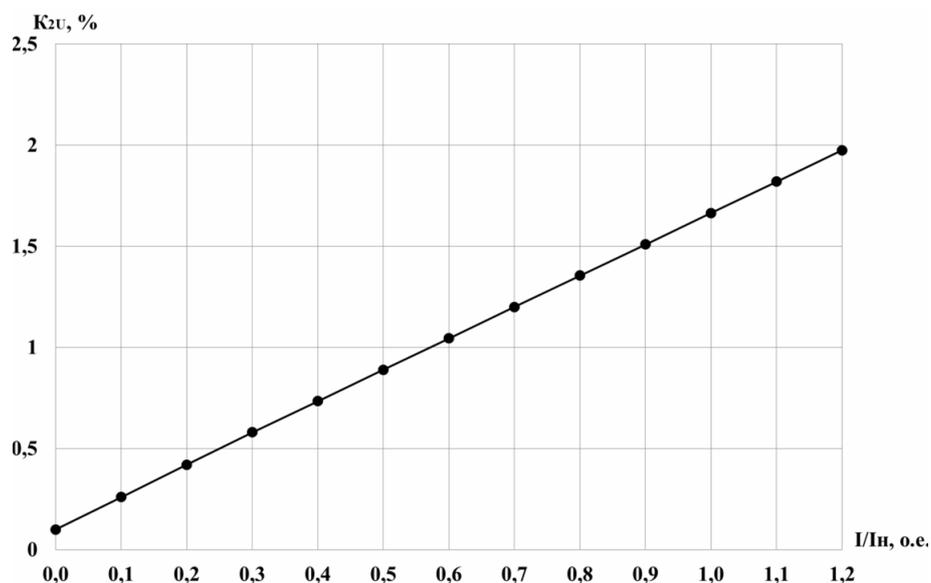


Рис. 1. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима $I_a = 0-1,2 I_n$, $I_b = 0$, $I_c = 0$

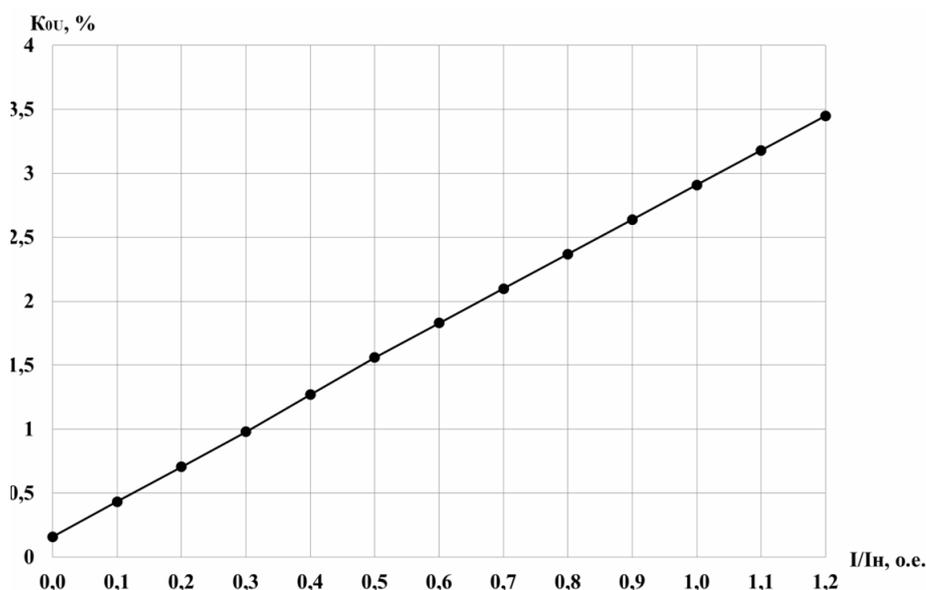


Рис. 2. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима $I_a = 0-1,2 I_n$, $I_b = 0$, $I_c = 0$

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы, что схема соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивает высокий уровень симметрии вторичных напряжений даже при глубокой несимметрии нагрузки. При номинальном значении однофазной нагрузки коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности не превышает 1,67 %, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности не превышает 2,91 %.

Данная схема соединения обмоток может успешно применяться в электроустановках сельскохозяйственных потребителей при несимметрии нагрузки для повышения качества напряжения.

Л и т е р а т у р а

1. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток : пат. № 16008 Респ. Беларусь / Збродыга В. М., Зеленкевич А. И. ; заявитель Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20100121 ; заявл. 2010.02.01 ; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180–181.
2. Прищепов, М. А. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» / М. А. Прищепов, В. М. Збродыга, А. И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16–25.
3. Прищепов, М. А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М. А. Прищепов, В. М. Збродыга, А. И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25–31.
4. Зеленкевич, А. И. Симметрирование напряжения при использовании трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» / А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга, М. А. Прищепов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Саратов, 2020 г. / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2020. – С. 14–18.
5. Прищепов, М. А. Экспериментальные исследования работы трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда – двойной зигзаг с нулевым проводом» и «звезда – звезда с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М. А. Прищепов, А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 окт. 2019 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. аграрный техн. ун-т ; редкол. И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2019. – Ч. 1. – С. 390–392.

УЧЕТ ТЕПЛООВОГО ИМПУЛЬСА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

В. М. Лугачев

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

Научный руководитель С. Г. Гапанюк

Короткое замыкание (КЗ) является одним из наиболее опасных режимов работы электрооборудования, так как токи могут достигать величин в разы, превышающие номинальные. Характер кривой тока, его величина и продолжительность в момент короткого замыкания являются сложной функцией времени, зависящей от места КЗ и параметров элементов, входящих в схему замещения. В свою очередь, время действия определяется качественным и количественным составом релейной защиты и автоматики. При выборе оборудования необходимо учесть термическое действие токов короткого замыкания на проводники, его длительность составляет всего несколько секунд, однако за такое время не успевает произойти теплообмен с окружающей средой, а значит, вся энергия, выделенная при прохождении сверхвысоких токов, расходуется на нагрев проводника. Для практических расчетов важно понять, до какой температуры успеет нагреться проводник при протекании по нему тока ко-

роткого замыкания, за время срабатывания защиты. Сравнив конечную температуру с допустимой, можно судить возможности применения токоведущих частей и (или) оборудования в рассматриваемой точке схемы. Для подробного изучения вопроса рассмотрим действие тока на токоведущие шины. Для остальных аппаратов рассуждения аналогичны, с поправкой на конструктивное исполнение.

Процесс нагрева проводника можно описать следующим уравнением [1]:

$$I_k^2 r_\vartheta dt = G c_\vartheta d\vartheta, \quad (1)$$

где I_k – действующее значение тока короткого замыкания; r_ϑ – активное сопротивление проводника при данной температуре; G – масса проводника; c_ϑ – удельная теплоемкость проводника при данной температуре.

Как видно, уравнение (1) существенно отяжелено тем, что сопротивление и теплоемкость меняются в зависимости от температуры, подставив эти зависимости получим уравнение:

$$\frac{1}{q^2} \int_0^{t_{\text{откл}}} I_k^2 \cdot dt = \int_{\vartheta_n}^{\vartheta_k} \gamma \frac{c_0(1 + \beta\vartheta)}{\rho_0(1 + \alpha\vartheta)} d\vartheta, \quad (2)$$

где q – площадь сечения проводника; γ – плотность материала проводника; c_0 – теплоемкость материалов проводника при температуре 0 °С; β – температурный коэффициент теплоемкости; ρ_0 – удельное активное сопротивление проводника при температуре 0 °С; α – температурный коэффициент сопротивления.

Обозначим $B_k = \int_0^{t_{\text{откл}}} I_k^2 dt$ – тепловой импульс короткого замыкания, в ГОСТах встречается под названием «интеграл Джоуля». Размерность интеграла Джоуля – $A^2 \cdot c$. Физический смысл состоит в том, что он выражает энергию в джоулях, которая выделится в цепи сопротивлением 1 Ом за время 1 с. Можно сказать, что интеграл Джоуля – температурная характеристика тока короткого замыкания, она показывает степень термического воздействия тока КЗ на проводник. Правую часть уравнения (2) обозначим как f/k , где k – коэффициент, учитывающий удельное сопротивление и эффективную теплоемкость проводника, который зависит от вида материала, из которого он изготовлен; f – сложная функция температуры проводника. После вставки всех обозначений получаем:

$$f_k = f_n + k \frac{B_k}{q^2}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет найти величину f_k , зная которую, по графику на рис. 1 определяется конечная температура проводника ϑ_k .

Интеграл Джоуля, согласно [2], можно определять как сумму интегралов от периодической $B_{к.п}$ и аperiodической $B_{к.а}$ составляющей тока КЗ:

$$B_k = B_{к.п} + B_{к.а}. \quad (4)$$

Методика расчета интеграла Джоуля зависит расчетной схемы установки, положения точки КЗ, ее удаленности от мощных генераторов, асинхронных двигателей и т. п.

В зависимости от этого выделяют четыре варианта расчетов:

1. Схема сети имеет произвольный вид, но для всех генераторов и синхронных компенсаторов она является удаленной. Удаленность определяется отношением действующего значения периодической составляющей тока КЗ в начальный момент к номинальному току генератора, двигателя и т. д. Установка считается удаленной, если отношение меньше двух.

2. Схема состоит из нескольких генераторов, компенсаторов или тому подобного, одинаково удаленных от точки КЗ, но для них оно является близким.

3. Схема точкой КЗ делится на две независимые части, одна содержит источники энергии, а другая – генераторы, компенсаторы и т. п. Причем для устройств одной части КЗ удаленное, а для второй – близкое.

4. Аналогично п. 1 в, только первая часть содержит удаленные источники, а вторая – близкие электродвигатели.

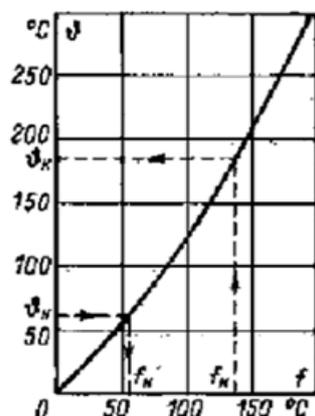


Рис. 1. Кривые для определения температуры нагрева проводников при коротком замыкании

Подробные формулы для расчета каждого из вариантов представлены в [2]. Следует отметить, что кроме действующего значения периодической составляющей тока КЗ, на B_k существенное влияние оказывает эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, которая зависит от соотношения активного и реактивного сопротивления линии. Причем, если время отключения больше трехкратной эквивалентной постоянной времени, то расчет становится менее громоздким.

Саму расчетную точку КЗ для проверки на термическую стойкость выбирают так, чтобы ток КЗ, протекающий через расчетный проводник, был максимален. За расчетный вид КЗ берут трехфазное КЗ, для проверки проводников в цепях генераторов расчетным током короткого замыкания может быть двухфазное КЗ, если оно обуславливает больший нагрев проводников при сравнении с трехфазным КЗ.

Степень воздействия тока КЗ на проводник, согласно (3), кроме прочего зависит и от рода проводника (коэффициент k) и от площади его сечения q , изменяя эти параметры, и выбирают сечения проводников оборудования.

Сам ток КЗ, его характер определяются очень сложным сочетанием факторов, регулировка которых довольно сложна и не всегда возможна. Самый простой способ – установка более быстродействующей и совершенной защиты, однако ее возможности также существенно ограничены.

Если рассмотреть формулу (3), то при расчете конечной температуры провод-

ника при КЗ начальным условием является температура проводника в условиях номинального установившегося режима, за это отвечает f_n . Начальная температура в установившемся режиме должна быть равна длительно допустимой температуре и составлять 70 °С. Конечная температура в момент отключения КЗ не должна превышать предельно допустимую, которая варьируется от рода материала, для алюминия это 200 °С [1]. Таким образом, при КЗ температура проводника может безопасно вырасти на 130 °С. За величину роста температуры, исходя из уравнения (3), отвечает слагаемое $k \frac{B_k}{q^2}$. Таким образом, если величина интеграла Джоуля обеспечивает прирост температуры на величину, близкую или большую, чем 130 °С, необходимо проводить проверку токоведущих частей на тепловую стойкость при КЗ. Однако, как показывает практика расчетов, реальные тепловые импульсы редко достигают подобных значений.

На основании практических расчетов можно сделать вывод, что для жестких алюминиевых при $\frac{B_k}{q^2} < (7,5 - 8)10^{-3}$ допускается проверка на термическую стойкость не проводить. При помощи аналогичных рассуждений можно получить величину отношения $\frac{B_k}{q^2}$ для других материалов, а задавшись величиной минимальной площади, можно получить отдельно величину самого интеграла Джоуля и ориентировочную величину тока КЗ, которая позволит принять решение о необходимости проведения детальных расчетов по [2] для проверки токоведущих частей по термической стойкости при коротком замыкании.

Литература

1. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций : учеб. для техникумов / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – 2-е изд, перераб. – М. : Энергия, 1980.
2. ГОСТ Р 52736–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – М. : Стандартинформ, 2007.

СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕЖВИТКОВОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

И. Л. Громыко

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

Научный руководитель В. Н. Галушко

Одним из наиболее распространенных следствий ухудшения свойств изоляции являются межвитковые замыкания. При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

В качестве объекта исследования использовались однофазные трансформаторы малой мощности с воздушным охлаждением. В ходе экспериментов при изменяющейся нагрузке трансформатора выполнялось межвитковое замыкание различного числа витков на одной фазе первичной и вторичной обмоток. Схема экспериментальной установки по исследованию межфазного короткого замыкания (МКЗ) трансформатора представлена на рис. 1.

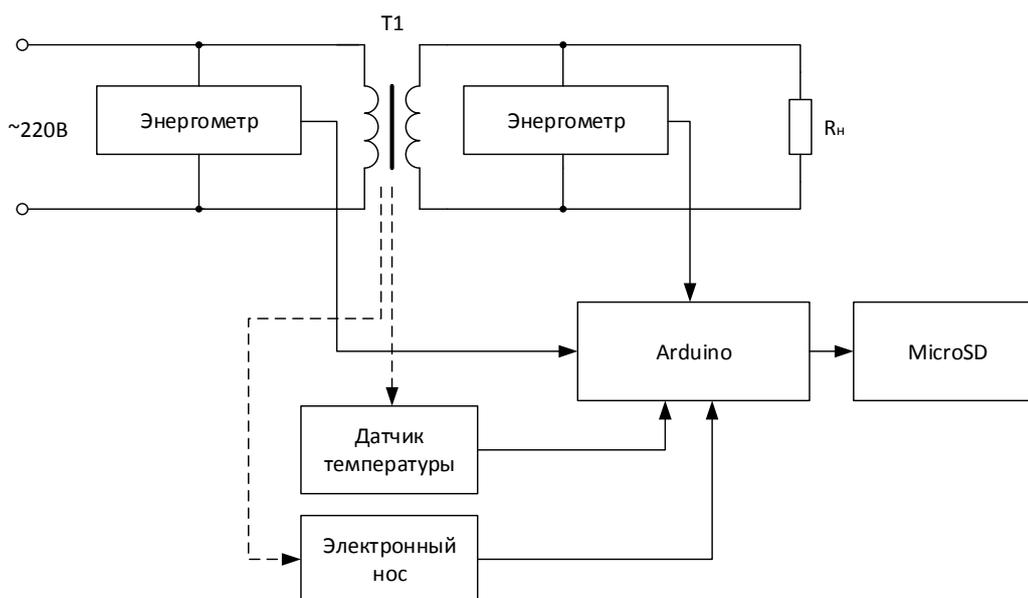


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию МКЗ трансформатора

Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои, можно снизить количество unplanned ремонтов и отказов указанного оборудования.

При проведении экспериментальных исследований были предусмотрены следующие мероприятия:

- МКЗ проводились в режиме реального времени на первичной и вторичной обмотках однофазного трансформатора с воздушным охлаждением;
- МКЗ выполнялось на двух-, пяти- и десяти витках;
- осуществлялась регистрация с помощью приборов и датчиков.

В то же время проводился анализ информации с использованием следующих данных:

- напряжения и токи первичной и вторичной обмоток;
- активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой стороне трансформатора;
- анализировался состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции с помощью устройства «электронный нос»;
- измерялась температура в зоне КЗ и на удалении 5 см от обмоток;
- проводилось осциллографирование и разложение по гармоникам кривых тока и напряжения;
- выполнено более 500 измерений при нормальном режиме работы и при межвитковом замыкании с интервалом в 1 с при 7 различных активных и активно-индуктивных нагрузках;
- получаемые результаты приборного учета через аналогово-цифровой преобразователь поступали на вход в программу MATLAB в качестве исходных данных для нейромодели с целью ее обучения и анализа информации и создания математической модели;
- с помощью RLC-метра определялись параметры обмоток трансформатора.

Разработка математического инструментария диагностирования состояния трансформаторов позволит решить следующие задачи:

– анализ процессов для настройки оборудования и аппаратов защиты от исследуемых неисправностей;

– обучение сверточных нейронных сетей.

Данные датчиков используются в качестве исходных данных для сверточных нейронных сетей. Самый популярный вариант их использования – это обработка и анализ изображений. В нашем случае они позволяют на основе информации, представленной в виде множества изменяющихся в реальном времени графиков, анализировать данные. Такой вид использования данных позволяет установить множественные взаимосвязи между отдельными факторами и, применяя нормированные данные, использовать их для быстрой настройки к другим силовым трансформаторам.

На рис. 2 и 3 приведен результат обучения и применения сверточных нейронных сетей, причем вероятность распознавания составила 99,9 %.

```
Training on single CPU.
Initializing input data normalization.
```

Epoch	Iteration	Time Elapsed (hh:mm:ss)	Mini-batch Accuracy	Mini-batch Loss	Base Learning Rate
1	1	00:00:00	38.28%	1.0837	0.0100
9	50	00:00:19	100.00%	0.0054	0.0100
17	100	00:00:38	100.00%	0.0027	0.0100
25	150	00:00:58	100.00%	0.0009	0.0100
30	180	00:01:09	100.00%	0.0008	0.0100

Рис. 2. Таблица результатов обучения и применения сверточных нейронных сетей

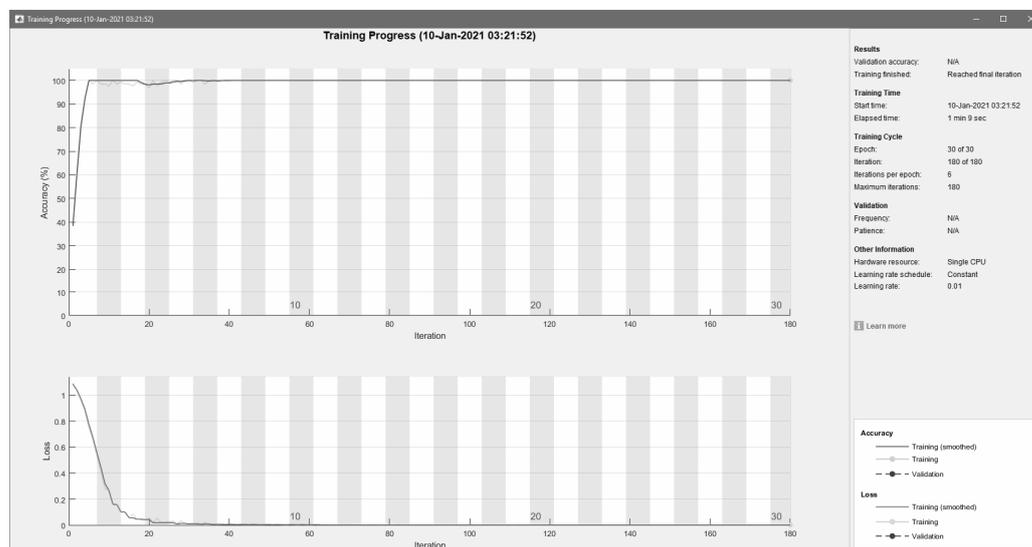


Рис. 3. Результаты обучения и применения сверточных нейронных сетей

Научная новизна материала статьи заключается в практическом применении сверточных нейронных сетей, которые в режиме реального времени анализируют информацию, классифицируют различные отклонения и диагностируют определенный вид дефекта. Практическая значимость заключается в снижении неплановых отказов, заблаговременном предупреждении о развитии повреждения. В работе приво-

дится анализ информации для классификации таких повреждений, как межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания, дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали.

Применение нейромоделирования в диагностике систем обеспечения энергообеспечения позволит контролировать состояние трансформаторов в режиме реального времени, не выводя трансформатор из работы, что предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня безаварийности и соблюдения режимов бесперебойного электроснабжения сопровождающимся, как правило, значительными экономическими и экологическими издержками или реальным ущербом для потребителей. При этом затраты на внедрение данной технологии нейромоделирования относительно невелики (например, применение одноплатных компьютеров), а эффективность от применения будет существенной.

Л и т е р а т у р а

1. Шерязов, С. К. Классификация факторов, влияющих на витковые замыкания в трансформаторах напряжением 6–10/0,4 кВ / С. К. Шерязов, А. В. Пятков // Вестн. КрасГАУ. – 2014. – № 7.
2. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 56 с.

ДИАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРНОГО УЧЕТА ДАННЫХ И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

И. Л. Громыко, В. О. Белькин

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

Научный руководитель В. Н. Галушко

Неотъемлемым элементом при централизованном электроснабжении является трансформатор. Выход из строя силового трансформатора может привести к созданию аварийных ситуаций, перебоям электроснабжения, массовому недоотпуску продукции. Поэтому контроль состояния трансформатора является важной задачей.

В связи с этим данная статья посвящена диагностике различных дефектов трансформатора и способам их классификации с помощью нейронных сетей.

Основные неисправности силовых трансформаторов:

1. Межвитковые замыкания. Основными причинами возникновения межвитковых замыканий в трансформаторе являются старение изоляции, перенапряжения или низкая организация производства и эксплуатации.

2. Местное замыкание пластин стали (пожар в стали). Это явление заключается в чрезмерном нагреве вихревыми токами какой-либо части магнитопровода вследствие нарушения изоляции между листами стали или между магнитопроводом и стягивающими его шпильками.

3. Наличие примесей в трансформаторном масле. В масле содержится около 70 % информации о состоянии маслonaполненного оборудования. Это нерастворенные вещества, содержащиеся в масле в виде осадка или во взвешенном состоянии, например, волокна, пыль, продукты растворения. Другие примеси появляются в масле после внутренних повреждений трансформатора, например, электрической дуги, мест перегревов, в виде обуглившихся частиц.

В связи с этим разработан комплексный подход анализа данных с помощью приборного учета в режиме реального времени. В качестве основных параметров выступают температура, вибрация и задымленность.

В результате эксперимента были получены результаты, представленные на рис. 1–3.

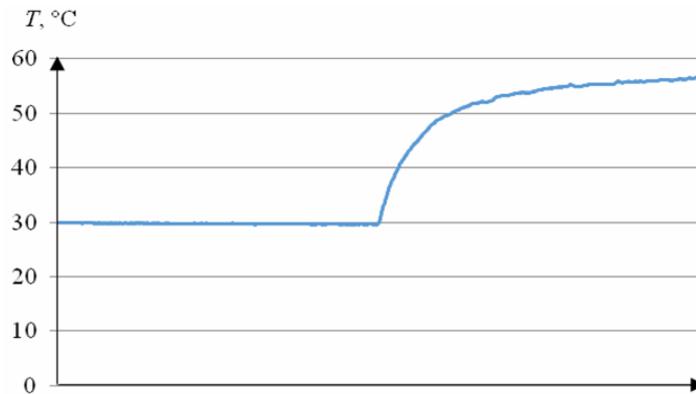


Рис. 1. График зависимости температуры при МКЗ

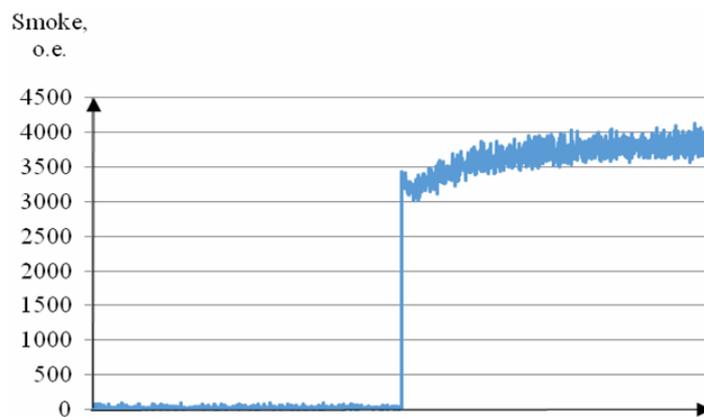


Рис. 2. График зависимости концентрации дыма при МКЗ



Рис. 3. График зависимости активной мощности при МКЗ

В ходе эксперимента результаты опыта показали, что при местном замыкании пластин стали отклонений от нормального режима работы трансформатора, не наблюдалось.

Научная новизна материала статьи заключается в практическом применении сверточных нейронных сетей, которые в режиме реального времени анализируют информацию, не выводя трансформатор из работы, что предоставляет дополнительные возможности в обеспечении низкого уровня безаварийности и соблюдения режимов бесперебойного электроснабжения. При этом затраты на внедрение данной технологии нейромоделирования относительно невелики (например, применение одноплатных компьютеров), а эффективность от применения будет существенной.

Практическая значимость заключается в снижении неплановых отказов и заблаговременном предупреждении о развитии повреждения.

Необходимо также отметить, что практически все существующие измерения дефектов требуют отключения трансформаторов, что представляется более затратным и менее оперативным. Поэтому применение датчиков, соответствующих параметрам трансформатора для нейромодели, позволит анализировать данные без отключения и указывать на ранней стадии наличие повреждений. Это снизит количество неплановых отказов, позволит оперативно принять меры для устранения повреждения и укажет на конкретный вид дефекта.

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ «УРОВЕНЬ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ» ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ КАБЕЛЕЙ

Е. А. Жук

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

Согласно современным тенденциям развития определения состояния кабелей, все чаще начинают применять методики неразрушающего контроля, которые не оказывают влияния на состояние изоляции при выполнении испытаний.

Методика диагностики кабельных линий (КЛ) на территории Республики Беларусь описана в СТП 33243.20.366-16. Согласно этому документу (п. 32.17), периодичность испытаний назначается главным инженером в соответствии с состоянием кабеля. Также рекомендуется применять описанные методы диагностики в дополнение к периодическим испытаниям, проводимым на КЛ. Для получения более точной оценки состояния изоляции кабелей необходимо применять в комплексе методики, описанные в п. 32.17 «Диагностика КЛ 6–10 кВ». В нем описаны следующие методики: определение уровня частичных разрядов (ЧР); коэффициент абсорбции; коэффициент поляризации; тангенс угла диэлектрических потерь.

Согласно статистике, полученной в 2014 г., которая была составлена филиалом РУП «Могилевэнерго» Могилевскими электрическими сетями, можно наблюдать, что достаточно большой процент отключений приходится на кабели, которые не отработали свой нормативный срок службы. В 2014 г. произошло 44 % аварийных отключений кабелей, которые не отработали свой нормативный срок службы, а для замены нет никаких обоснований (рис. 1).

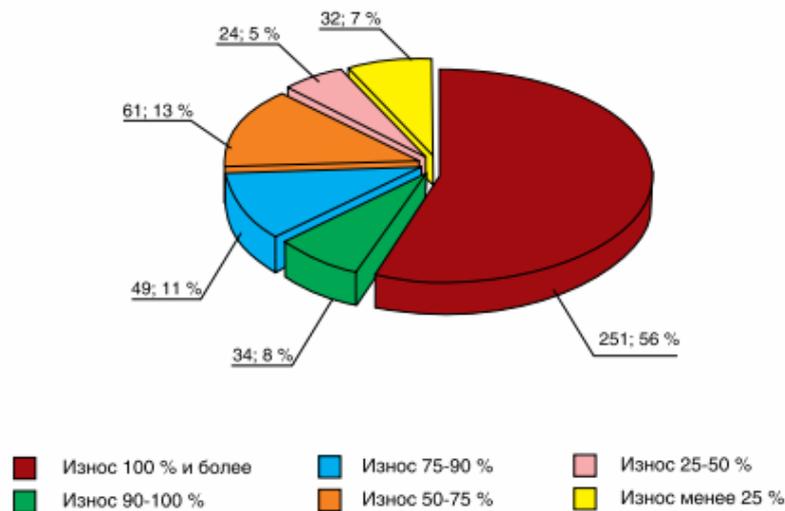


Рис. 1. Количество аварийных отключений КЛ 6–10 кВ в зависимости от износа

Одним из способов решения данной проблемы является диагностика кабелей с использованием современного оборудования с применением современных тенденций диагностирования.

С этой целью в Могилевских сетях был куплен немецкий прибор для диагностики состояния кабелей по уровню ЧР и определения их места – OWTS M28. В основе работы лежит метод, использующий затухающее осциллирующее напряжение. Данная методика определения уровней частичных разрядов является одной из самых передовых. Это обусловлено частотой, на которой производится определение уровней частичных разрядов.

Данная установка кроме определения места и уровня ЧР позволяет определить величину напряжения возникновения и гашения ЧР, а также тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции, электрическую емкость и ряд других величин. Согласно всем полученным данным, можно делать заключение о состоянии кабеля и возможности его дальнейшего использования.

В основном блоке OWTS M28 смонтированы источник выпрямленного напряжения (до 28 кВ), катушка индуктивности, системный блок компьютера, токовый ключ, устройство присоединения процессора обработки сигнала. Управляется система при помощи ноутбука. За пределы основного блока вынесен также блок безопасности с ключом подачи высокого напряжения.

Кабель заряжается заданным уровнем напряжения, после чего происходит замыкание токового ключа, и емкость кабеля разряжается на встроенную катушку индуктивности. В $L-C$ -контуре (емкость диагностируемого кабеля – катушка индуктивности) создается затухающее синусоидальное напряжение, частота которого зависит от емкости исследуемого кабеля и на практике составляет 200–600 Гц. При диагностике коротких кабелей подключается входящий в комплект системы конденсатор, тем самым снижается частота напряжения в контуре. Таким образом, при измерениях создаются условия, сопоставимые по частоте напряжения с условиями, в которых работает кабель (рис. 2).

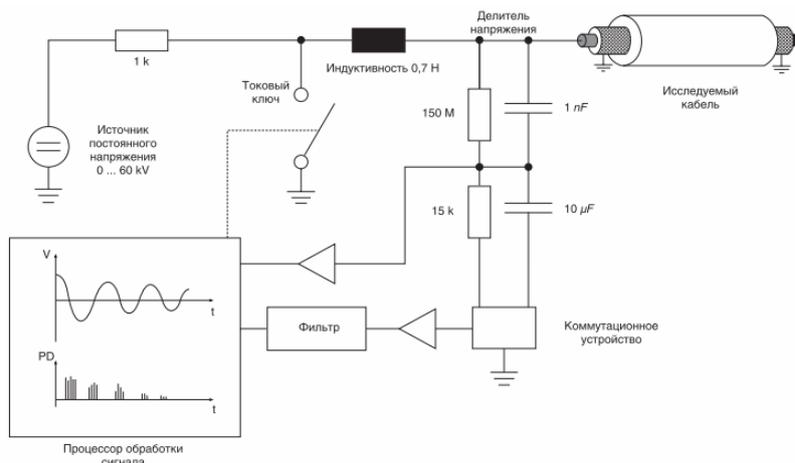
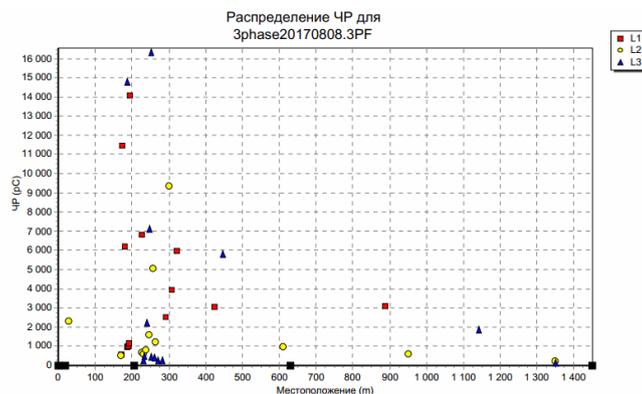
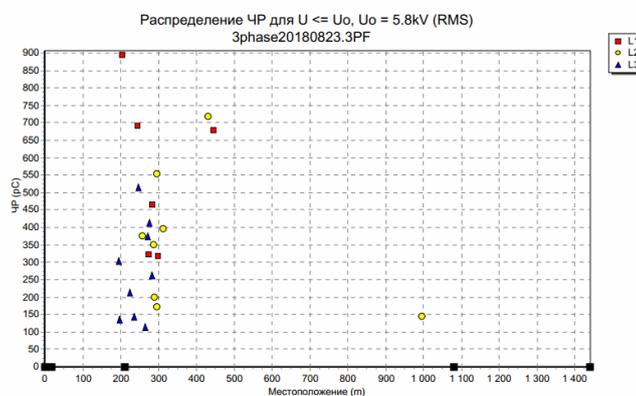


Рис. 2. Принципиальная схема системы OWTS M28

На рис. 3 показаны уровни частичных разрядов и их расположение на кабеле АСБ 3 x 120 длиной 1440 м, выполненные в 2017 и 2018 гг. Можно наблюдать, что уровень частичных разрядов в 2018 г. (максимальное значение – 900 пКл) значительно снизился по сравнению с уровнем в 2017 г. (максимальное значение – 16000 пКл) в диапазоне длин 200–300 м.



а)



б)

Рис. 3. Уровни частичных разрядов в кабеле АСБ 3 x 120: а – в 2017 г. б – в 2018 г.

В заключение можно отметить, что при проведении таких измерений возможно выделить проблемные участки и своевременно выполнить их замену, не делая замены кабеля полностью, что говорит о технико-экономической эффективности применения данного оборудования и описанного выше метода. Также при проведении испытаний изоляция не подвержена влиянию повышенного напряжения, что не приводит к ее старению и более быстрому износу.

СРАВНЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. М. Панфилов

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

Техническая диагностика – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объекта с целью снижения объема затрат на стадии эксплуатации за счет проведения текущего ремонта. К средствам технического диагностирования относится аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование (контроль).

Вибродиагностика дает возможность обнаруживать скрытые дефекты, получать информацию о состоянии оборудования, находящегося в труднодоступных местах, а также производить мониторинг и получать информацию о дефекте еще на стадии его появления. Еще среди достоинств вибродиагностического метода стоит упомянуть о малом времени диагностирования.

Характеристики средств измерений позволяют оценить свойства средства измерений и возможности его применения в заданных условиях эксплуатации. К ним относятся метрологические и технические характеристики. Метрологические характеристики оказывают решающее влияние на результаты и погрешности измерений.

Метрологические характеристики – это характеристики прибора, определяющие его пригодность для измерения определенной физической величины в заданном диапазоне ее значений и с заданной точностью.

В статье будут рассмотрены две системы, предназначенные для проведения измерений специальных акустических и вибрационных сигналов с целью оценки оборудования по техническому состоянию. По существующим стандартам эти измерения производятся в диапазоне частот от 10 до 5000 Герц.



Рис. 1. Две виброакустические системы (слева – Lgraph, справа – MSD-2010)

Для сравнения представлены были две виброакустические измерительные системы (рис. 1):

- Система MSD-2010 – многофункциональный сборщик данных MSD-2010 предназначен для аналого-цифрового преобразования выходных сигналов датчиков, которые представляют собой электрический заряд, напряжение или ток временного сохранения полученных данных в буферном ОЗУ и передачи их для дальнейшей обработки на компьютере.

- Система LGraph – программно-технический комплекс многоканального сбора данных вибрационного контроля для компьютерной диагностики технического состояния узлов и механизмов предназначен для приема и первичной обработки аналоговых сигналов от датчиков вибрации, устанавливаемых на диагностируемом оборудовании. Данные, подготовленные в цифровых форматах программно-техническими средствами комплекса, могут быть использованы экспертной системой технической диагностики.

Каждая система имеет свой датчик, который имеет одинаковые диапазоны измерений. Датчики ставились на подшипниковую опору электродвигателя. Схема установки датчиков представлена на рис. 2. Снятие данных производилось с трех режимах (холостой ход, режим с нагрузкой, обрыв фазы в режиме с нагрузкой) со сменой датчиков между двумя системами.

Спектры измерений в различных режимах работы приведены на рис. 3–8.

Результаты измерений двух виброакустических измерительных систем даны в таблице.

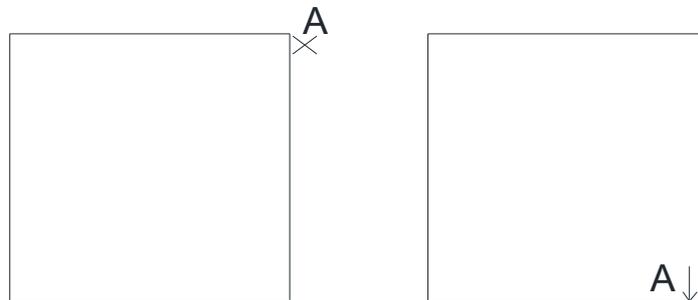


Рис. 2. Схема установки датчиков на электродвигатель (слева – вид сверху, справа – вид сбоку)

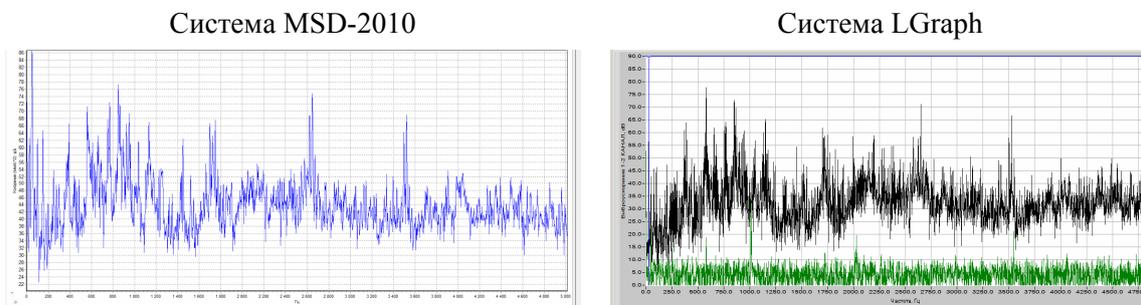
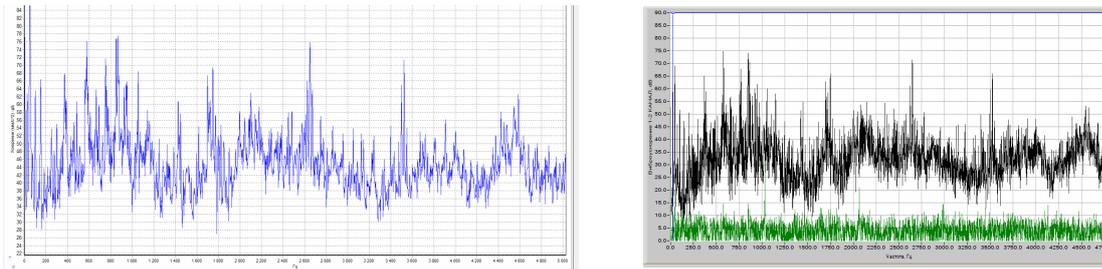
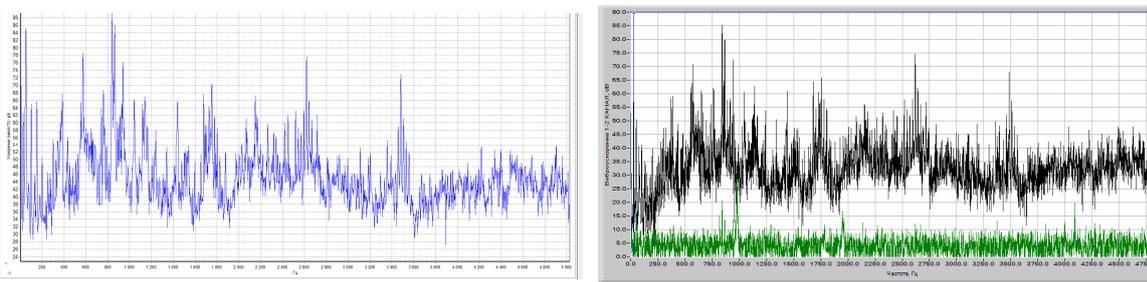
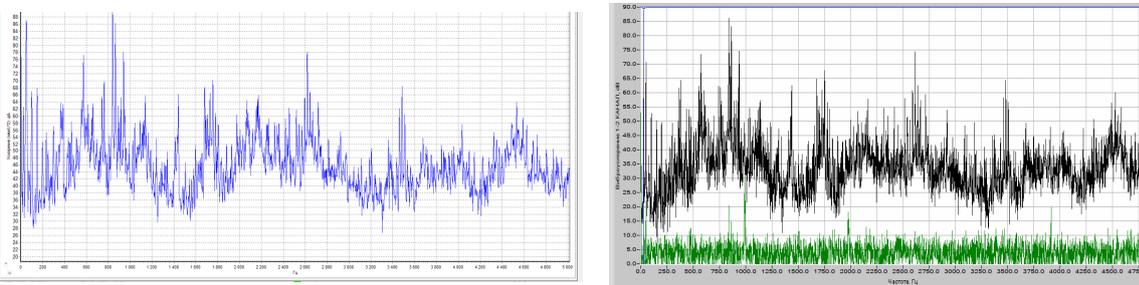
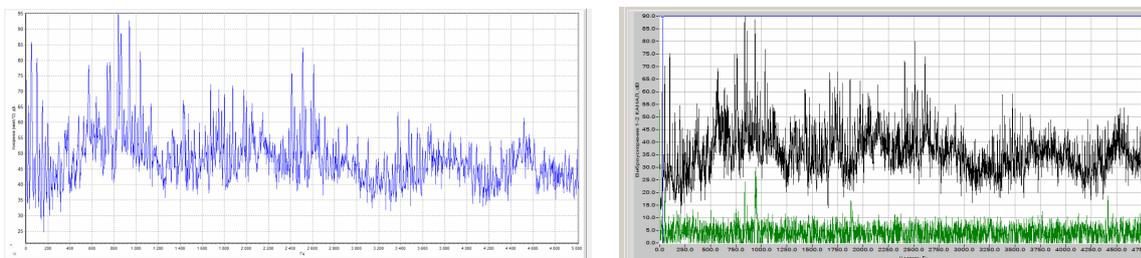


Рис. 3. Режим XX с датчиком 1

*Рис. 4. Режим XX с датчиком 2**Рис. 5. Режим нагрузки с датчиком 1**Рис. 6. Режим нагрузки с датчиком 2**Рис. 7. Режим обрыва фазы с датчиком 1*

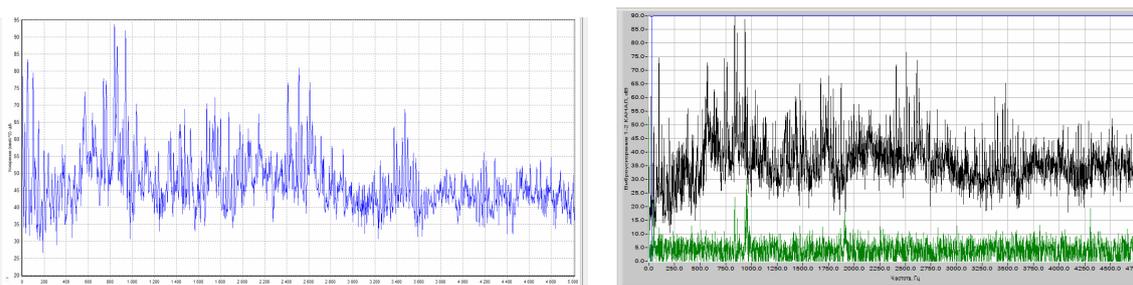


Рис. 8. Режим обрыва фазы с датчиком 2

Результаты измерений двух виброакустических измерительных систем, дБ

Вид системы	Информативные частоты, Гц	24	100	500	800
МСД	Режим XX	63	62	72	77
LGraph	Датчик 1	57	53	77	73
МСД	Режим XX	64	63	76	77
LGraph	Датчик 2	58	57	77	75
МСД	Режим нагрузки	63	65	79	89
LGraph	Датчик 1	57	55	73	86
МСД	Режим нагрузки	62	68	77	90
LGraph	Датчик 2	57	72	74	87
МСД	Режим обрыва	65	80	77	95
LGraph	Датчик 1	62	75	74	92
МСД	Режим обрыва	65	80	73	93
LGraph	Датчик 2	61	76	73	91

Обе системы дали близкие показания и одинаковые спектры амплитуд вибрации, следовательно, можно сделать вывод о том, что обе системы могут использоваться для вибродиагностики энергетического оборудования. Также можно сделать заключение о пригодности датчиков для использования в измерении.

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

Д. В. Сучков

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

Научный руководитель Д. И. Зализный

Цель исследования – разработка электронного автоматического выключателя с расширенными функциями.

Автоматические выключатели являются основными устройствами защиты низковольтных электрических сетей. Как правило, это электромеханические аппараты, содержащие два элемента защиты электроприемников – от перегрузки и от короткого замыкания. Первый вид защиты реализуется на основе нагревательного элемента – биметаллической пластины, а второй вид защиты – на основе электромеханического реле тока. Такие выключатели достаточно надежны, но имеют ограниченные возможности с учетом современного уровня техники.

Кроме электромеханических автоматических выключателей в России и за рубежом производятся и электронные низковольтные коммутационные аппараты – ре-

ле, пускатели и др. Они способны выполнять функции автоматических выключателей с расширенными возможностями. Однако силовые контакты этих аппаратов реализуют в большинстве случаев на основе малогабаритных электромеханических реле, что несколько снижает надежность подобных устройств из-за наличия подвижных элементов.

На кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого автором доклада совместно с научным руководителем разработан и собран макет микропроцессорного автоматического выключателя с электронной коммутационной частью.

Структурная схема устройства приведена на рис. 1.

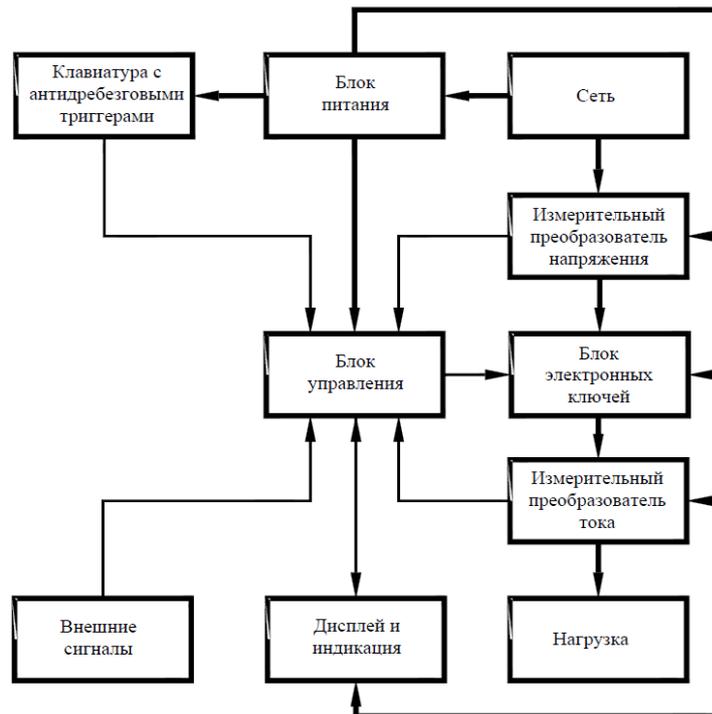


Рис. 1. Структурная схема автоматического выключателя

При подключении к сети блок питания преобразует напряжение сети в стабилизированное постоянное напряжение 5 В, которое питает микроконтроллерный блок управления, измерительные преобразователи, клавиатуру, светодиоды и дисплей.

Измеряемые напряжения и токи через соответствующие измерительные преобразователи подаются на входы АЦП, входящего в состав микроконтроллера блока управления.

Блок управления предназначен для обработки, хранения и реализации работы защит, выполнения внешних команд. Он имеет 3 режима: «Работа», «Авария» и «Настройка уставок защит». В первом режиме микроконтроллер в реальном времени выводит на дисплей значения напряжения и тока на нагрузке, зеленый светодиод сигнализирует о состоянии электронного ключа (включен, отключен), а кнопки «Вверх» и «Вниз» управляют состоянием электронного ключа.

При срабатывании одной из защит микроконтроллер переходит в режим «Авария» и отключает питание нагрузки. В режиме «Авария» на дисплей выводятся напряжение и ток в момент срабатывания защиты, светодиодные индикаторы указывают на тип аварии.

При нажатии кнопки «Вправо» автомат переходит в настройки уставок защит, поочередно пролистывает их, возвращаясь в режим «Работа». В режиме «Настройка уставок защит» кнопки «Вверх» и «Вниз» регулируют значение выбранной уставки.

Внешний вид печатных плат устройства показан на рис. 2.

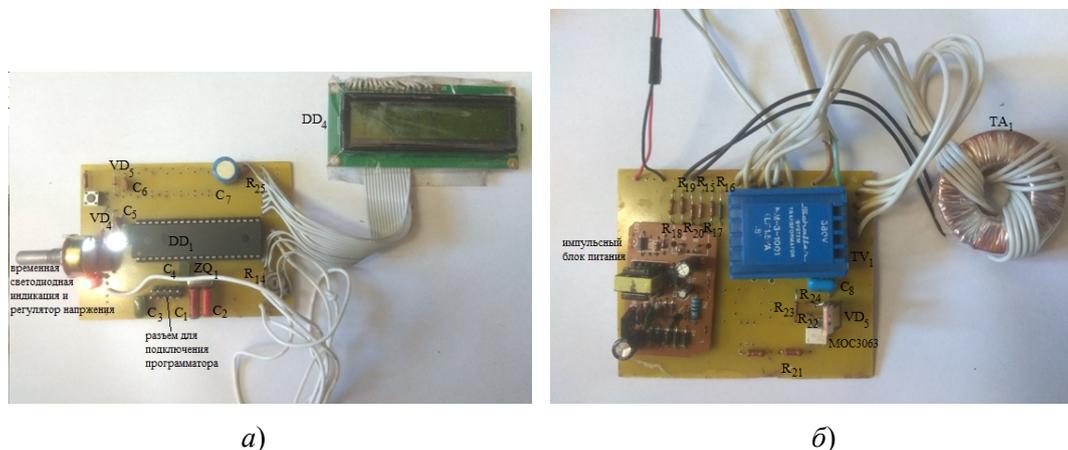


Рис. 2. Внешний печатных плат (а и б) макета электронного автоматического выключателя

На данный момент в приборе действуют три защиты: по току короткого замыкания, по максимальному и минимальному напряжению. Планируется добавление дифференциальной защиты, максимальной токовой защиты с независимой и зависимой выдержкой времени, температурной защиты от перегрузки.

Практическое применение разработки позволит повысить функциональность и надежность систем защиты низковольтных электрических сетей как на промышленных предприятиях, так и для бытовых потребителей.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ВЫБОР ВАРИАНТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Д. В. Бобров, В. Д. Козлов

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

Научный руководитель Ю. А. Рудченко

При выборе трансформатора нужно руководствоваться требованиями надежности и экономичности, в данном докладе рассматривается экономический аспект данного вопроса. Выбор трансформатора, прежде всего, следует начинать с требования категории надежности и требуемого числа. На промышленных предприятиях применяют зачастую одно- и двухтрансформаторные подстанции. Конкретное число трансформаторов выбирают, учитывая нагрузку и категорию надежности. Зная категорию и нагрузку, можно выбрать оптимальный вариант коэффициента нагрузки, а далее – и число трансформаторов, чтобы потом сравнить варианты и выбрать наиболее выгодный. Коэффициент загрузки составляют: для первой категории – 0,65–0,7, для второй – 0,7–0,8, для третьей – 0,9–0,95.

При технико-экономическом сравнении вариантов трансформаторов отдаются предпочтения наиболее выгодному варианту. Стоит учитывать не только самую стои-

мость трансформатора, но и годовые издержки. В данном докладе рассматривается вариант сравнения трансформаторов с учетом годовых издержек, уменьшая которые, мы получаем вариант трансформатора наиболее выгодный при эксплуатации.

В полном виде формула годовых издержек выглядит следующим образом:

$$И_{\text{год}} = KR + (12a + b \cdot 8760)\Delta P_{\text{ХХ}} + (12a + b \cdot \tau)K_{\text{з.макс}}^2 \cdot \Delta P_{\text{КЗ}}, \quad (1)$$

где K – первоначальные денежные вложения в покупку трансформатора (деньги предприятия или кредит); R – доля ежегодных отчислений на погашение кредита; a – основная плата за мощность (за 1 месяц); b – дополнительная плата за потребленную электроэнергию; $\Delta P_{\text{ХХ}}$ и $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – потери холостого хода и потери короткого замыкания трансформатора, справочные данные; τ – время наибольших потерь; $K_{\text{з.макс}}^2$ – максимальный коэффициент загрузки.

Время наибольших потерь можно рассчитать через формулу

$$\tau = (0,124 + T_{\text{м}} \cdot 10^{-4}) \cdot 8760,$$

где $T_{\text{м}}$ – число часов использования максимальной нагрузки:

$$K_{\text{з}} = \frac{S}{S_{\text{ном}}},$$

где S – нагрузка трансформатора; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора;

$$R = \frac{\rho(1 + \rho)^n}{(1 + \rho)^n - 1},$$

где ρ – годовая процентная ставка (о. е.); n – число лет, на которое разделен кредит.

Из выражения (1) следует, что годовые издержки на эксплуатацию трансформатора состоят из двух частей. Первая часть издержек – это стоимость и условия кредита. Выбор экономичного трансформатора (среди предложений на рынке) и выгодных условий кредитования ведут к снижению данных издержек.

Вторая часть издержек – это технические характеристики трансформатора и его энергоэффективность в эксплуатации. Данные издержки можно снизить, выбрав оптимальную номинальную мощность и вариант трансформатора с меньшими потерями холостого хода и потерями короткого замыкания.

Рассмотрим пример выбора силового распределительного трансформатора для однострансформаторной подстанции питающей потребителя с нагрузкой III категории. Число часов максимальной нагрузки равно 3000 ч. В результате технических расчетов к установке рекомендован трансформатор мощностью 630 кВА. Коэффициент загрузки трансформатора в режиме максимальной нагрузки равен 0,9.

Проведем сравнение двух вариантов силовых распределительных трансформаторов ТМГ-630/10 (11 серии) и ТМГ-630/10 (12 серии). Трансформаторы 12 серии являются более энергосберегающими из-за более низких потерь ХХ и КЗ. Технико-экономические характеристики трансформаторов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Технико-экономические характеристики трансформаторов

Характеристика	ТМГ-630/10 (11 серии)	ТМГ-630/10 (12 серии)
Мощность, кВА	630	630
Потери холостого хода, Вт	1060	800
Потери короткого замыкания, Вт	7450	6750
Цена, р.	10744,8	11818,8

Результаты расчетов годовых эксплуатационных издержек и сравнительной цены трансформаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Выбор варианта распределительного трансформатора

Характеристика	ТМГ-630/10 (11 серии)	ТМГ-630/10 (12 серии)
Годовые издержки $I_{\text{ГОД}}$, р.	7342,11	6484,42
Сравнительная цена $C_{\text{СРАВН}}$, р.	79805,17	70482,79

Из результатов расчета видно, что к установке выгоднее принять трансформатор ТМГ-630/10 (12 серии), для которого сравнительная цена и годовые издержки ниже.

Дополнительно рассмотрим пример установки трансформатора большей мощности (годовое потребление энергии потерь КЗ будет меньше из-за более низкого $K_{z,\text{макс}}$. В качестве вариантов примем трансформаторы марки ТМГ-1000/10 (11 серии) и ТМГ-1000/10 (12 серии). Технико-экономические характеристики трансформаторов даны в табл. 3.

Таблица 3

Технико-экономические характеристики трансформаторов

Характеристика	ТМГ-1000/10 (11 серии)	ТМГ-1000/10 (12 серии)
Мощность, кВА	1000	1000
Потери холостого хода, Вт	1400	1100
Потери короткого замыкания, Вт	10800	10500
Цена, р.	15426	16965,6

Результаты расчета приведены в табл. 4.

Выбор варианта распределительного трансформатора

Характеристика	ТМГ-1000/10 (11 серии)	ТМГ-1000/10 (12 серии)
Годовые издержки И _{ГОД} , р.	6845,66	6251,38
Сравнительная цена Ц _{СРАВН} , р.	74409,37	67949,77

Из результатов расчета (табл. 4) видно, что целесообразнее принимать к установке трансформаторы новых серий, обладающих лучшими техническими характеристиками. Наиболее выгодно установить трансформатор ТМГ-1000/10 (12 серии), так как данный вариант имеет меньшие годовые издержки и сравнительную цену, чем трансформатор 11 серии. Также из приведенных примеров видно, что выбор трансформатора большей мощности может вести к снижению годовых издержек за счет уменьшения коэффициента загрузки трансформатора.

Литература

1. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
2. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий : в 2 кн. / под общ. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. – М. : Энергия, 1973. – Кн. 1. Проектровочные сведения. – 520 с.
3. Трансформаторы силовые масляные / ОАО «Минский электротехн. завод им. В. И. Козлова». – Режим доступа: <https://metz.by/transformatory-silovye-maslyanye/>. – Дата доступа: 14.02.2020.
4. Декларация об уровне тарифов на электрическую энергию, отпускаемую республиканскими унитарными предприятиями электроэнергетики ГПО «Белэнерго» для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей : приказ М-ва антимонопольного регулирования и торговли Респ. Беларусь, 30 янв. 2020 г., № 21 // Мин-во энергетики Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/wpcontent/uploads/jelektro-1.pdf>. – Дата доступа: 12.11.2020.

**ПОИСК ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ
КОРОТКОВОЛНОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ИСТОЧНИКОВ СВЕТА, ЭКРАНОВ СОТОВЫХ ТЕЛЕФОНОВ
И КОМПЬЮТЕРОВ НА ЗРИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ ЧЕЛОВЕКА**

Г. А. Слепнёв

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

Научный руководитель А. И. Кравченко

Оптическое излучение, воздействующее на зрительные органы человека, подразделяется на несколько частей спектра: ультрафиолетовое излучение в диапазоне с длинами волн от 200 до 400 нм; видимая часть света, которая улавливается глазом (400–750 нм); инфракрасное излучение (свыше 750 нм).

Особый интерес представляет длинноволновый ультрафиолет (УФ-А, эритемная область), или так называемый черный свет (310–400 нм), который человеческий глаз способен улавливать, и синий – в диапазоне 400–480 нм – коротковолновая часть видимого света. Действие ультрафиолетового излучения на живые существа

двойко. С одной стороны, при его недостатке могут возникать заболевания. Искусственное облучение специальным УФ-А в необходимых нормах способно: активизировать работу иммунитета; вызвать образование важных сосудорасширяющих соединений (гистамин, например); укрепить кожно-мышечную систему; улучшить работу легких, повысить интенсивность газообмена; повлиять на скорость и качество метаболизма; повысить тонус организма, активизировав выработку гормонов; увеличить проницаемость стенок сосудов на коже и т. д.

Однако помимо перечисленных плюсов есть и отрицательные стороны. Существует ряд заболеваний и недугов, которые можно приобрести, если не допускать или, напротив, принимать в избыточном количестве рассматриваемые волны. Рак кожи – это самое опасное последствие воздействия ультрафиолетового излучения. Меланома способна образоваться при избыточном влиянии волн от любого источника – как природного, так и созданного людьми. Это особенно касается любителей загара в солярии. Во всем необходима мера и осторожность. Разрушительное действие на сетчатку глазных яблок оказывает УФ-излучение. Другими словами, может развиваться катаракта, птеригиум или ожог оболочки.

Светодиодные экраны современных электронных устройств интенсивно излучают синий свет (до 45 % в составе излучения). Эволюционно наши глаза не адаптированы к избытку излучения в коротковолновом видимом диапазоне и практически не имеют природной защиты от него. Синий цвет препятствует выработке мелатонина – гормона, который регулирует наш сон. Таким образом, увеличение времени, проведенное перед экраном электронных устройств, и сокращение времени отдыха вносит дисбаланс в привычную жизнь, нарушая суточный режим сна и бодрствования (циркадный ритм). Больше всего от синего цвета страдают дети и пациенты с искусственным хрусталиком вследствие того, что среды их глаз наиболее прозрачны. Как все мы знаем, глаза ребенка проходят критический период роста и развития.

Современная медицина доказала, что коротковолновый синий свет между 400–480 нм наиболее вреден для глаз, легко вызывает их сухость, неприятные ощущения, боль, ухудшение зрения, темные круги и мешки под глазами, приводит к катаракте и другим заболеваниям глаз. Обычные солнечные очки или так называемые очки ночного видения способны несколько ослабить блики, но не в состоянии нейтрализовать вред синего света, при этом затемняя все поле зрения, и долгое ношение их еще больше усиливает усталость.

Учитывая все вышеизложенное, возникает вопрос, есть ли линзы, которые можно носить постоянно и защитить глаза от вредных воздействий излучений, и какими оптическими свойствами они должны обладать.

Цель работы – определить оптические свойства и характеристики стекла для очков, которые бы снизили влияние коротковолнового оптического излучения, блокируя вредный сине-фиолетовый свет источников света, экранов сотовых телефонов и компьютеров и т. д.

Спектры излучения источников света, экранов сотового телефона и компьютера. Измерения спектров излучения источников света, экранов сотового телефона и компьютера производились на экспериментальной установке, основным элементом которой является монохроматор МДР-6. Управление установкой осуществлялось с помощью микроконтроллера и ПК.

Спектры излучения экранов сотового телефона и компьютера показаны на рис. 1–2. Как мы видим, спектры излучения экранов телефона и компьютера схожи и подобны спектрам излучения белых светодиодов, простираются от синей до оранжевой области и имеет три ярко выраженных полосы. В области поглощения мелато-

нина (430–480 нм) наблюдается полоса излучения, интенсивность которой зависит от цветовых оттенков экрана. Как видно, наиболее интенсивная синяя полоса – для белого экрана с текстом и менее – где преобладают зеленые и желтые тона.

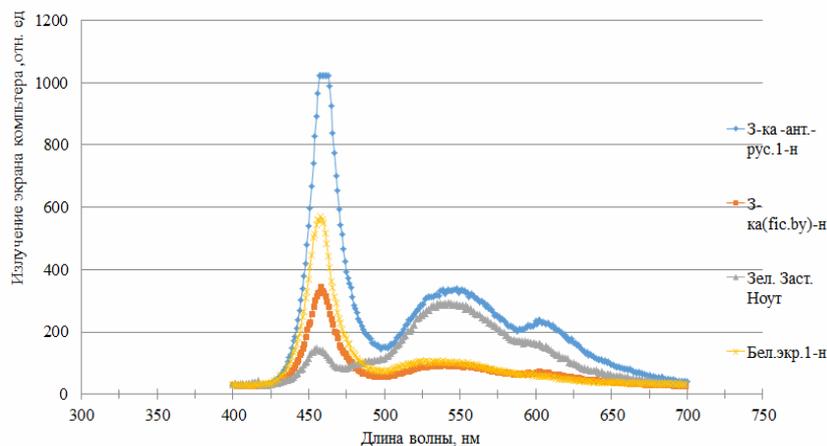


Рис. 1. Спектры излучения экрана монитора компьютера, заставки четырех цветов

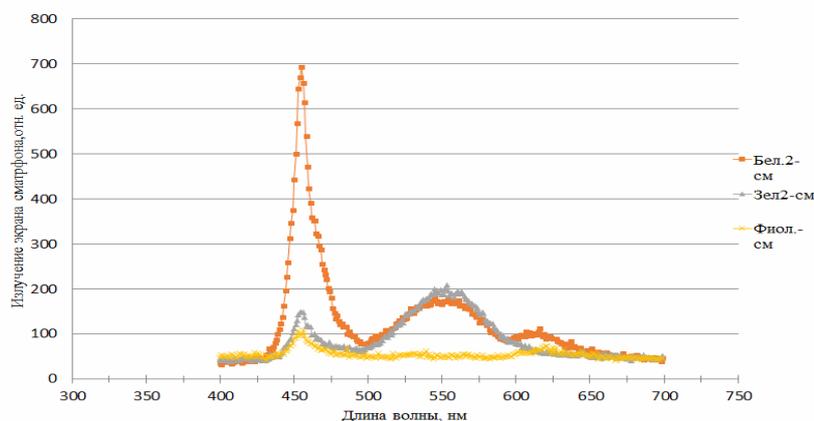


Рис. 2. Спектр излучения экрана сотового телефона (смартфона, заставки трех цветов)

Спектры пропускания стекол очков. Были измерены спектры пропускания стекол очков для чтения (Республика Беларусь), защитных очков от излучения экрана компьютера (Республики Беларусь), солнцезащитных Cat. Cay At-11 (США) и Permit PT-11 (Тайвань) (рис. 3) и др. Измерения спектров пропускания проводились на спектрофотометре СФ-26.

Как видно, стекла очков для чтения и защитных от излучения компьютера отсекают только длинноволновый ультрафиолет (УФ-А), а в области поглощения мелатонина и далее – пропускание почти 90–100 %. Иначе пропускают свет очки производства США и Тайваня, которые отсекают ультрафиолет УФ-А, но пропускание в синей области около 8 %. Пропускание в зеленой области повышается и в оранжевой – достигает 10 %. В диапазоне 625–700 нм очки Cat. Cay At-11 (США) пропускают свет несколько лучше – почти 30 % падающего излучения.

Таким образом, как представленные защитные очки от синего излучения экрана компьютера, сотового телефона (Республика Беларусь), так и другие, никак не защищают глаза в области поглощения мелатонина, отсекая только ультрафиолетовое УФ-А излучение.

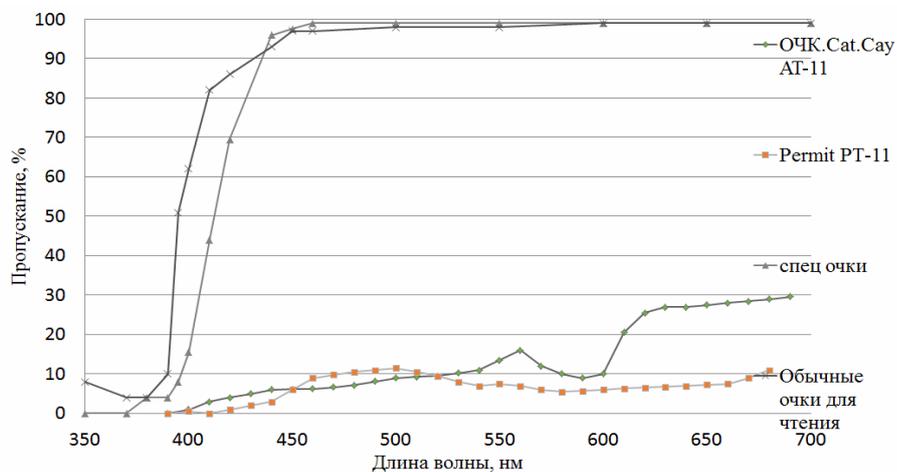


Рис. 3. Спектры пропускания стекол очков обычных и для защиты от излучения экрана компьютера, Cat. Cay AT-11 и Permit PT-11

Спектры пропускания образцовых желтых стекол. Для определения стекла для очков пригодного для защиты от коротковолнового оптического излучения источников света, экранов сотового телефона и компьютера нами были измерены спектры пропускания ряда образцовых стекол, желтых пленочных материалов и пластика. Наиболее подходящими оказались стекла марок ЖС-17, 18 и ОС-11, ОС-12. Спектры пропускания стекол ЖС-17 и ОС-11, ОС-12 показаны на рис. 4.

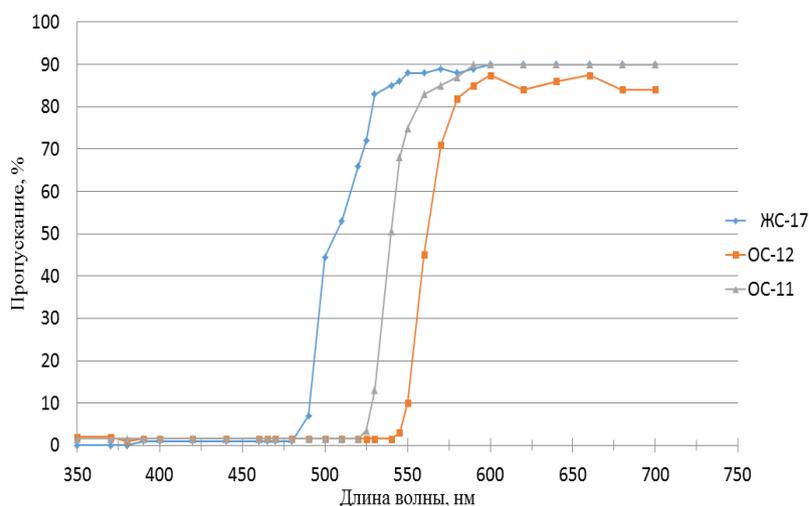


Рис. 4. Спектры пропускания желтых стекол для очков ЖС-17 и ОС-11, ОС-12

Как мы видим, в области поглощения мелатонина – до 480 нм, ни одно из этих стекол не пропускает синий свет и может служить в качестве стекла для очков защищающих глаза от ультрафиолетового излучения УФ-А и синего света.

Измерены спектры излучения экранов сотового телефона и компьютера, спектры пропускания стекол ряда очков и образцовых стекол.

Показано, что защитные очки от излучения экрана компьютера производства Республики Беларусь не могут быть использованы для защиты от синего излучения в области полосы поглощения мелатонина. Установлено, что для защиты от синего и УФ-А можно применять очки с использованием стекол типа ЖС-17, ОС-11 и ОС-12.

Представлены следующие рекомендации. Синий цвет – коротковолновый видимый свет пагубно влияет на выработку мелатонина в вечернее время (440–480 нм), в большей степени способен провоцировать напряжение, усталость глаз и различные заболевания, чем цветовые оттенки более длинных волн – оранжевого или красного цвета. Уменьшение цветовой температуры монитора ограничивает количество синего света, пропускаемого монитором, и тем самым снижает нагрузку на глаза. Поэтому заставку для экрана следует выбирать (картинку на экране) в желто-зеленых, желтых или желто-оранжевых цветовых оттенках. Работу на компьютере и пользование сотовым телефоном следует заканчивать за два–четыре часа до сна.

ТЕХНОЛОГИЯ «УМНЫЙ ДОМ» КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

С. А. Савицкая

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

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

Дома с нулевым потреблением энергии – один из важных шагов, предпринятых человеком для сохранения экологии и повышения собственного уровня комфорта.

Концепция дома с нулевым потреблением энергии (zero net energy (ZNE) building) предполагает, что такое здание находится на полном самостоятельном обеспечении электричеством, которое оно получает от возобновляемых источников энергии. Системы, установленные в таком доме, распределяют полученную энергию и обеспечивают здание электричеством, отоплением и горячей водой. Такие дома не потребляют ископаемое топливо для своего функционирования и не вырабатывают оксид углерода, однако их существование невозможно без системы «Умный дом».

Дом с нулевым энергопотреблением не только должен обеспечивать себя необходимой энергией, но и быть построен с применением энергоэффективных решений, которые позволят снизить потребление энергоресурсов.

Концепция дома с нулевым энергопотреблением имеет несколько важных составляющих. В случае отсутствия хотя бы одного из них дом вряд ли сможет полностью функционировать и находиться на полном энергетическом самообеспечении. Для создания «нулевого» дома необходимо иметь три важных параметра [1]:

1. *Архитектурное решение.* При проектировании энергонезависимого дома важен не только материал стен и внешняя отделка фасада. Немаловажную роль играет вентиляционная система, которая при грамотном проектировании не требует в будущем больших энергозатрат. Помимо этого выбирается правильное расположение дома и размер окон, учитывая его географическое положение и среднегодовую температуру в регионе. Это поможет рационально расходовать дневной свет, достигать отличного уровня освещенности с минимальными затратами и обеспечить комфортную температуру в здании круглый год.

2. *Возобновляемые источники энергии* – именно их установка позволяет умному дому функционировать автономно. Наиболее популярным решением является установка солнечных панелей, которые преобразуют энергию солнца в электричество. Как правило, они устанавливаются на крыше здания. Полученная при помощи солнечных батарей энергия попадает в специальные аккумуляторы, откуда затем распределяется для нужд дома. Установка солнечных панелей и всего необходимого оборудования по-прежнему остается недешевым удовольствием. В европейских странах такое вложение окупается в течение нескольких лет постоянного проживания в доме, а длительный срок службы устройств позволяет не беспокоиться об их замене в ближайшие 20 лет. Эффективность подобных систем в северных регионах России не очень высока и сложно говорить о ее окупаемости. Срок службы солнечных батарей действительно высок, но аккумуляторы необходимо менять.

3. *Система «Умный дом»* – одна из главных составляющих каждого энергонезависимого дома. Ведь недостаточно просто обеспечить здание энергией, нужно сделать так, чтобы само энергопотребление радикально сократилось, а полученная от возобновляемых источников энергия грамотно распределялась внутри здания. Все это позволяет сделать система «Умный дом». Потенциал и функционал системы менеджмента здания огромен, ведь она позволяет не только значительно снизить потребление энергии, но и повысить комфорт жильцов.

Система «Умный дом» ориентирована на повышение уровня комфорта и безопасности проживания [2], при этом важным условием комфорта является соответствие системы потребностям человека. Таким образом, при проектировании системы автоматизации жилища необходимо учесть факторы, формирующие жизненные принципы жителей дома.

Автоматизированное жилище представляет собой единую систему управления системами жизнеобеспечения. В каждой комнате расположены датчики и сенсоры, считывающие информацию о состоянии жилища и формирующие входные данные для вычислительной системы.

Система жизнеобеспечения представляет собой совокупность инженерной системы, системы безопасности и телекоммуникационной системы.

Инженерная система включает в себя водоснабжение, электроснабжение, газоснабжение и теплоснабжение. Система безопасности представляет собой совокупность систем охраны, видеонаблюдения, контроля доступа. В телекоммуникационные системы входят: телефон, Интернет, телевидение. Автоматизация управления этими системами – основная задача «Умного дома». Необходимо не только разместить датчики, считывающие информацию, но и автоматизировать процесс решения в случае обнаружения проблем. Система должна информировать пользователя о проблеме и предложить пути решения. Помимо оповещения пользователя система может самостоятельно решить возникшую проблему. Так, в случае обнаружении утечки поступление воды должно прекратиться автоматически. При обнаружении посторонних лиц в отсутствие хозяев – обеспечить вызов охраны.

Автоматизация контроля систем жизнеобеспечения осуществляется с целью повышения уровня безопасности. Для повышения уровня комфорта необходимо автоматизировать управление подсистемами. В системе «Умный дом» можно выделить такие подсистемы, как электрообеспечение (бесперебойная работа системы, резервный источник питания), освещение (автовключение, режимы освещения), управление электроприводами (регулировка жалюзи, штор), развлечение (домашний кинотеатр, аудиосистема), связь (беспроводная передача данных с датчиков, Интернет), климатконтроль (системы отопления, кондиционирования, вентиляции и ув-

лажнения воздуха), системы безопасности (система охраны, видеонаблюдения, контроль доступа) и система общего управления (доступ с любого портативного устройства, находящегося в локальной сети, или удаленно через Интернет).

Помимо повышения уровня комфорта и безопасности целью «Умного дома» является энергосбережение, которое возможно за счет распределения нагрузки в зависимости от времени суток и установленных пользователем параметров.

Система «Умный дом» предоставляет возможность управления в режиме реального времени при помощи любого мобильного устройства или ПК, расположенного в локальной сети или имеющего доступ в Интернет.

Вычислительная часть системы «Умный дом» представлена микрокомпьютером, принимающим сигналы датчиков и сенсоров, и реагирующим на них соответствующим образом путем передачи сигналов исполняющим модулям. В [3] дано сравнение наиболее популярных устройств обработки данных, в результате анализа которых показаны очевидные преимущества Coubietruck для обработки данных системы.

Большой опыт строительства и эксплуатации системы «Умный дом» имеет Швейцарская компания Umwell Arena, закончившая весной 2016 г. работу над проектом энергетически независимого жилого здания [4]. Многоквартирный дом возведен в коммуне Брюттен кантона Цюрих. Постройка рассчитана на комфортное проживание в отдельных квартирах девяти семей. Дом не подключен к энергосетям и газоснабжению. В данном случае ему не нужны внешние источники энергии. Структура самостоятельно обеспечивает себя теплом и электричеством. Дом полностью утеплен – от крыши до стен и окон. В нем комфортно находиться в любое время года и внешне он выглядит крайне привлекательно (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид «Умного дома»

При проектировании постройки экоддома были на практике воплощены экологические принципы сбора, накопления и рационального использования энергии. Главным источником электричества служит солнце, энергию которого собирают батареи на крыше и на фасаде. Только 1 ч работы солнечных батарей снабжает весь дом электричеством на целые сутки. Хотя электричества более чем достаточно, в доме установлена только бытовая техника класса эффективности A+++ и светодиодное освещение.

В Республике Беларусь в ближайшие годы должны появиться первые многоэтажки с технологией «Умный дом», оснащенные самыми последними достижениями в области IT-индустрии. Концепцию «Умного дома» разрабатывают сейчас в Институте жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук. В [5] отмечено, что технологии не создаются ради технологий. Все направлено на то, чтобы повысить комфорт проживания и одновременно снизить затратность по основным ресурсам, что и могут предоставить современные информационные технологии. К системе «Умный дом» есть подходы с точки зрения комфортности, экологичности, применения различных систем передачи данных – оптоволоконной или мобильной связи, энергетической эффективности. Это многокомпонентная, сложная задача, и в ближайшее время должны быть очерчены ее контуры с учетом как мирового опыта, так и отечественных реалий. Причем разработка будет применима не только в масштабах городов, но и в сельской местности, агрогородках, чтобы качество жизни в них ничем не отличалось от городских стандартов.

Таким образом, основная цель технологии «Умный дом» – повышение уровня безопасности, комфорта проживания, что достигается посредством автоматизации управления системами жизнеобеспечения. Рациональное использование ресурсов способствует энергосбережению и повышению энергетической эффективности жилых зданий.

Литература

1. Энергонезависимые здания и Умный дом. – Режим доступа: <http://intelliger.ru>. – Дата доступа: 28.03.2021.
2. Авдеев, А. С. Разработка систем автоматизации жилых и офисных помещений «Умный дом» // Катановские чтения : сб. науч. тр. студентов – 2014. – С.142–143.
3. Авдеев, А. С. Основные проблемы программирования систем «Умного дома» / А. С. Авдеев, А. И. Герасимова // Перспективы науки. – 2014. – С. 62–65.
4. Галяутдинова, А. В. В Швейцарии заселен первый в мире энергетически независимый дом. – Режим доступа: <http://madrobots.ru/log/post/eco-house-in-brutten/>. – Дата доступа: 28.03.2021.
5. Костюкевич, А. Окна смотрят в завтра / А. Костюкевич // СБ Беларусь сегодня. – 24.04.2018. – С. 12.

СИЛОВЫЕ АМОΡФНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

А. В. Новик

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

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

Экономия электрической мощности и энергии является важнейшим направлением развития современных электрических сетей и систем электроснабжения. Особое значение это направление приобрело в связи с необходимостью повышения энергоэффективности использования электроэнергии и реализации программ энергосбережения. Одним из критериев результативности энергосбережения являются величины суммарных потерь электрической мощности и энергии, снижение которых возможно только на основе широкого применения инновационного электрооборудования, в частности, распределительных трансформаторов с сердечником из аморфной стали.

На распределительные трансформаторы приходится 25–30 % всех технических потерь в энергосистемах. Полностью устранить эти потери невозможно. Трансфор-

матору, как и любому другому устройству, для работы требуется энергия. Часть этой энергии уходит на нагрев проводов (потери короткого замыкания), часть – на перемагничивание (потери холостого хода). В связи с изменением нагрузки на протяжении суток, а также в разные периоды года весомерность единицы потерь холостого хода $P_{\text{хх}}$ в 2–4 раза выше единицы потерь короткого замыкания $P_{\text{кз}}$. Причем, трансформаторы работают круглосуточно, и соответственно потери $P_{\text{хх}}$ происходят постоянно. Использование электротехнической стали с ориентированными зернами и применение технологии *step-lap* при изготовлении магнитопровода позволили снизить $P_{\text{хх}}$ на 20–30 %, и это было серьезным достижением. Применение же аморфной стали позволяет совершить настоящий технологический прорыв, снизив $P_{\text{хх}}$ в 2–3 раза [1].

Аморфный сплав (АС) – это определенный вид прецизионного сплава. Его отличительной характеристикой в отличие от сплавов кристаллической структуры является целый комплекс физических и химических свойств. Одно из основных отличий аморфного сплава от электротехнической стали – отсутствие периодичности в расположении атомов. Также эти сплавы отличаются от кристаллических сплавов большей устойчивостью к коррозии, они прочнее в несколько раз и обладают лучшей электромагнитной характеристикой. В настоящее время для использования в электротехнических устройствах наибольшее распространение получили аморфные сплавы на основе металлов переходной группы «железо – никель – кобальт» (Fe; Ni; Co), взаимодействующие с металлоидами «бор – кремний – углерод» (B; Si; C), которые понижают температуру плавления и обеспечивают более легкое достижение температуры стеклования аморфного сплава при его охлаждении. В результате исчезают междоменные границы, что приводит к высокой твердости, прочности и коррозионной стойкости таких материалов. Аморфное состояние достигается подбором химического состава сплава и использованием специальной технологии сверхбыстрого охлаждения со скоростью выше критической, для чего исходный расплав выливается на быстро вращающийся диск (рис. 1) [2]. При попадании на поверхность диска расплав охлаждается со скоростью около 106 К/с и превращается в ленту толщиной от 15 до 60 мкм, имеющую аморфную структуру, аналогичную структуре стекла. Лента навивается в кольцевые, U-образные сердечники или формируется в виде стержней. Технология навивки позволяет получать сердечники с диаметром от нескольких миллиметров до 500 мм.

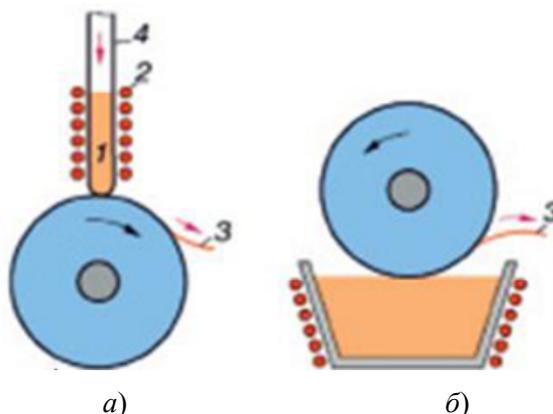


Рис. 1. Схемы устройств для получения аморфных сплавов закалкой из жидкого состояния: а – нанесение расплава на вращающийся металлический диск или цилиндр; б – извлечение расплава вращающимся диском; 1 – расплав; 2 – нагревательное устройство (индукционная печь); 3 – лента аморфного сплава; кварцевая трубка

Придание материалам специфических свойств (например, петля гистерезиса определенной формы) достигается термо- или термомагнитной обработкой (ТМО), в результате которой структура ленты может остаться аморфной, стать частично кристаллизованной или нанокристаллической.

В настоящее время силовые распределительные трансформаторы с сердечником из АС серийно выпускаются и используются в США, Канаде, Японии, Индии, Словакии и других странах. Всего в мире уже изготовлено 60–70 тыс. трансформаторов мощностью 25–100 кВ · А. Примерно тысяча трансформаторов прошли успешные многолетние испытания в различных энергосистемах. Наибольших успехов добились США и Япония. Японская фирма «Hitachi» в сотрудничестве с американской «AlliedSignal» выпустила группу силовых трансформаторов с магнитопроводом из аморфного сплава мощностью от 500 до 1000 кВ · А. Испытания показали, что потери электроэнергии в магнитопроводах таких трансформаторов на 80 % меньше по сравнению с трансформаторами со стальными сердечниками. Начиная с 2009 г., ряд европейских распределительных компаний также установили в опытную эксплуатацию несколько трансформаторов мощностью 400 кВ · А с сердечником из аморфной ленты.

Особенности АС потребовали изменения конструкции магнитопровода. В связи с малой толщиной аморфный материал наиболее пригоден для витой конструкции магнитопровода, которая может применяться у трансформаторов с номинальной мощностью до 1000 кВ · А.

В России производство отечественных силовых трансформаторов сдерживалось причинами технологического и экономического характера. Дело в том, что для изготовления магнитопровода силового трансформатора мощностью от 32 кВ · А необходима аморфная лента шириной до 220 мм. Промышленный выпуск такого материала освоен сравнительно недавно и пока только за рубежом. Российские производители в настоящее время предлагают ленту шириной до 80 мм. Повлияло также снижение цен на аморфную сталь с 50 до 3 долл. США за килограмм, что сделало выпуск «аморфных» трансформаторов экономически оправданным, причем это касается масляных трансформаторов. Сухие силовые трансформаторы с аморфным сердечником являются более дорогостоящими и поэтому требуют дополнительного технико-экономического обоснования – такое оборудование может остаться невостребованным рынком. В 2012 г. первой в России к выпуску силовых трансформаторов с аморфными сердечниками АТМГ приступила группа «Трансформер» (рис. 2) [1].



Рис. 2. Трансформатор АТМГ ПГ «Трансформер»
а – внешний вид; б – магнитопровод с катушками

В Республике Беларусь первый масляный трехфазный трансформатор типа ТМГ24-400/10 с витым магнитопроводом из аморфного сплава был изготовлен на Минском электротехническом заводе. Благодаря инновационным технологиям, используемым при изготовлении трансформатора, удалось добиться существенного улучшения его технических показателей, характеризующих энергоэффективность [3].

В частности, первый трансформатор имел следующие характеристики: $S_{ном} = 400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $\Delta P_x = 0,29 \text{ кВт}$; $\Delta P_k = 5,8 \text{ кВт}$; $I_x = 0,3 \%$; $U_k = 4,5 \%$.

Если сравнивать ТМГ24-400/10 с трансформаторами такой же мощности других типов, то можно заметить, что он имеет значительное превосходство по показателям холостого хода (ХХ). Например, его значение ΔP_x примерно в три раза меньше, чем у трансформатора ТМГ11-400/10.

Трансформаторы с магнитопроводами из АС имеют высокую энергоэффективность, так как их потери ХХ составляют примерно 1/3 от потерь холостого хода трансформаторов с сердечником из холоднокатаной электрической стали.

В то же время трансформаторы данной конструкции обладают и рядом недостатков. Существенным недостатком магнитопроводов из АС является их более высокая стоимость по сравнению с сердечниками из традиционных материалов. Кроме того, аморфная сталь имеет толщину 25–30 мкм, большую твердость и хрупкость. Последний фактор усложняет сборку магнитопровода.

Таким образом, применение трансформаторов с магнитопроводами из АС позволяет снизить потери мощности и электроэнергии в системах электроснабжения объектов разного назначения, а также связанные с электропотреблением технико-экономические показатели промышленного предприятия: плату за электропотребление, энергетическую составляющую себестоимости продукции, выброс CO_2 в атмосферу и др.

Литература

1. Печенкин, В. И. Силовые «аморфные» трансформаторы. Будущее в настоящем / В. И. Печенкин // Электротехн. рынок. – 2012. – № 5/6 (47, 48). – С. 46–47.
2. Войтюлевич, О. А. Трансформаторы с аморфным магнитопроводом / О. А. Войтюлевич, С. Г. Гапанюк // Актуальные проблемы энергетики : материалы науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2017. – С. 409–412.
3. Сорока, А. В. Применение распределительных трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали / А. В. Сорока, В. Н. Радкевич // Актуальные проблемы энергетики : материалы науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2017. – С. 494–499.

ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. Ю. Гурьянов

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

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

Основной целью технической диагностики является, в первую очередь, распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации, и как следствие – повышение надежности и оценка остаточного ресурса оборудования.

Неотъемлемый элемент при централизованном электроснабжении является трансформатор. Выход из строя силового трансформатора может привести к созданию аварийных ситуаций, перебоям электроснабжения, массовому недоотпуску про-

дукции, сопровождающимся значительным экономическим и экологическим ущербом. Поэтому контроль состояния трансформатора является важной задачей.

Диагностика трансформаторов сегодня – довольно долгое и затратное мероприятие. Часто необходимо провести целый ряд непростых испытаний, так как современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта. Надежность трансформатора в значительной степени определяется надежностью обмоток, которая, в свою очередь, зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации оборудования, а также во время его хранения и транспортировки оно подвергается разнообразным внешним воздействиям, приводящим с течением времени к прогрессирующему ухудшению свойств изоляции.

Основные причины возникновения межвитковых замыканий в трансформаторе – старение изоляции, перенапряжения или низкая организация производства и эксплуатации. Классификация факторов, влияющих на возникновение замыканий, приведена на рис. 1, анализ которых показывает, что причины нарушения изоляции могут быть связаны или могут проявляться обособленно, что затрудняет поиск решения по защите обмоток трансформаторов от межвитковых замыканий [1].

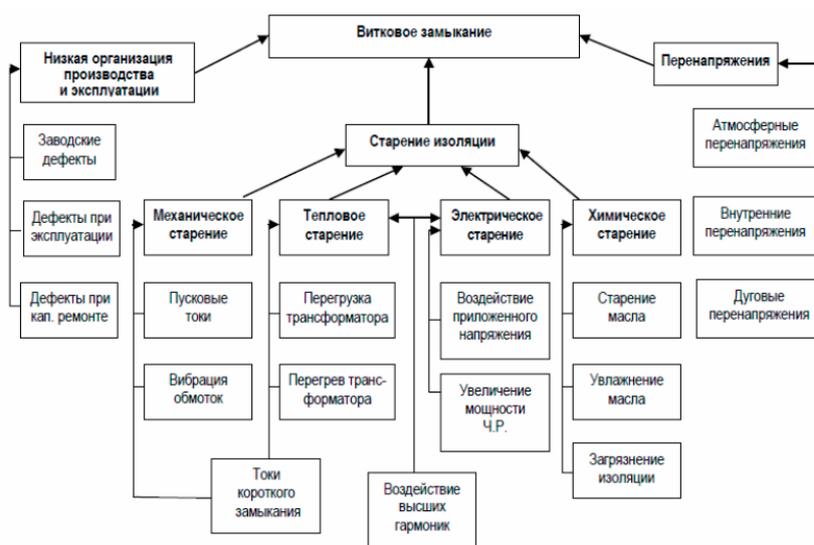


Рис. 1. Классификация факторов, влияющих на возникновение межвитковых замыканий трансформаторов

В процессе эксплуатации трансформаторного оборудования наблюдается старение и износ его элементов. В связи с этим необходимо отметить, что задача системы мониторинга заключается не только в адекватном отображении состояния трансформаторного оборудования с целью предотвращения аварийного выхода его из строя, но также и в продлении срока службы за счет оптимизации рабочих параметров.

Основным параметром, ограничивающим срок службы трансформатора, является состояние его твердой изоляции, характеризуемое относительной скоростью термического износа [2].

Среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции трансформаторов, один из основных – старение изоляции под действием температуры. Это явление лучше других поддается количественному учету, а поэтому сравнительно подробно исследовано.

С точки зрения температурных воздействий на изоляцию различают понятия «теплоустойчивость» и «нагревостойкость». Поскольку нагревостойкость определяется скоростью старения изоляции в условиях повышенных температур, особое значение приобретают методы расчета скорости старения и на этой основе – срока службы изоляции.

Экспериментальные исследования выполнялись на базе лаборатории кафедры электротехники БелГУТа [3].

Объектом испытания является физическая модель силового трансформатора – однофазный трансформатор небольшой мощности с воздушным охлаждением.

Цель испытания – замыкание витков на первичной и вторичной обмотках трансформатора, а также фиксирование изменения температуры на обмотках трансформатора.

Для проведения эксперимента использовалось оборудование, представленное на рис. 2 (ЛАТР SUNTEK, 2 стрелочных вольтметра, 2 стрелочных амперметра, однофазный трансформатор с воздушным охлаждением, нейросетевой газоанализатор, пирометр). В качестве нагрузки использовались промышленные лампы накаливания.

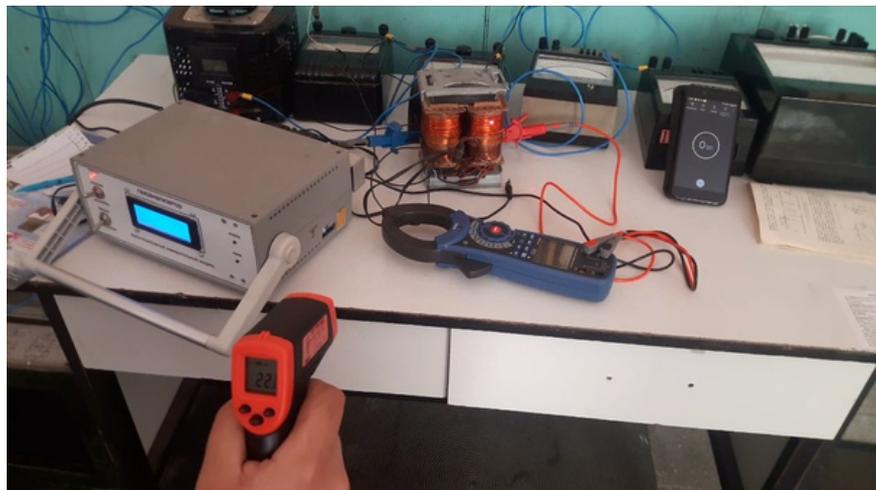


Рис. 2. Оборудование, применяемое в ходе эксперимента

В ходе эксперимента на первичной и вторичной обмотках трансформатора поочередно устраивалось замыкание двух и трех витков между собой. Для качественного анализа нагрева обмоток измерялась их температура при нормальном режиме работы трансформатора, при коротких замыканиях первичной и вторичной обмоток.

Анализ полученных результатов показал:

- итоговые значения токов отличаются даже при замыкании малого количества витков на первичной обмотке; при замыкании витков на вторичной обмотке значения отличаются, но незначительно. Следовательно, замыкание витков на первичной обмотке в реальных условиях более опасно, чем замыкание витков на вторичной обмотке трансформатора при условии замыкания небольшого количества витков;

- в реальных условиях при большом количестве замыканий витков на вторичной обмотке трансформатора значения токов будут значительно отличаться от значений при работе трансформатора под нагрузкой без замыкания витков;

- температура обмоток росла одинаково по времени, но ее значения при замыкании вторичной обмотки выше, чем при замыкании первичной;

– при нормальной работе трансформатора произошел небольшой скачок температуры, а при замыканиях как первичной, так и вторичной обмоток, наблюдался ее плавный рост.

Для создания диагностических устройств и программно-аппаратных комплексов желательно использовать искусственные нейронные сети, которые являются мощным средством распознавания и прогнозирования сигналов, а их способность к обучению дает возможность разрабатывать адаптивные системы защиты и диагностики трансформаторов.

Для анализа данных, полученных с помощью приборного учета, и классификации неисправностей в программе MATLAB была реализована сверточная нейронная сеть (СНС), позволяющая контролировать состояние трансформаторов в режиме реального времени, не выводя его из работы. СНС имеет специальную архитектуру, которая позволяет ей максимально эффективно распознавать образы. Сама идея СНС основывается на чередовании сверточных и субдискретизирующих слоев (pooling), а структура является однонаправленной. СНС получила свое название от операции свертки, которая предполагает, что каждый фрагмент изображения будет умножен на ядро свертки поэлементно, при этом полученный результат должен суммироваться и записываться в похожую позицию выходного изображения. Такая архитектура обеспечивает инвариантность распознавания относительно сдвига объекта, постепенно укрупняя «окно», на которое «смотрит» свертка, выявляя все более и более крупные структуры в изображении.

Правильность выходных данных, реализованная с помощью СНС, составила 95 %.

Практическая реализация СНС при соответствующей доработке позволит:

- диагностировать и локализовать неисправности трансформаторов;
- снизить количество unplanned отказов трансформаторов и продлить их срок службы за счет оптимизации рабочих параметров;
- повысить надежность систем электроснабжения.

Л и т е р а т у р а

1. Шерьязов, С. К. Классификация факторов, влияющих на витковые замыкания в трансформаторах напряжением 6–10/0,4 кВ / С. К. Шерьязов, А. В. Пятков // Вестн. КрасГАУ. – 2014. – № 7.
2. Бережной, А. В. Применение нейронных сетей для моделирования относительной скорости износа изоляции трансформаторного оборудования / А. В. Бережной, Е. Г. Дашевский // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2010. – № 5. – С. 44–46.
3. Галушко, В. Н. Повышение надежности трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета при межвитковых коротких замыканиях / В. Н. Галушко, И. Л. Громыко, С. И. Зайцев // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта. Наука и транспорт. – 2021. – № 2 (39). – С. 31–37.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭНЕРГЕТИКИ

К. В. Керус

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

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

С учетом технического прогресса и новейших разработок в сфере автоматизации электроснабжения острыми становятся вопросы не только обеспечения потребителей электроэнергией должного качества, но и также вопросы устойчивости элек-

троэнергетических систем (ЭЭС) к различного вида авариям. Ранее использовавшийся расчетный метод состояния ЭЭС устарел и сейчас происходит переход к активному управлению режимами работы энергосистемы с помощью компьютерного моделирования различных аварийных и нормальных режимов работы. В данный момент для анализа режимов ЭЭС используются такие теории, как теория планирования эксперимента, теория подобия, техническая диагностика и теория устойчивости. Решение поставленных задач с помощью этих теорий неразрывно связано с двумя фундаментальными задачами: получение адекватных математических моделей описания установившихся и переходных режимов и решение задач контроля параметров ЭЭС. Кроме этого в практическом плане большую роль играют:

1. Возможность математического описания границ области устойчивости пределов управляемых параметров.
2. Возможность прогнозирования опасных и безопасных пределов управляемых параметров в зависимости от значений внутренних параметров системы.
3. Оценка степени совместного влияния различных параметров на устойчивость ЭЭС.

Именно поэтому актуально использование элементов теории катастроф для моделирования различных устойчивых режимов ЭЭС, а также для оценки состояния энергосистемы в переходных режимах. Теория катастроф является развитием и логичным продолжением теории устойчивости, а также включает в себя теорию бифуркаций дифференциальных уравнений (теория изменения качественной картины разбиения фазового пространства в зависимости от изменения параметра) и теорию особенностей гладких отображений (сопоставление каждой точке поверхности точки плоскости). В данное время существует не так уж и много программного обеспечения для использования теории катастроф в энергетике, но даже с применением уже известных методов расчета можно произвести следующие расчеты устойчивости ЭЭС:

1. Использование моделей и методов теории катастроф для определения координат контролируемых параметров и выполнение оценки устойчивости равновесных состояний в различных режимах ЭЭС с учетом конструктивных особенностей и настроечных параметров системы.
2. Оптимизация установившихся и переходных режимов ЭЭС по запасу статической устойчивости.
3. Разработка аналитических алгоритмов определения режимных и системных параметров ЭЭС по условиям статической и динамической устойчивости.
4. Проведение исследования опасных и безопасных границ параметров ЭЭС.
5. Исследование ЭЭС с учетом применения таких средств защиты, как автоматическая частотная разгрузка, автоматический ввод резерва.

В общем случае теория катастроф анализирует критические точки потенциальной функции, т. е. точки, где не только первая производная функции равна нулю, но и производные более высокого порядка. Динамика развития таких точек может быть изучена при помощи разложения потенциальной функции в рядах Тейлора посредством малых изменений входных параметров. Если точки роста складываются не просто в случайный узор, но формируют структурированную область стабильности, эти точки существуют как организующие центры для особых геометрических структур с низким уровнем катастрофичности, с высоким уровнем катастрофичности в окружающих их областях фазового пространства. Если потенциальная функция зависит от трех или меньшего числа активных переменных и пяти или менее активных параметров, то в этом случае существует всего семь обобщенных структур описанных геометрий бифуркаций и классифицированных Рене Томом (рис. 1).

k	n	Каноническая форма $f(x, a)$	Название
1	1	$x_1^3 - ax_1$	Складка
2	1	$x_1^4 + a_1 \frac{x_1^2}{2} + a_2 x_1$	Сборка
3	1	$\frac{x_1^5}{5} + a_1 \frac{x_1^3}{3} + a_2 \frac{x_1^2}{2} + a_3 x_1$	Ласточкин хвост
4	1	$\frac{x_1^6}{6} + a_4 \frac{x_1^4}{4} + a_1 \frac{x_1^3}{3} + a_2 \frac{x_1^2}{2} + a_3 x_1$	Бабочка
3	2	$x_1^3 + x_2^3 + a_3 x_1 x_2 - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Гиперболическая омбилическая точка
3	2	$x_1^3 - 3x_1 x_2^2 + a_3 (x_1^2 + x_2^2) - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Эллиптическая омбилическая точка
4	2	$x_1^2 x_2 + x_2^4 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2^2 - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Параболическая омбилическая точка
5	1	$x_1^7 + a_1 x_1^5 + a_2 x_1^4 + a_3 x_1^3 + a_4 x_1^2 + a_5 x_1$	Вигвам
5	2	$x_1^2 x_2 - x_2^5 + a_1 x_2^3 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2 + a_5 x_1$	Вторая эллиптическая омбилическая точка
5	2	$x_1^2 x_2 + x_2^5 + a_1 x_2^3 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2 + a_5 x_1$	Вторая гиперболическая омбилическая точка
5	2	$1 \pm (x_1^3 + x_2^4 + a_1 x_1 x_2^2 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1 x_2 + a_4 x_2 + a_5 x_1)$	Символическая омбилическая точка

Рис. 1. Семь элементарных катастроф по классификации Рене Тома

Для решения задач энергетики при наличии одного переменного параметра, например, напряжения, применяется катастрофа типа «ласточкин хвост» (рис. 2), так как именно этот вид полноценно описывает поведение системы в случае изменения контролируемого параметра, в том числе при возникновении «лавины» изменения значения контролируемой величины. Суть данной катастрофы заключается в том, что управляющее пространство в данном типе катастроф является трехмерным. Каскад бифуркаций в фазовом пространстве состоит из трех поверхностей бифуркаций типа «свертка», которые встречаются на двух кривых бифуркаций с точками возврата, которые в конечном итоге встречаются в одной точке, представляющей собой бифуркацию типа «ласточкин хвост». По мере прохождения значений параметров по поверхностям областей бифуркаций типа «свертка» пропадает один минимум и один максимум потенциальной функции. В области бифуркаций с точкой возврата два минимума и один максимум замещаются одним минимумом; за ними бифуркации типа «свертка» исчезают. В точке ласточкиного хвоста два минимума и два максимума встречаются в одном значении переменной x . Для значений $a > 0$ за ласточкиным хвостом существует либо одна пара (минимум, максимум), либо не существует вообще никаких бифуркаций. Это зависит от значений параметров b и c . Две поверхности бифуркаций типа «свертка» и две линии бифуркаций с точками возврата встречаются при $a < 0$, а потому исчезают в самой точке «ласточкиного хвоста», заменяясь одной поверхностью бифуркаций типа «свертка».

Данный тип катастрофы позволяет наиболее точно определить поведение ЭЭС при воздействии внешних возмущений, так как количество учитываемых возмущений оптимально и не усложняет процессы расчета бифуркации. Также возможен учет действия и поведения еще одной величины, в случае ЭЭС, например, частоты.

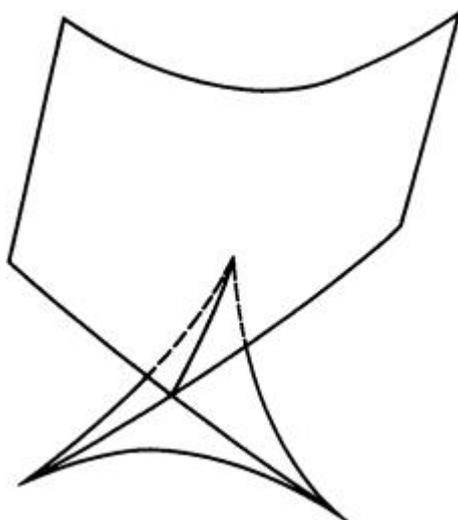


Рис. 2. Бифуркация типа «ласточкин хвост»

Теория катастроф имеет практическое применение в виде различного программного обеспечения. В энергетике основным ПО в данный момент является программно-технический комплекс RTDS (Real-Time Digital Simulator) фирмы RTDS Technologies Inc. (Канада). RTDS – это специализированный комплекс, предназначенный для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе (ЭС) в реальном масштабе времени. Исследования ЭС высокого напряжения переменного и постоянного тока выполняются путем цифрового моделирования процессов с использованием алгоритмов, аналогичных тем, что используются в программах типа EMTP (Electromagnetic Transients Program).

RTDS позволяет решать следующие задачи:

- полный цикл проверки релейной защиты, единой защиты и схем управления;
- полный цикл проверки систем управления для HVDC, SVC, TCSC и синхронных машин;
- разработка устройств FACTS и связанных с ней средств управления;
- изучение работы систем переменного тока, включая режим генерации и передачи электрической энергии;
- исследование взаимодействия оборудования для энергетики;
- изучение взаимодействия между объединенными AC/DC системами;
- обучение и тренировка инженерно-технического персонала объектов электроэнергетики.

Литература

1. Гилмор, Р. Прикладная теория катастроф / Р. Гилмор. – М. : Наука, 1966. – Т. 1. – 540 с.
2. Режим доступа: <https://www.vniir.ru/simcenter/about/>. – Дата доступа: 03.04.2021.

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПИТАЮЩИХ СЕТЕЙ**Н. С. Кончиц***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель О. Г. Широков

Качество электрической энергии (ЭЭ) характеризуется рядом показателей, при которых потребители могут нормально работать. В Республике Беларусь, как и в ряде других стран СНГ, качество электроэнергии нормировано ГОСТ 13109–97.

Традиционный товар можно посмотреть, оценить его качество и цену, выбрать производителя и т. д. В отношении электрической энергии должно быть аналогично. Тенденции к такому подходу заложены в разработанной недавно Концепции проекта Закона Республики Беларусь об электроэнергетике. Он предусматривает формирование оптового и розничного электроэнергетических рынков в целях конкуренции субъектов электроэнергетики. В них входят производители ЭЭ и энергоснабжающие организации. Постановлением Совета министров от 17.10.2011 г. № 1394 приняты Правила электрообеспечения, в которых электрическая энергия определена как товар. Также упорядочены отношения между энергоснабжающей организацией и потребителем электроэнергии.

Сейчас можно сказать, что вопросам ее качества у нас в стране должного внимания не уделяется, даже несмотря на высокую значимость электроэнергии. Сложность и актуальность вопроса обусловлена тем, что проблема напрямую затрагивает взаимоотношения потребителя и продавца электроэнергии. Причем, если при покупке товара претензии к его качеству может предъявить покупатель, то в нашем случае все может быть и наоборот. Виновником плохого качества электроэнергии может оказаться и потребитель. Правила электрообеспечения устанавливают порядок взаимоотношений между потребителем и энергоснабжающей организацией. В том числе по таким вопросам, как условия снабжения и пользования электрической энергией.

В Правилах она имеет статус товара соответствующего качества, которое определяют показатели качества электроэнергии (ПКЭ). Они отражают соответствие ее параметров требованиям, установленным действующими ТНПА. ГОСТ 13109–97 «...Нормы качества электрической энергии в системах электрообеспечения» устанавливает 11 основных нормируемых ПКЭ. Несоответствие каждого из которых требованиям стандарта по-своему сказывается на работе электроустановок разного типа:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения;
- доза фликера;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения;
- несимметрия напряжений по обратной последовательности;
- несимметрия напряжений по нулевой последовательности;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- импульсное напряжение;
- коэффициент временного перенапряжения.

Из-за отсутствия внимания к проблеме качества электрической энергии (КЭ) несоответствие показателей ее качества требованиям ТНПА стало типичным и распространенным фактом. Многие сталкивались с проблемой преждевременного выхода из строя знакомым всем бытовых электроприемников.

Для обеспечения непрерывного и энергоэффективного управления технологическими процессами, в которых используются электродвигатели, применяется частотно-регулируемый привод (ЧРП), основным звеном которого помимо двигателя является преобразователь частоты (ПЧ или просто «частотник»).

В связи с развитием микропроцессорной техники и электроники современные частотные преобразователи обладают следующими преимуществами:

- обеспечение КПД установки до 99 %;
- наличие комплексного набора защит регулируемого электропривода;
- возможность использования для множества технологических применений;
- ограничение пусковых токов в пределах $1,2 \cdot I_n$ при запуске двигателя;
- плавное регулирование скорости вращения двигателя в широком диапазоне частот;
- возможность рекуперации энергии в питающую сеть для повышения энергоэффективности с помощью рекуператора;
- наличие необходимых протоколов связи для обеспечения автоматизации и диспетчеризации в общей системе управления АСУ ТП.

Преобразователи частоты являются довольно универсальным приводным устройством, предусмотренным для работы в различных областях промышленности и производства. Но для каждого применения необходимо учитывать технологические особенности функционирования оборудования, которым будет управлять частотник, для оптимального использования имеющегося у преобразователя набора характеристик. Также это напрямую будет влиять на эффективность и бесперебойность работы самого частотника и электроприводного комплекса в целом.

Для понимания особенностей функционирования преобразователя частоты подробнее рассмотрим его устройство.

Частотный преобразователь Danfoss VLT Micro Drive FC-051 – универсальный компактный общепромышленный привод, имеет векторную и скалярную системы управления двигателем. Преобразователь превосходно подходит даже для комплексной автоматизации, повышает энергоэффективность и производительность систем. Привод обладает высокой функциональностью, надежностью, удобством для пользователя. Для оптимизации энергоэффективности и функционирования можно настроить около 100 параметров.

Основные функциональные возможности частотного преобразователя Danfoss VLT Micro Drive:

- повышенная прочность и устойчивость к внешним воздействиям;
- многоцелевой привод;
- встроенный ПИД-регулятор;
- встроенный интерфейс RS-485 FC-Protocol, Modbus RTU;
- векторное управление, управление по вольт-частотной характеристике U/F ;
- автоматическая оптимизация энергопотребления (АЕО);
- автоматическая адаптация к двигателю;
- встроенный программируемый логический контроллер;
- 150 % – перегрузка в течение 1 мин;
- электронное тепловое реле;
- встроенный фильтр ВЧ помех;
- возможность снятия и установки панели управления во время работы, функция копирования.

Наиболее широкое применение в современных частотно регулируемых модулях находят преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока. В преобра-

зователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе, фильтруется фильтром, сглаживается, а затем вновь преобразуется инвертором в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды. Двойное преобразование энергии приводит к снижению КПД и к некоторому ухудшению массогабаритных показателей по отношению к преобразователям с непосредственной связью.

В качестве одного из объектов частотно-управляемого привода, где применение ПЧ качественно повышает эффективность всего технологического процесса, можно привести в пример подъемные механизмы, в частности, лифтовое оборудование. Учитывая тяжелые условия эксплуатации подобного оборудования, повторно-кратковременные режимы при частых включениях/отключениях, установка частотно-регулируемого привода является эффективной возможностью увеличения технологичности и оптимизации подъемных процессов, позволяя:

- существенно снизить энергопотребление привода (в среднем, частотный электропривод для управления лифтовым оборудованием экономит до 40 % электроэнергии (по сравнению с применениями без ПЧ). Тем самым значительно уменьшаются затраты на энергоресурсы и есть возможность в минимальные сроки окупить средства, которые были вложены в модернизацию.

- осуществлять плавный запуск, разгон и остановку лифтовых механизмов, обеспечивая необходимое значение крутящего момента двигателя на небольшой частоте вращения и режим «противоотката» кабины лифта. Это позволит увеличить срок службы электродвигателей и механических частей механизма, уменьшить затраты на техническое обслуживание приводного комплекса, гарантировать оптимальный рабочий режим лифта;

- выполнить сброс излишней энергии при остановке приводного механизма. Это осуществляется при помощи подключаемых к частотнику тормозных резисторов, либо посредством рекуператоров энергии для максимально эффективного управления частотным приводом (в этом случае излишняя энергия будет возвращаться обратно в питающую сеть).

Исходя из подобных применений, при внедрении преобразователей в лифтовых системах окупаемость частотного регулируемого привода не превышает двух лет. При этом сокращаются затраты на обслуживание и ремонт лифтового электропривода.

Применение преобразователей частоты при управлении электроприводами позволяет напрямую подстраивать регулируемые производственные характеристики (температуру, давление, скорость движения рабочих механизмов) под различные нужды с сохранением высокого КПД, обеспечивая при этом существенное снижение энергопотребления. Поэтому внедрение частотно-регулируемого привода позволяет решать задачи не только в области автоматизации процесса производства, но и в сфере энергосбережения.

Осуществляя на практике подбор частотного регулируемого привода, необходимо оценить требования, которые предъявляются к объекту управления: это диапазон и точность регулирования, необходимость удержания определенного момента на валу двигателя (в частности, при небольших частотах вращения) и требования к работе электропривода в аварийных ситуациях.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ НОЧНОГО МИНИМУМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КОТЕЛЬНОЙ «ЮЖНАЯ» С УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОКОТЛОВ

А. В. Соболенко

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

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

В связи со строительством Белорусской АЭС перед энергетиками страны встает множество дополнительных задач, требующих быстрого и в тоже время надежного, качественного и экономичного решения. Так, только для выдачи мощности с атомной электростанции в стране строится 1032,5 км и реконструируется 672,5 км высоковольтных воздушных линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 330 кВ. Для сравнения: всего в энергосистеме Беларуси эксплуатируются 4673 км ЛЭП такого напряжения. Одним из самых сложных вопросов, который предстоит решить энергетикам, становится режимная интеграция Белорусской АЭС в баланс Белорусской энергосистемы. В настоящее время суточный график нагрузки (рис. 1.) имеет ярко выраженные дневные пики и ночной провал. Разница между данными режимами достигает более 1 ГВт, т. е. более 20 % от максимальной мощности электропотребления в стране [1].



Рис. 1. Суточный график нагрузки энергосистемы Республики Беларусь

Энергосистема работает круглосуточно: днем — напряженно, а ночью — не менее напряженно, особенно зимой. Особенность заключается в том, что существующие электростанции Беларуси полностью покрывают потребность потребителей Республики Беларусь в электрической и тепловой энергии. Поэтому, если ничего не менять, а просто включить АЭС в работу, то получим график нагрузки, представленный на рис. 2.

Из анализа графика видно, что если просто включить АЭС (только один энергоблок в 1200 МВт) в энергосистему, то в ночные часы ее электроэнергия никому не нужна, так как нет нагрузки, а днем она востребована. Поскольку мы не можем взять

и остановить в ночной минимум атомную электростанцию, необходимо обеспечить потребление этой электроэнергии [2]. Таким образом, в настоящее время (до ввода АЭС) должны быть приняты меры по сглаживанию ночных провалов суточного графика нагрузки.

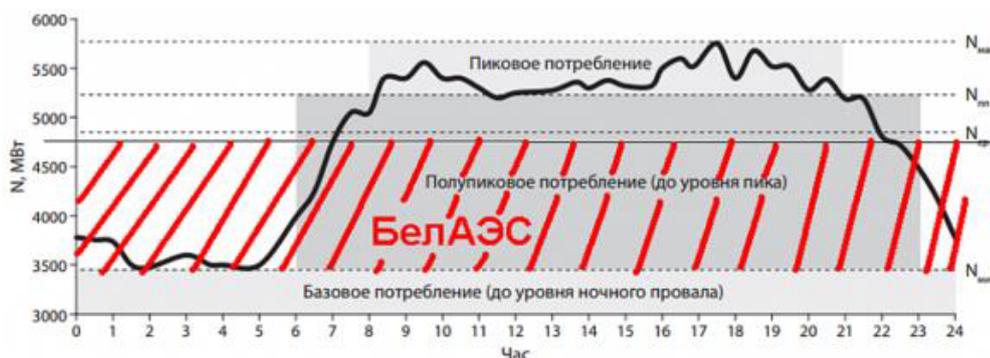


Рис. 2. Суточный график нагрузки энергосистемы Республики Беларусь с вводом БелАЭС

Одним из основных направлений эффективного использования электроэнергии в Республике в период после ввода АЭС должно стать внедрение электродкотлов, что будет способствовать надежному и безопасному функционированию Белорусской энергосистемы.

В связи с этим на котельной «Южная» Гомельских тепловых сетей (ГТС) произведена модернизация электрической части с установкой электродкотлов.

Учитывая неопределенность в покрытии перспективных тепловых нагрузок с вводом новых энергетических мощностей (ПГУ на ТЭЦ-1 и электродкотлов на ТЭЦ-2) и принимая во внимание полную обеспеченность электродкотлов тепловыми нагрузками, выбираем среднюю тепловую нагрузку в межтопительный период, равную 4 Гкал/ч, соответствующую той зоне охвата котельной, которую она покрывала до перехода ее на баланс ГТС.

Мощность электродкотлов определяется из условия, что за 7 ч работы электродкотла должна быть обеспечена выработка тепловой энергии для теплоснабжения потребителей с использованием аккумулятора теплоты на полные сутки (24 ч) по следующей зависимости:

$$N_9 = \frac{q \cdot 24}{7 \cdot 0,86} = 4q,$$

где q – среднечасовая нагрузка в межтопительный период, Гкал/ч; 0,86 – переводной коэффициент.

С учетом названных условий расчетная минимальная мощность электродкотла на котельной «Южная» составит: $4 \cdot 4 = 16$ МВт или 13,76 Гкал/ч.

Максимальное суточное количество теплоты, вырабатываемое электродкотлом, составит: $13,76 \cdot 7 = 96,32$ Гкал.

Исходя из расчетов, принимаем к установке два электродкотла КЭВ-10000/10 и КЭВ-6000/10 мощностью 10 МВт и 6 МВт соответственно.

Работа электродкотлов предусматривается во время ночного провала электропотребления с 23:00 до 6:00 [3]. Избыточная тепловая энергия в ночное время будет

накапливаться в баках-аккумуляторах, а в дневное время будет осуществляться ее отпуск, достаточный для покрытия нужд горячего водоснабжения (ГВС) в летнее время. В отопительный сезон за счет работы электродкотлов на баки-аккумуляторы, снижается нагрузка с газовых котлов, тем самым уменьшается потребление газа в течение дня, который закупается в Российской Федерации, покрывая нужды ГВС и отопления.

В результате такой работы котельной «Южная» получаем суточный график нагрузки (рис 3.).

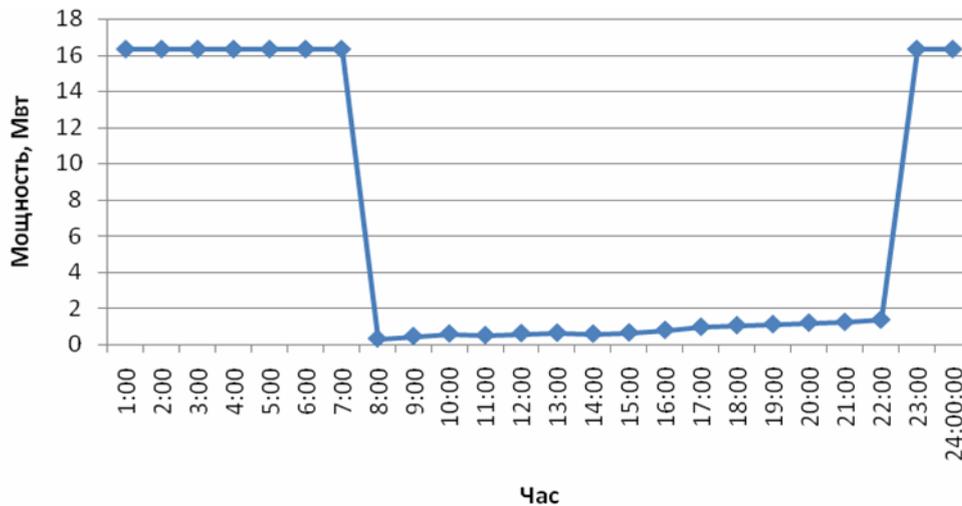


Рис. 3. Суточный график нагрузки котельной «Южная»

Из анализа графика видно, что во время ночного минимума за счет работы электродкотлов увеличивается энергопотребление котельной в то время, когда общее энергопотребление в Республике Беларусь уменьшается (рис. 1).

Совмещение графиков нагрузки, представленных на рис. 1 и 3, при условии, что на других котельных произойдет модернизация с заменой газовых котлов на электродкотлы необходимой мощности, позволяет получить следующий прогнозируемый график суточного электропотребления (рис. 4.).

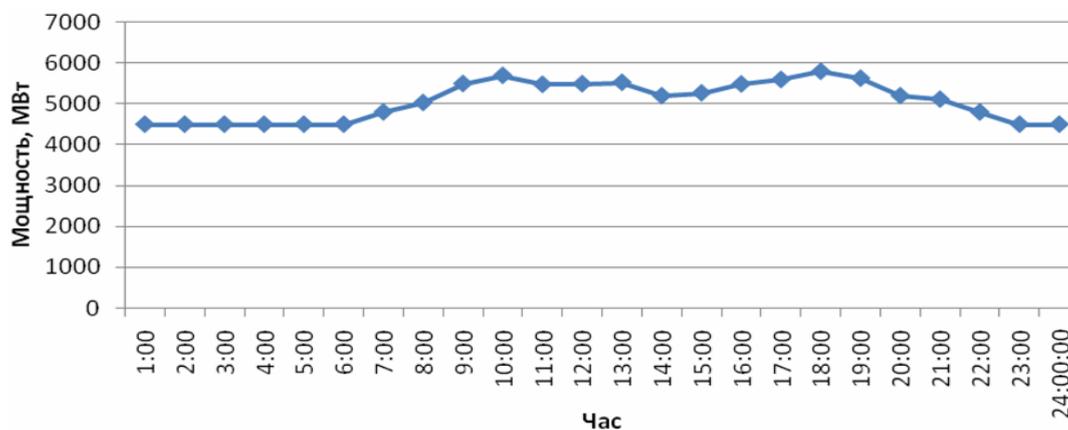


Рис. 4. Прогнозируемый суточный график нагрузок энергосистемы Республики Беларусь

Таким образом, исходя из анализа прогнозируемого суточного графика нагрузок энергосистемы Республики Беларусь, следует, что установка электродуховых котлов позволит повысить безопасность прохождения ночного минимума и обеспечить выравнивание графика электрической нагрузки энергосистемы.

Литература

1. Шевалдин, М. А. Перспективы развития электротранспорта в Беларуси // Энергет. стратегия. – 2016. – № 3 (51). – С. 23–24.
2. Как повлияет ввод БелАЭС на энергосистему Беларуси // Новостной портал TUT.BY. – Режим доступа: <https://news-tut-by.turbopages.org/news.tut.by/s/society/367045.html>. – Дата доступа: 20.02.2021.
3. Романцевич, Е. Установлены два электродуховых котла на РК «Рогачевская» / Е. Романцевич // Энергетика – 2021. – № 1 (452). – С. 2.

ВЛИЯНИЕ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Е. В. Натарин

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

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

Сварка плавлением, в особенности электродуговая сварка, является основным технологическим процессом сварочного производства. На многих предприятиях широко применяются установки дуговой и контактной сварки с инверторными и выпрямительными источниками питания. Сварочные выпрямители питаются в основном от сетей 0,38 кВ. Мощность сварочных машин автоматической сварки однофазным током промышленной частоты достигает 1,5 МВА, сварки трехфазной дугой – нескольких мегавольтампер. В некоторых цехах машиностроительных предприятий удельный вес сварочных машин в нагрузке может достигать 80 % [1].

Для установок электродуговой сварки в качестве источника питания используются полупроводниковые выпрямители. Токи высших гармоник, генерируемые сварочными выпрямителями, различны для отдельных режимов работы сварочных установок.

В зависимости от нагрузки выпрямитель может работать в одном из трех режимов: в режиме прерывистых токов при малых нагрузках, которому соответствует двухвентильная коммутация *A*; в режиме средних нагрузок *B*; в режиме трехвентильной коммутации при больших нагрузках *C*. Режим *A* практического значения не имеет. В режиме *B* уровни 5-й и 7-й гармоник тока оказываются весьма нестабильными. Уровень высших гармоник тока в режиме *C* значительно ниже, чем в режиме *B*.

По своему воздействию на несинусоидальность питающей сети сварочные нагрузки можно разделить на две категории: установки дуговой и контактной электросварки переменного тока и постоянного тока. Установки дуговой электросварки переменного тока воздействуют на питающую сеть аналогично дуговым сталеплавильным печам. Включение сварочных машин контактной электросварки производится с помощью игнитронных или тиристорных ключей, которые для плавного регулирования сварочного тока снабжаются системами фазового регулирования угла зажигания, что приводит к искажению тока высшими гармониками, уровень которых аналогичен уровню гармоник для дуговой сварки переменного тока.

В общем случае для единичной установки электросварки переменного тока токи гармоник (рекомендуется учитывать только третью и пятую гармоники) равны:

$$I_v = S_{\text{НОМ.Т}} \cdot \beta_{\text{СВ}} \frac{\sqrt{\text{ПВ}}}{v^2 \cdot U_{\text{НОМ}}},$$

где $S_{\text{НОМ.Т}}$ – номинальная мощность трансформатора; $\beta_{\text{СВ}}$ – коэффициент загрузки; ПВ – продолжительность включения.

Определение токов гармоник, генерируемых установками дуговой электросварки постоянного тока, аналогично определению гармоник для вентильных преобразователей. Токи гармоник (рекомендуется учитывать только 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю гармоники) единичной установки дуговой электросварки постоянного тока определяются по формуле [2]:

$$I_v = \frac{I_{\text{СВ}}}{v},$$

где $I_{\text{СВ}}$ – номинальный первичный ток установки.

В последнее десятилетие все промышленно развитые страны стали уделять особое внимание энергосберегающим технологиям и качеству электроэнергии электрических сетей. Вызвано это тем, что в начале 90-х гг. они столкнулись с проблемой постоянного ухудшения качества электроэнергии питающих сетей, заключающейся в искажении синусоидальной формы напряжения и тока. Это незамедлительно привело к повышению потерь и понижению надежности эксплуатации электрооборудования. Такое явление вызвано увеличением количества оборудования с нелинейными трехфазными и однофазными нагрузками, которые генерируют в электрическую сеть высшие гармоники тока. Нормально допустимые и предельно допустимые значения отклонений показателей качества электроэнергии определяются ГОСТ 32144–2013 [3].

Однофазные импульсные источники питания с бестрансформаторным входом, выпрямители, инверторы, частотно-управляемые электроприводы, компьютерные системы, телекоммуникационная и офисная аппаратура, энергосберегающие лампы и другие однофазные нелинейные нагрузки из-за своей массовости привели к увеличению коэффициента нелинейных искажений (гармоник) тока THDi (Total Harmonic Current Distortion) до 90–140 %, особенно за счет генерации в сеть 3-й и кратных ей гармоник тока до 80 % (токи нулевой последовательности). Высшие гармоники тока увеличивают коэффициент нелинейных искажений напряжения THDU (Total Harmonic Voltage Distortion) сетей, доводя его до 7 % и выше.

Нелинейные нагрузки ухудшают электромагнитную совместимость, что приводит к ненадежной работе электрического и электронного оборудования, ускоренному старению изоляции, коррозии элементов заземлений, перегреву роторов и износу подшипников электродвигателей.

Приемлемые значения коэффициента THDU ограничены 3 % для индивидуальных нелинейных нагрузок. Допустимое значение определено в 5 % для совокупных нагрузок сети. Отечественные нормативные документы допускают значение THDU до 8 %, при котором уже существенно искажается синусоидальное напряжения сети.

Значение коэффициента нелинейных искажений тока THDi при работе однофазных сварочных источников питания находится в диапазоне 8,7–121,5, а напряжения THDU – 2,2–6,7 %, что свидетельствует о плохой электромагнитной совмести-

мости большинства однофазных сварочных источников питания. Особенно опасна генерация 3-й и кратных ей гармоник тока.

Коэффициент, учитывающий увеличение добавочных потерь от вихревых токов в оборудовании и сетях, К-фактор равен 1,38–7,3 %, что не позволяет отнести все однофазные сварочные источники питания к категории энергосберегающих.

Наиболее широкий спектр высших гармоник тока генерируют однофазные сварочные инверторы, которые более всего искажают синусоидальную форму тока и напряжения сети, что требует обязательного применения фильтров высших гармоник тока.

Однофазные сварочные источники питания, в которых применяется электрическая дуга, являющаяся нелинейной нагрузкой, сварочные выпрямители и инверторы – генераторы высших гармоник (ВГ) тока. В связи с этим актуально уменьшение уровня гармоник тока при работе сварочного оборудования [4].

Инверторные источники питания сварочной дуги обладают малыми габаритами и массой, обеспечивают высокое качество сварных соединений, позволяют формировать необходимую вольт-амперную характеристику, потребляют небольшую мощность, имеют возможность дистанционного управления; в конструкции аппаратов применяется двойная изоляция, обеспечивающая электробезопасность. Однако эти аппараты остаются по-прежнему достаточно дорогими, ненадежными в эксплуатации и требуют наличия сервисных центров с высококвалифицированным персоналом.

В [4] было проведено исследование инверторного источника питания ВДИ-L-200, предназначенного для ручной дуговой сварки низкоуглеродистых сталей и цветных металлов любыми видами электродов. ВДИ-L-200 питается от однофазной сети переменного тока частотой 50 Гц.

Для инверторного источника питания ВДИ-L-200 была получена диаграмма гармонического состава тока и напряжения, приведенная на рис. 1.

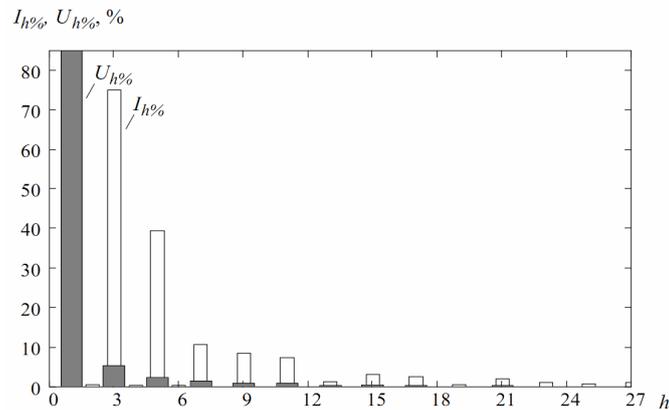


Рис. 1. Гармонический состав тока и напряжения однофазного инверторного источника питания ВДИ-L-200

Из анализа рис. 1 следует вывод, что в питающей сети источника выражены практически все нечетные гармоники тока, в частности, 3-я гармоника тока, составляющая 75,1 % от 1-й гармоники, 5-я – 39,5 %, 7-я – 10,5 %, 9-я – 8,3 %, 11-я – 7,4 %. Нечетные гармоники напряжения, превосходящие 1 %: 3-я – 5,2 %, 5-я – 2,2 %, 7-я – 1,4 %. Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения данного источника питания равны: $THDi = 86,4\%$, $THDU = 5,9\%$.

Несмотря на все свои преимущества, сварочные инверторы генерируют в сеть наиболее широкий спектр гармонических составляющих тока и существенно искажают синусоидальную кривую тока и напряжения. Также они создают радиопомехи. Это свидетельствует об их плохой электромагнитной совместимости.

Отрицательным влиянием однофазных сварочных источников питания для сетей в отличие от трехфазных источников является то, что они значительно загружают нулевой провод высшими гармониками тока нулевой последовательности, не предназначенный для больших нагрузок.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что проблема высших гармоник, генерируемых сварочным оборудованием, весьма актуальна, так как на предприятиях Гомельской области присутствуют цеха с долей сварочной нагрузки более 50 %, которые могут вносить существенный вклад в искажение кривой напряжения и тока, а также влиять на электромагнитную совместимость в целом.

Для улучшения качества электроэнергии и снижения уровня генерируемых сварочным оборудованием высших гармоник тока и напряжения целесообразно, а в ряде случаев необходимо применение фильтров высших гармоник тока. При этом сварочные источники питания помимо обеспечения ими необходимых технологических показателей будут иметь хорошую электромагнитную совместимость, снижать добавочные потери в проводах сети и подключенном к сети оборудовании.

Литература

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат. 2000. – 331 с.
2. Источники гармонических составляющих. – Режим доступа <http://esis-kgu.ru/ems/360-ems>. – Дата доступа: 10.04.2021.
3. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160–2010, NEQ). – М. : Стандартинформ, 2014.
4. Электромагнитная совместимость источников питания сварочной дуги / И. В. Пентегов [и др.] // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 34–40.

ВЫБОР ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ 6 И 10 кВ ПОДСТАНЦИИ «ЦЕНТРОЛИТ» В СВЯЗИ С РЕКОНСТРУКЦИЕЙ

П. К. Шитиков

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

Научный руководитель П. В. Лычѐв

При реконструкции подстанции (ПС) кроме существующих секций 6 кВ появятся новые секции 10 кВ, которые будут постепенно нагружаться в процессе перевода части действующих потребителей на напряжение 10 кВ и подключения новых потребителей. На ПС после реконструкции будет установлено 2 силовых трехобмоточных трансформатора ТДТН-25000/110/10/6 с РПН в нейтрали ВН с возможностью регулирования напряжения $\pm 9 \cdot 1,78 \%$. Также на стороне 10 кВ будут установлены регулировочные трансформаторы ТМНЛ – 16000/10, выполняющие продольное регулирование напряжения, с возможностью регулирования напряжения $\pm 10 \cdot 1,5 \%$. Установка нескольких средств регулирования напряжения позволит обеспечить независимое регулирование напряжения на шинах 6 и 10 кВ, что важно, когда шины 10 кВ загружены слабо по отношению к шинам 6 кВ.

Расчетная схема характерных отходящих линий 6 и 10 кВ одного из трансформаторов представлена на рис. 1.

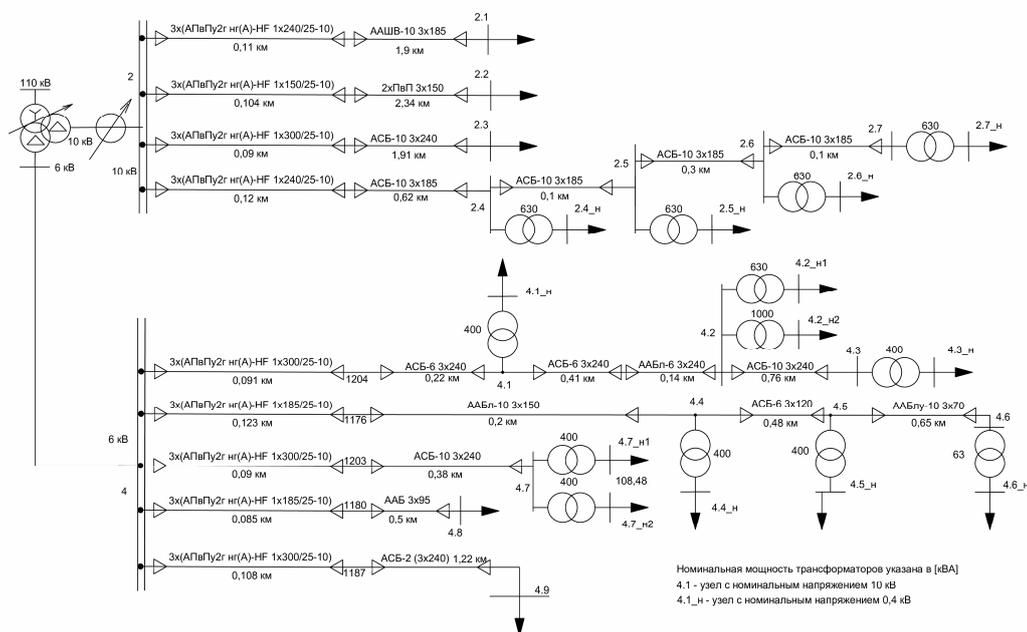


Рис. 1. Расчетная схема характерных отходящих линий 6–10 кВ

Ожидаемое изменение нагрузок шин 6 и 10 кВ до 2030 г. рассматриваемой ПС показано на рис. 2.

Для регулирования напряжения на шинах 6 и 10 кВ выбран принцип встречного регулирования в связи с тем, что нагрузка на ПС в течение суток изменяется случайным образом. Сущность данного принципа заключается в том, что с увеличением нагрузки для компенсации возникающих при этом дополнительных потерь напряжения в линиях напряжение на ПС повышают, а при уменьшении нагрузки – снижают [1].

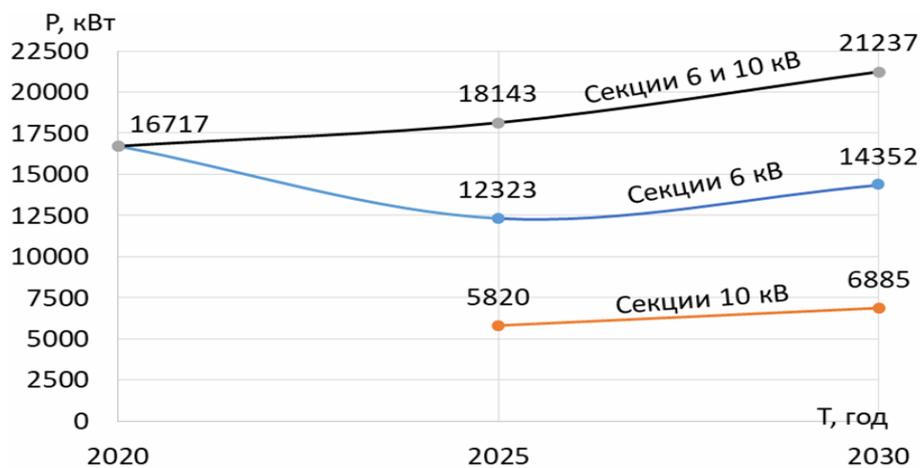


Рис. 2. Ожидаемое изменение нагрузок шин 6–10 кВ ПС до 2030 г.

Характеристика встречного регулирования напряжения принята такой, при которой напряжение на шинах 6 и 10 кВ ПС $U_{\text{ПС}}$:

$$U_{\text{ПС}} = U_{\text{ном}} + \Delta U_{\text{макс}},$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети; $\Delta U_{\text{макс}}$ – наибольшие потери напряжения до потребителя на рассматриваемой секции.

Характеристики регулирования напряжения построены с учетом зоны нечувствительности РПН [2]:

$$\delta U_{\text{нч}} = \frac{n \delta U_{\text{ст}}}{2} = 1,3 \cdot \frac{1,78}{2} = 1,157 \%,$$

где $\delta U_{\text{ст}}$ — степень регулирования на обмотке трансформатора; n – коэффициент чувствительности регулятора.

Для построения характеристик регулирования напряжения использован метод характеристического узла. Данный метод основан на минимизации ущерба, наносимого потребителю отклонением напряжения от номинального значения. Напряжение на понижающей подстанции регулируется таким образом, чтобы обеспечить наибольшее число потребителей сети (в смысле наибольшей потребляемой энергии) напряжением, близким к номинальному. С этой целью строится специальная модель эквивалентного сопротивления сети (рис. 3), за которым в узле регулируется напряжение по специально полученному закону [2].

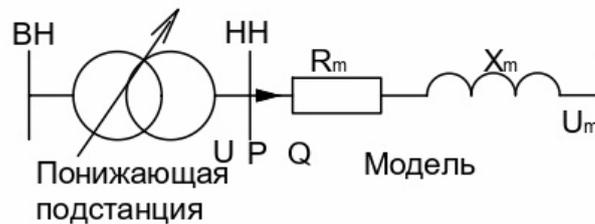


Рис. 3. Модель полного сопротивления

Регулирование напряжения заключается в поддержании на шинах ПС напряжения [2]:

$$U = U_{\text{ном}} + U_{\text{ном}} V_0 + \frac{PR_m + QX_m}{U_{\text{ном}}},$$

где R_m , X_m – активное и реактивное сопротивления модели; $V_0 = U_0 / U_{\text{ном}}$, где U_0 – параметр для настройки системы регулирования.

Сопротивления модели определяются по следующим выражениям:

$$R_m = U_{\text{ном}}^2 \frac{\sigma_{\Delta V} r_{P\Delta V} - r_{PQ} r_{Q\Delta V}}{\sigma_P (1 - r_{PQ}^2)};$$

$$X_m = U_{\text{НОМ}}^2 \frac{\sigma_{\Delta V} r_{Q\Delta V} - r_{PQ} r_{P\Delta V}}{\sigma_Q (1 - r_{PQ}^2)},$$

где $\sigma_{\Delta V}$, σ_P , σ_Q – среднеквадратические отклонения соответствующих величин; $r_{P\Delta V}$, $r_{Q\Delta V}$, r_{PQ} – коэффициенты корреляции.

Характеристика регулирования напряжения для шин 6 и 10 кВ, построенных по методу характеристического узла, представлена на рис. 4.

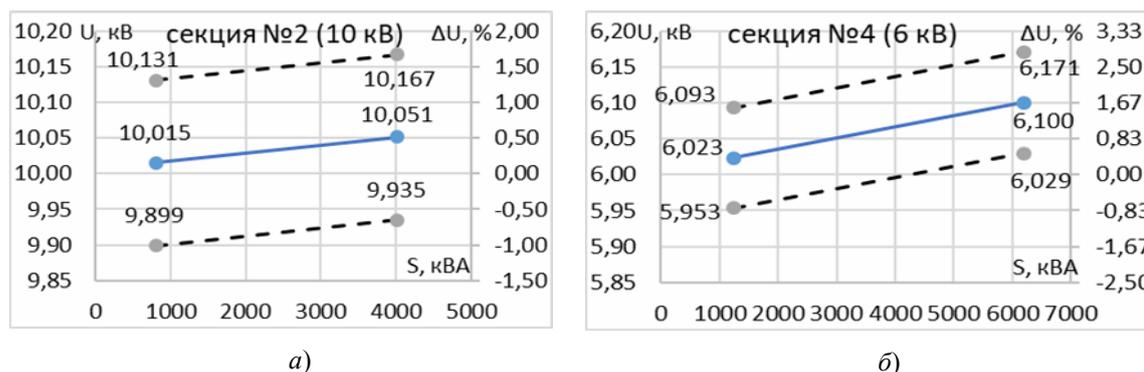


Рис. 4. Характеристика регулирования напряжения для секции № 2 (а) и секции № 4 (б), построенных по методу характеристического узла

Произведены расчеты режима наибольших нагрузок с учетом выбранных ответвлений, результаты которых приведены на рис. 5.

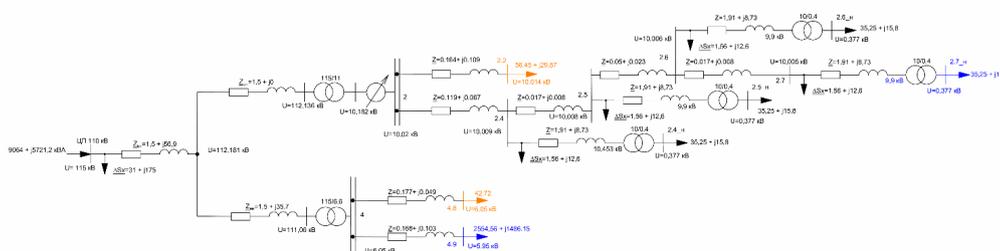


Рис. 5. Результаты расчета режима наибольших нагрузок отходящих линий секций № 2 и № 4 при $U_{\text{ВН}} = 115$ кВ, ответвлении РПН в ЦП – +3 %, ЛР – 1 % и ПБВ во всех ТП – +5 %

Результаты расчетов показывают, что значения напряжений в узлах находятся в пределах, допустимых в соответствии с [3].

Литература

1. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – 3-е изд., перераб. – М. : КНОРУС, 2012. – 648 с.
2. Лыкин, А. В. Электроэнергетические системы и сети : учеб. для вузов / А. В. Лыкин. – М. : Юрайт, 2018. – 360 с.
3. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2015. – 16 с.

Научное издание

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

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

Гомель, 22–23 апреля 2021 года

**В двух частях
Часть 1**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редакторы: *Н. В. Гладкова, Т. Н. Мисюрова*

Компьютерная верстка: *Н. Б. Козловская, И. П. Минина*

Подписано в печать 21.09.21.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 34,41. Уч.-изд. л. 27,36.

Тираж 50 экз. Заказ № 474/23.

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.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель