

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

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

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

**Гомель, 27–28 апреля 2023 года**

**В двух частях**  
**Часть 1**

**Гомель 2023**

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

И88

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

канд. техн. наук *Е. Н. Макеева*

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

канд. техн. наук, доц. *В. В. Брель*

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

канд. техн. наук, доц. *В. С. Захарено*

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

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

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

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

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

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

**Исследования** и разработки в области машиностроения, энергетики  
И88 и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 г. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – 305 с.

ISBN 978-985-535-545-9.

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

Для студентов, аспирантов и молодых ученых.

УДК 621.01+621.3+33+004(042.3)

ББК 30+65

ISBN 978-985-535-545-9 (ч. 1)

ISBN 978-985-535-544-2

© Оформление. Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Зализный Д. И.</i> Принципы работы современных электронных измерительных приборов для задач энергетики.....	8
<i>Рачкова И. В.</i> Развитие видов экономической деятельности перспективной специализации экономики Гомельской области .....	12

## Секция I. МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Роговенко Д. А., Лепший А. П.</i> Анализ схем и способов интенсификации процесса магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей .....	20
<i>Марченко А. Е., Пракапович В. А., Кириленко В. П.</i> Методика проведения триботехнических исследований торцовых уплотнений, работающих в воде .....	23
<i>Железнякова Ю. И., Стасенко Д. Л.</i> Исследование влияния конструктивных параметров гидроаппаратов золотникового типа на динамические показатели их работы.....	26
<i>Хазеев Е. В., Стасенко Д. Л.</i> Разработка гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке с улучшенными характеристиками энергоэффективности .....	29
<i>Колодко А. С., Андреевец Ю. А.</i> Имитационное моделирование гидропривода намоточного устройства по производству полиэфирных нитей в программе Amesim .....	32
<i>Бочаров Н. В., Авиновская Т. В., Матвеев Д. С., Ткачев В. М.</i> К вопросу применения агрегатора цифрового бурения для оценки эффективности строительства скважин (на примере скважин месторождений Припятского прогиба).....	35
<i>Янковец М. А., Стасенко Д. Л.</i> Преимущества систем с адаптацией к нагрузке по сравнению с гидросистемами дроссельного регулирования.....	38
<i>Ляховская М. В., Лавриненко А. В., Хомин И. П.</i> Экспортоориентированность ОАО «Минский автомобильный завод» и ОАО «Минский тракторный завод».....	42
<i>Галайдо Д. А., Силивончик А. В., Хомин И. П.</i> Проблемы и перспективы развития машиностроительной отрасли в Республике Беларусь.....	45
<i>Деценя А. Д., Андреевец Ю. А.</i> Анализ конструктивных требований при разработке схемотехнического решения гидропривода рабочих органов автоматической линии холодного профилирования.....	47
<i>Станкевич Д. Н., Юркевич В. С., Кульгейко Г. С.</i> Анализ автоматических смазочных систем технологического оборудования .....	51
<i>Миранович Ю. В., Чирков А. В., Тюрин С. А.</i> Безопасность технических объектов и ее оценка.....	54
<i>Селиверстов Н. С., Кудренко Д. Г., Попов В. Б.</i> Математическое моделирование механизма подъема косилки-плющилки КС-200 .....	57
<i>Юркевич В. С., Андреевец Ю. А.</i> Анализ влияния отрицательных температур на потерю давления в объемном гидроприводе .....	60
<i>Любинский К. А., Гулич А. Ю., Голубович А. И., Исаев А. В.</i> Узел контроля кодового доступа к турникету с голосовыми сообщениями.....	63
<i>Гулич А. Ю., Любинский К. А., Голубович А. И., Исаев А. В.</i> Узел записи и воспроизведения сигналов оповещения речевого оповещателя с радиоканальным управлением .....	65

<i>Процко В. Ю., Стасенко Д. Л.</i> Особенности высокоскоростного газопламенного напыления поверхности.....	66
<i>Процко В. Ю., Стасенко Д. Л.</i> Определение толщины пленки покрытия единичной капли при газотермическом напылении на поверхность .....	69
<i>Голубчикова Е. М., Кульгейко Г. С.</i> Зависимость объемного КПД шестеренного насоса от точности изготовления деталей, образующих рабочую камеру .....	73
<i>Пинчук С. А., Старовойтов Н. А.</i> Автоматизированное написание управляющих программ для фрезерных станков с числовым программным управлением с помощью САМ Mill-приложения к КОМПАС-3Dv19.....	76
<i>Shuai Wang, Chao Zhang.</i> Bearing Remaining Useful Life Prediction Based on NAP-HSMM .....	79
<i>Qu Z. Y., Guo X. F., Yuan B.</i> Low Cyclic Fatigue of HG70-steel Mining Dump Truck Frame Under Low-Temperature: Chaboche Model and Finite Element Analysis.....	83

---

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

---

<i>Давыдова О. В., Дробышевская Н. Е., Харков М. Н., Подденежный Е. Н.</i> Термохимический синтез и свойства оксида иттрия, активированного европием и висмутом .....	86
<i>Кузнецова Е. В., Овчинников Е. В.</i> Технологические аспекты формирования нанодисперсных алмазов детонационного синтеза .....	89
<i>Попкова Ю. И., Григорьев А. Я.</i> Влияние химического состава и микроструктуры стали на коррозионную стойкость насосно-компрессорных труб в условиях углекислотной коррозии .....	92
<i>Демиденко Н. Е., Васильевич В. В.</i> Золь-гель покрытия. Синтез и свойства .....	96
<i>Демиденко Н. Е., Петлицкий А. Н.</i> Распределение элементного и фазового состава по толщине токопроводящих пленок на основе дисилицида титана .....	99
<i>Соловьева В. А., Прусенко И. Н.</i> Исследование влияния низкоогнеупорных примесей в кварцевых песках на эксплуатационные свойства литейных стержней.....	102
<i>Marwan F. S. H. Al-Kamali, Kovaleva O. A., Lushpa N. V., Vrublevsky I. A.</i> Recognition and Analysis of Microstructure Parameters of Porous Anodic Films Using Imagej .....	105
<i>Малашков Н. Г., Бобрышева С. Н.</i> Бытовые полимеры: польза и вред .....	107
<i>Клочко У. В., Шаповалов П. С.</i> Зависимость температуры вещества от вида лазерных пучков .....	110
<i>Кашиперов А. А., Кадолич Ж. В.</i> Создание моделей краткосрочного прогнозирования (на примере элементов конструкции для транспедикулярной фиксации позвоночника).....	112
<i>Каготько А. Р., Демиденко Е. Н.</i> Плазменное напыление цветных металлов .....	116
<i>Соколовская Л. А., Астапенко И. В.</i> Исследование изменения микроструктуры концов раскатов по дистанции прокатки в линии катанки стана 370/150.....	118
<i>Полетаев В. М., Астапенко И. В.</i> Исследование параметров процесса трехниточной резки арматуры № 16 для условий конца прокатки на стане 320 .....	121
<i>Кучков А. А., Слепнев Г. А., Астапенко И. В.</i> Оптимизация химического состава и режима двухстадийного охлаждения при освоении производства арматуры № 6 класса А500 .....	125
<i>Слепнев Г. А., Астапенко И. В.</i> Исследование технологических особенностей двухстадийного охлаждения в линии катанки стана 370/150.....	129
<i>Болигатов А. А., Лысенко Д. А., Бобарикин Ю. Л., Мартьянов Ю. В.</i> Математические зависимости для оценки напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при волочении.....	132

<i>Черняков Ю. Д., Жариков А. Н., Жигалов А. Н.</i> Анализ методов предотвращения роста аномально крупных зерен карбида вольфрама .....	135
<i>Жариков А. Н., Черняков Ю. Д., Жигалов А. Н.</i> Методы формирования смесей в процессе изготовления твердосплавных изделий .....	138
<i>Поздняков Е. П., Рабков А. В., Куис Д. В., Сидоренко Т. И., Коротцов А. М., Лежнев С. Н., Найзабеков А. Б., Степанкин И. Н.</i> Ударная вязкость конструкционных низкоуглеродистых сталей, подвергнутых диффузионному упрочнению.....	142

---

### Секция III. ЭНЕРГЕТИКА

---

<i>Янчук В. В., Романюк В. Н.</i> Абсорбционный тепловой насос с паровым приводом в системе регенеративного подогрева питательной воды ТЭЦ .....	146
<i>Каледник А. С., Попкова Н. А.</i> Оптимальный тип ветрогенератора при малой скорости ветра.....	149
<i>Гришан У. И., Самосюк Н. А.</i> Снижение энергоемкости продукции промышленного предприятия .....	151
<i>Кудлаева Е. В., Балюк Д. В., Гансецкий Д. В.</i> Воздействие температуры окружающей среды на энергоэффективность солнечных фотопанелей технических средств охраны границы.....	154
<i>Жук Е. А., Грунтович Н. В.</i> Сравнение методик при выявлении дефектов по хроматографическому анализу горючих газов в трансформаторном масле .....	157
<i>Громыко А. Л., Широков О. Г.</i> Пусковые характеристики тока и напряжения современных бытовых электроприемников.....	159
<i>Михадык А. В., Лычёв П. В.</i> Реконструкция электрической сети населенного пункта Цель в связи с ликвидацией сети 35 кВ.....	163
<i>Ковальчук А. А., Овсянник А. В.</i> Конденсационные теплоутилизаторы в теплоэнергетике.....	166
<i>Конопляная А. В., Макеева Е. Н.</i> Изучение свойств смесевых топлив на основе спиртов .....	169
<i>Панасик В. А., Грунтович Н. В.</i> Построение моделей по режимам потребления газа для исследования износа футеровки печного оборудования.....	174
<i>Ладорный С. В., Грунтович Н. В.</i> Техническое диагностирование нефтепогружного кабеля на устье скважины методом частичных разрядов .....	178
<i>Яцков И. М., Широков О. Г., Алфёрова Т. В.</i> Показатели несинусоидальности напряжения и тока при работе инвертора фотоэлектрической установки .....	180
<i>Коршунов К. Е., Капанский А. А.</i> Программно-аппаратный комплекс «Офис инженера» как способ структурирования и обработки данных .....	182
<i>Коршунов К. Е., Алфёрова Т. В.</i> Иновационные технологии, обеспечивающие кибербезопасность объектов энергетики .....	186
<i>Шакин В. М., Добродей А. О.</i> Моделирование перенапряжений в электрических сетях .....	190
<i>Белаш А. А., Жуковец С. Г., Алфёрова Т. В.</i> Современные технологии мониторинга воздушных линий электропередач .....	193
<i>Белаш А. А., Бурей А. А., Евминов Л. И., Алфёрова Т. В.</i> Изучение влияния электромагнитного излучения смартфона на организм человека .....	195
<i>Павлов В. В., Капанский А. А.</i> Изучение способов получения информации о режимах работы насосов для оценки обоснования энергоэффективности внедрения частотного электропривода .....	198
<i>Астапенко М. Д., Евминов Л. И., Алфёрова Т. В.</i> Анализ развития и современного состояния рынка светотехники.....	201

<b>Далинчук А. М., Селиверстов Г. И.</b> Оценка возможностей компактных воздушных линий сеточного типа .....	204
<b>Астапенко М. Д., Грунтович Н. В.</b> Исследование возможности протекания трансформаторного масла через силовые кабели под атмосферным давлением .....	207
<b>Радюк Д. С., Вальченко Н. А.</b> Влияние конфигурации оребрения теплоотдающей поверхности на процесс теплообмена при кипении ацетона .....	210
<b>Микулич И. Ю., Манюкевич М. С., Зализный Д. И.</b> Исследование характеристик высоковольтного разъединителя с помощью лабораторного стенда и микроомметра .....	214
<b>Шипецкий Р. Ш., Зализный Д. И.</b> Анализ погрешностей алгоритмов расчета активной мощности нагрузки в однофазной электрической сети переменного тока .....	216
<b>Агунович К. А., Кравченко А. И., Савкова Т. Н.</b> Определение остаточного ресурса светодиодов осветительной установки .....	219
<b>Шлегель В. Ю., Овсянник А. В.</b> Сравнительный анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина и паросиловых установок .....	222
<b>Свидинский И. О., Овсянник А. В.</b> Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода при сверхкритических параметрах .....	225
<b>Гриценко Н. С., Овсянник А. В.</b> Тригенерационные установки на озонобезопасных хладагентах .....	227
<b>Акулова Е. В., Ванкович А. В., Евминов Л. И.</b> Электрические и световые характеристики потолочных светильников с газоразрядными и светодиодными лампами .....	230
<b>Батан П. А., Жуковец С. Г.</b> Использование гравитационных накопителей для регулирования графиков нагрузки энергосистемы Республики Беларусь .....	233
<b>Вегера М. А., Коришунов К. Е., Костюченко И. Д., Капанский А. А.</b> Регулирование перекрестков с помощью переносного светофора с элементами альтернативной энергетики .....	235
<b>Вегера М. А., Коришунов К. Е., Костюченко И. Д., Грунтович Н. В.</b> Компьютерная интеллектуальная программа выявления дефектов в подшипниках качения .....	237
<b>Вегера М. А., Пузан Н. В., Бахмутская В. В.</b> Применение энергосберегающих вентильно-индукторных двигателей с микропроцессорным управлением в системах электроснабжения .....	240
<b>Костюченко И. Д., Бахмутская В. В.</b> Инновационные технологии производства электрической энергии: мусоросжигающие электрические станции .....	243
<b>Кныш О. А., Шаповалов А. В.</b> Интенсификация процесса теплообмена в замкнутых двухфазных теплопередающих устройствах систем обеспечения тепловых режимов промышленного оборудования .....	246
<b>Маркевич В. А., Алфёрова Т. В.</b> Инновационные технологии в области цифровизации электроэнергетики: цифровые подстанции .....	250
<b>Ковальчук А. А., Макеева Е. Н.</b> Влияние вторичной перегонки на свойства печного бытового топлива и его смеси с этанолом .....	255
<b>Никитенко В. П., Овсянник А. В.</b> Теплообмен при конденсации озонобезопасных хладагентов и их маслофреоновых смесей .....	258
<b>Чернявская В. В., Стрельцов М. В., Широглазова Н. В.</b> Реконструкция градирни .....	262
<b>Кулеш А. Г., Пархомович А. М., Лычѳ П. В.</b> Повышение надежности и экономичности выдачи мощности Гомельской ТЭЦ-1 .....	265
<b>Дедолко М. В., Ганущак Д. А., Панасик В. А.</b> Цифровые подстанции в Республике Беларусь .....	267

---

<b>Султанов М. А., Джумаев А. Я.</b> Типовые проекты мини-и микроэлектросетей для использования в изолированных районах.....	270
<b>Оразбердиева М., Гурбанова Г., Мамедова Т., Оразбердиев Р.</b> Перспективы выращивания микроводорослей в дренажных водах для биоэнергетики.....	273
<b>Сарыев К.</b> Методы подключения к электроэнергетической системе, вырабатываемой комбинированными станциями возобновляемыми источниками энергии .....	276
<b>Матьякубов А., Сарыев К. А.</b> Сравнительные характеристики различных теплоносителей в концентрированных солнечных станциях .....	279
<b>Айдогдыев С., Непесов Н., Сапарлыева О. Б.</b> Использование солнечной энергии в Туркменистане для теплоснабжения теплиц.....	282
<b>Гельдыев А. А., Акмырадова М. К., Овезов Б. Ч.</b> Развитие энергетики Туркменистана: выбор стратегических решений и их реализация.....	285
<b>Абдыкадырова О., Оразмаммедов П.</b> Гармонические искажения напряжения в солнечной энергетике .....	288
<b>Агаджанов Э., Сарыев К., Батманов Дж.</b> Методика оценки тепловых потерь в системе теплоснабжения .....	291
<b>Чарыев Я., Ходжанепесов К.</b> Техничко-экономическое обоснование использования солнечных тепловых фотоэлектрических модулей с параболическими концентраторами .....	294
<b>Shi Xizhi, Yang Peihong.</b> Research on Multi-Time Scale Modeling of Electro-Thermal Coupling IES .....	297
<b>Du H. W., Zhao D. B., Shi X. H., Feng J. T., Ji Y. F., Li T. T., Zhang F. Y., Duan X. S., Li K.</b> Numerical Simulation and Experimental Investigation of Methane-Air Non-Premixed Strongly Swirling Combustion in a Novel Asymmetric Semi-Confined Combustor.....	299
<b>Баранкевич К. С., Купреева Д. А., Шимановский А. О.</b> Реконструкция воздушной линии электропередачи на основе применения самонесущих изолированных проводов.....	303

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

## ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭНЕРГЕТИКИ

Д. И. Зализный

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

Рассмотрены базовые принципы функционирования современных электронных измерительных приборов, применяющихся для задач энергетики. Показано, что основными блоками таких устройств являются аналого-цифровой преобразователь и микроконтроллер. Приведены алгоритмы расчета действующих значений напряжения и тока, а также электрической мощности и энергии в программном обеспечении микроконтроллера. Даны сведения о последних разработках измерительных приборов для учебных стендов в лабораториях кафедры «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого. Отмечена роль студентов в этом процессе.

**Ключевые слова:** измерительный прибор, датчик, аналого-цифровой преобразователь, микроконтроллер, дискретизация, алгоритм.

Электронные измерительные приборы используются практически во всех отраслях человеческой деятельности, в том числе и в энергетике, которую подразделяют на электроэнергетику и теплоэнергетику. Для задач электроэнергетики применяют амперметры, вольтметры, вольтамперфазометры, измерители сопротивлений, счетчики электроэнергии и многие другие приборы. В теплоэнергетике наиболее актуальны термометры, манометры, измерители расхода, счетчики тепловой энергии.

Несмотря на то, что в электронных измерительных приборах для нужд энергетики имеются свои особенности, они функционируют по тем же принципам, что и все остальные современные микропроцессорные приборы, т. е. в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 1.

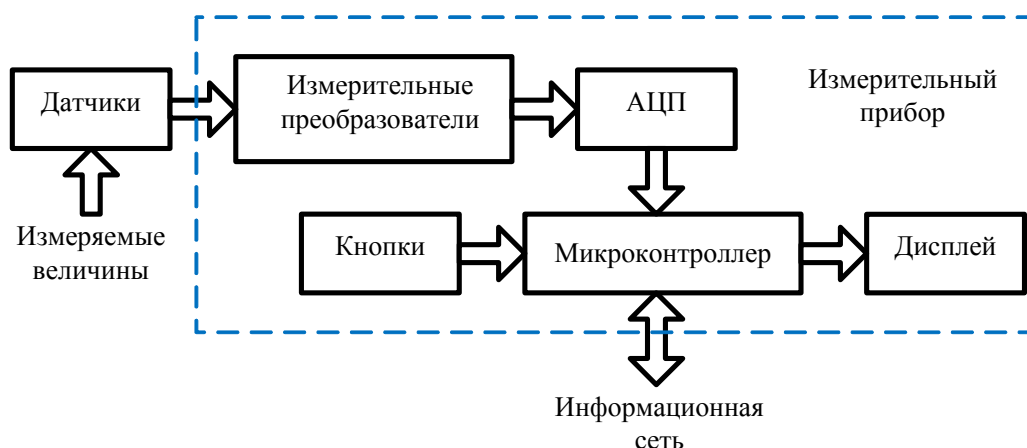


Рис. 1. Обобщенная структурная схема микропроцессорного измерительного прибора



Измеряемые электрические или неэлектрические величины с помощью соответствующих внешних датчиков преобразуются в пропорциональные их значениям напряжения или токи, которые поступают затем на входы измерительных преобразователей. Эти преобразователи усиливают, ослабляют или масштабируют полученные сигналы и подают сформированные в соответствии с текущим пределом измерения напряжения на входы многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

В АЦП осуществляется процесс дискретизации, т. е. разбиения измеряемого сигнала на отсчеты, выборки, как показано на рис. 2.

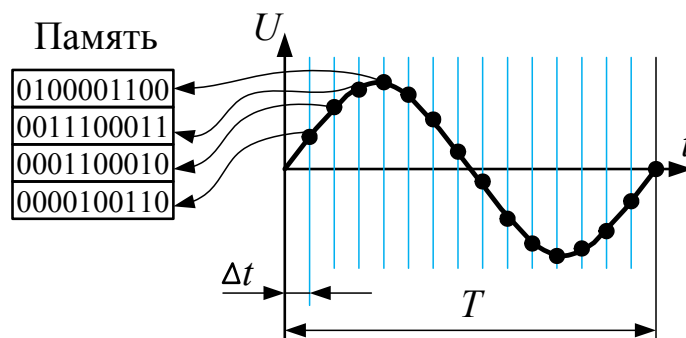


Рис. 2. Дискретизация аналогового сигнала

Через равные интервалы времени  $\Delta t$ , которые называются периодом дискретизации, АЦП преобразует мгновенные значения измеряемого напряжения (показаны жирными точками на рис. 2) в соответствующие двоичные коды, которые далее записываются в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) микроконтроллера.

Микроконтроллер – это наиболее универсальная цифровая интегральная микросхема в современной электронике, содержащая центральный процессор, память, порты ввода-вывода, таймеры-счетчики и многие другие функциональные блоки. Можно сказать, что микроконтроллер является «мозгом» современного электронного прибора.

Работой микроконтроллера управляет программа, записанная в его внутреннюю *Flash*-память. Стандартные действия, осуществляемые микроконтроллером:

- выполнение необходимых математических расчетов;
- вывод результатов на дисплей;
- опрос управляющих кнопок;
- обмен данными с другими приборами через информационную сеть посредством интерфейсов связи.

Важнейшими видами математических расчетов в микроконтроллере для задач энергетики являются:

- умножение измеренных величин на масштабирующие коэффициенты с целью получения результатов требуемой размерности;
- расчеты действующих значений переменных напряжений и токов электрической сети;
- расчеты электрических мощностей и энергий;
- расчеты уровня расхода жидкости или газа;
- расчеты тепловых мощностей и энергий.

В качестве примера рассмотрим формирование алгоритма для расчета действующего значения напряжения. Исходная формула записывается следующим образом:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad (1)$$

где  $U_{RMS}$  – действующее значение напряжения;  $T$  – период напряжения электрической сети (см. рис. 2);  $u(t)$  – зависимость измеряемого напряжения от времени.

Для того чтобы формулу (1) можно было использовать в программном обеспечении микроконтроллера, от интеграла необходимо перейти к приближенной сумме:

$$U_{RMS} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^n U_j^2 \Delta t} = \sqrt{\frac{\Delta t}{T} \sum_{j=1}^n U_j^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – период дискретизации;  $j$  – номер отсчета (выборки) напряжения в процессе дискретизации (см. рис. 2);  $n$  – количество отсчетов за интервал времени  $T$ .

Из рис. 2 следует, что если разделить  $T$  на  $\Delta t$ , то получим количество отсчетов  $n$ . Тогда выражение (2) приобретет вид:

$$U_{RMS} \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_j^2}. \quad (3)$$

Формула (3) и является алгоритмом расчета действующего (эффективного) значения напряжения. Аналогичным образом рассчитывается и действующее значение тока  $I_{RMS}$ .

В зарубежной литературе действующее значение обозначается: *RMS* – *Root Mean Square* – среднеквадратическое значение.

Очевидно, что чем меньше значение периода дискретизации  $\Delta t$ , тем выше точность алгоритма (3) по отношению к формуле (1). Однако при уменьшении  $\Delta t$  возрастают требования к быстродействию АЦП и объему памяти микроконтроллера. Поэтому, как правило, выбирают оптимальное значение  $\Delta t$  в соответствии с теоремой Котельникова.

Действующие значения напряжения и тока позволяют микроконтроллеру рассчитывать мощности и энергии в электрической сети. Так активная мощность определяется по известной формуле

$$P = U_{RMS} I_{RMS} \cos \varphi, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – разность фаз между напряжением и током.

За последние несколько лет на кафедре «Электроснабжение» разработаны и внедрены в учебный процесс ряд лабораторных стендов с микропроцессорными измерительными приборами, которые также разработаны на кафедре. Данные приборы функционируют на основе микроконтроллеров серии *Atmega* фирмы *Atmel*. Это следующие приборы:

– секундомер со светодиодным дисплеем для измерения быстродействия высоковольтного выключателя с электромагнитным приводом;

- амперметр-секундомер с жидкокристаллическим дисплеем для измерения электропотребления и быстродействия высоковольтного выключателя с пружинным приводом;
  - микроомметр для измерения сопротивлений замкнутых контактов высоковольтного разъединителя;
  - ваттварметр для измерений мощности электроприемников.
- Внешний вид разработанного ваттварметра показан на рис. 3.



Рис. 3. Ваттварметр лабораторный

Данный прибор имеет следующие преимущества перед аналогами:

- низкая стоимость (себестоимость не более 200 бел. руб. без учета стоимости корпуса);
- защита от коротких замыканий и перегрузки встроенным автоматическим выключателем;
- удобство подключения к лабораторным стендам;
- отсутствие отдельной цепи питания;
- одновременное отображение значений активной и реактивной мощности;
- автоматическое определение знаков активной и реактивной мощности.

Основной недостаток прибора – низкая точность из-за простоты и низкой стоимости внутренней схемы. Класс точности составляет около 5. Однако этой точности достаточно для выполнения лабораторных работ, в которых осуществляется контроль электропотребления различных электроприемников. Такой прибор можно рассматривать как эффективную замену электромеханическим ваттметрам.

В монтаже всех перечисленных лабораторных стендов и измерительных приборов принимали участие студенты кафедры «Электроснабжение» в рамках УИЛС «Электроника и программирование в энергетике». Автор выражает благодарность этим студентам за проявленную работоспособность и энтузиазм. Автор считает, что на всех кафедрах университета необходимо привлекать студентов к совершенствованию лабораторной базы, так как это, несомненно, способствует совершенствованию их профессиональных навыков.

## Литература

1. Информационно-измерительная техника и электроника / Г. Г. Раннев [и др.] ; под ред. Г. Г. Раннева. – 2-е изд. – М. : Академия, 2007. – 511 с.
2. Зализный, Д. И. Электроника и информационно-измерительная техника : учеб. пособие / Д. И. Зализный, О. Г. Широков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 177 с.
3. Зализный, Д. И. Микроэлектронные и микропроцессорные устройства в энергетике : учеб. пособие / Д. И. Зализный – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 194 с.
4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 638 с.

## РАЗВИТИЕ ВИДОВ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

И. В. Рачкова

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

*Автором разработана методика определения направлений перспективной специализации региона, состоящая в количественной оценке вклада различных ВЭД в экономический рост региона и его конкурентных преимуществ в данных ВЭД на основе анализа структурных сдвигов, расчета коэффициента локализации, скорректированного на коэффициент душевого производства. Определены ВЭД перспективной специализации Гомельской области. Установлен перечень технологических компетенций, развитие которых в регионе будет способствовать росту конкурентных преимуществ его ВЭД перспективной специализации.*

**Ключевые слова:** вид экономической деятельности, конкурентное преимущество, коэффициент локализации, перспективная специализация, регион, сфера производства, сфера услуг, технологические компетенции.

Программой социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг. предусматриваются дифференцированный подход к региональному развитию и реализация точечных мер поддержки и стимулирования в зависимости от специализации, компетенций и потенциала территорий [1]. В этой связи актуальным является определение перспективной специализации регионов и технологических компетенций, требующих развития в ее рамках.

Для определения направлений перспективной специализации региона нами была разработана методика [2], состоящая в количественной оценке вклада различных видов экономической деятельности (ВЭД) в экономический рост региона и его конкурентных преимуществ в данных ВЭД. Алгоритм применения методики включает следующие этапы:

Этап 1. *Определение коэффициентов локализации ВЭД региона.*

На данном этапе последовательно рассчитываются частные коэффициенты локализации ВЭД по валовой добавленной стоимости (ВДС), численности занятых, интегральный коэффициент локализации.

Значение частного коэффициента локализации ВЭД определяется:

а) при рассмотрении одного региона без необходимости сопоставления регионов по направлениям перспективной специализации – без учета размера экономики региона по формуле (1):

$$K_{л}^{ВДС(3)} = \frac{\frac{ВДС(3)_{ВЭДр}}{ВДС(3)_р}}{\frac{ВДС(3)_{ВЭД}}{ВДС(3)}}, \quad (1)$$

где  $K_{л}^{ВДС(3)}$  – коэффициент локализации исследуемой ВЭД в регионе, рассчитанный по ВДС (численности занятых), коэф.;  $ВДС(3)_{ВЭДр}$  – ВДС (численность занятых) в ВЭД региона, тыс. руб. (тыс. человек);  $ВДС(3)_р$  – ВДС (численность занятых) региона, тыс. руб. (тыс. человек);  $ВДС(3)_{ВЭД}$  – ВДС (численность занятых) в ВЭД страны, тыс. руб. (тыс. человек);  $ВДС(3)$  – ВДС (численность занятых) страны, тыс. руб. (тыс. человек);

б) при рассмотрении нескольких регионов и сопоставлении регионов по направлениям перспективной специализации – с учетом размера экономики региона по формуле (2):

$$K_{л}^{ВДС(3)} = \frac{\frac{ВДС(3)_{ВЭДр}}{ВДС(3)_р}}{\frac{ВДС(3)_{ВЭД}}{ВДС(3)}} \left( \log_2 \left( 1 + \frac{ВДС(3)_р}{ВДС(3)} \right) \right)^\delta, \quad (2)$$

где  $\delta$  – коэффициент, характеризующий размер экономики региона (если удельный вес ВРП региона в ВВП страны 3,3–6,0 %, то  $\delta = 0,20$ , 6,1–15,0 %, то  $\delta = 0,25$ , если больше 15,0 %, то  $\delta = 0,30$ ) [3].

Интегральный коэффициент локализации ВЭД определяется как среднее геометрическое значений двух частных индексов локализации ВЭД, рассчитанных по ВДС и численности занятых.

*Этап 2. Корректировка интегрального коэффициента локализации с учетом сравнительной производительности труда в ВЭД региона.*

Корректировка интегрального коэффициента локализации с учетом сравнительной производительности труда в ВЭД региона заключается в его умножении на значение коэффициента душевого производства, определяемого по формуле (3):

$$K_c = \frac{\frac{ВДС_{ВЭДр}}{ВДС_{ВЭД}}}{\frac{З_p}{З}}. \quad (3)$$

Значение скорректированного интегрального коэффициента локализации ( $K_{л}^{кор}$ ) определяется по формуле (4):

$$K_{л}^{кор} = K_{л} K_c, \quad (4)$$

где  $K_{л}$  – среднее за период значение интегрального коэффициента локализации, коэф.;  $K_c$  – среднее за период значение коэффициента душевого производства, коэф.

Этап 3. *Определение суммы значений MIX- и DIF-эффектов для ВЭД региона.*

Величина MIX-эффекта (эффекта роста за счет увеличения национального и мирового спроса) для исследуемых ВЭД региона определяется по формуле (5):

$$MIX_{ВЭДр} = \frac{ВДС_{ВЭДр}^6}{ВРП_p^6} (T^{ВЭД} - T^{ВДС}) \quad (5)$$

где  $\frac{ВДС_{ВЭДр}^6}{ВРП_p^6}$  – удельный вес ВДС исследуемой ВЭД в ВРП региона в базисном периоде, коэф.;  $T^{ВЭД}$  – темп прироста ВДС исследуемой ВЭД в целом по стране в реальном выражении в отчетном периоде, п. п.;  $T^{ВДС}$  – темп прироста ВДС экономики страны в реальном выражении в отчетном периоде, п. п.

Величина DIF-эффекта (эффект роста ВЭД за счет его более высокой конкурентоспособности на региональном уровне по сравнению с национальным) для исследуемой ВЭД определяется по формуле (6):

$$DIF_{ВЭДр} = \frac{ВДС_{ВЭДр}^6}{ВРП_p^6} (T^{ВЭДр} - T_{ВЭД}^{ВДС}) \quad (6)$$

где  $T^{ВЭДр}$  – темп прироста ВДС исследуемой ВЭД региона в реальном выражении в отчетном периоде, п. п.;  $T_{ВЭД}^{ВДС}$  – темп прироста ВДС исследуемых ВЭД на национальном уровне в реальном выражении в отчетном периоде, п. п.

Этап 4. *Позиционирование ВЭД региона в четырехклеточной матрице согласно значениям суммы MIX- и DIF-эффектов и скорректированного интегрального коэффицента локализации.*

По результатам проведенных на этапах 1–3 расчетов определение ВЭД перспективной специализации экономики региона осуществляется с использованием матрицы, представленной на рис 1.

	Значение скорректированного интегрального индекса локализации ВЭД в регионе, коэф. 1,25*	
Сумма значений MIX- и DIF-эффектов для ВЭД, п. п. 0,1**	Квадрант 1	Квадрант 3
	Квадрант 2	Квадрант 4

Рис. 1. Матрица для определения ВЭД перспективной специализации региональной экономики

\*При необходимости значение корректируется с учетом размера экономики региона [см. формулу (2)].

\*\*В качестве порогового значения выбрано 0,1, а не 0,0 для того, чтобы выделить ВЭД, вносящих существенный положительный вклад в динамику ВДС региона.

<p><i>квadrant 1</i> – ВЭД является ВЭД перспективной специализации региона. Он вносит положительный вклад в экономический рост, может использовать эффекты масштаба и опыта для получения ценовых преимуществ на рынке. Если <i>MIX</i>-эффект является положительным, то ВЭД получает преимущество от растущего мирового (национального) спроса. Если <i>DIF</i>-эффект положителен, то ВЭД в регионе имеет более высокую конкурентоспособность по сравнению с ВЭД страны в целом</p>	<p><i>квadrant 3</i> – ВЭД является кандидатом в перечень ВЭД перспективной специализации региона. Он вносит положительный вклад в экономический рост, но пока не может в полной мере использовать эффекты масштаба и опыта для получения ценовых преимуществ на рынке. Если <i>MIX</i>-эффект является положительным, то ВЭД получает преимущество от растущего мирового (национального) спроса. Если <i>DIF</i>-эффект положителен, то ВЭД в регионе имеет более высокую конкурентоспособность по сравнению с ВЭД страны в целом. Для данного ВЭД рекомендуется стратегия увеличения масштабов деятельности и локализации в регионе</p>
<p><i>квadrant 2</i> – ВЭД является кандидатом в перечень ВЭД перспективной специализации региона. Он не вносит положительный вклад в экономический рост, но может использовать эффекты масштаба и опыта для получения ценовых преимуществ на рынке. Если <i>MIX</i>-эффект является положительным, то ВЭД получает преимущество от растущего мирового (национального) спроса. Если <i>DIF</i>-эффект положителен, то ВЭД в регионе имеет более высокую конкурентоспособность по сравнению с ВЭД страны в целом. Для данного ВЭД рекомендуется стратегия увеличения производительности, формирования положительных значений <i>MIX</i>- и <i>DIF</i>-эффектов</p>	<p><i>квadrant 4</i> – ВЭД не является ВЭД перспективной специализации региона. Он не вносит положительный вклад в экономический рост, и не может использовать эффекты масштаба и опыта для получения ценовых преимуществ на рынке. Если ВЭД не является инфраструктурной или оказывающей социальные услуги (образование, здравоохранение, транспорт и т. п.), то рекомендуется стратегия прекращения функционирования данного ВЭД в регионе. Для остальных ВЭД из этого квадранта рекомендуется стратегия увеличения производительности, формирования положительных значений <i>MIX</i>- и <i>DIF</i>-эффектов</p>

Рис. 2. Позиционирование ВЭД в квадрантах матрицы

Апробация методики на примере Гомельской области (для расчетов использовались данные за 2016–2020 гг.) позволила установить ВЭД ее перспективной специализации и ВЭД-кандидаты в перечень ВЭД перспективной специализации (рис. 3, 4).

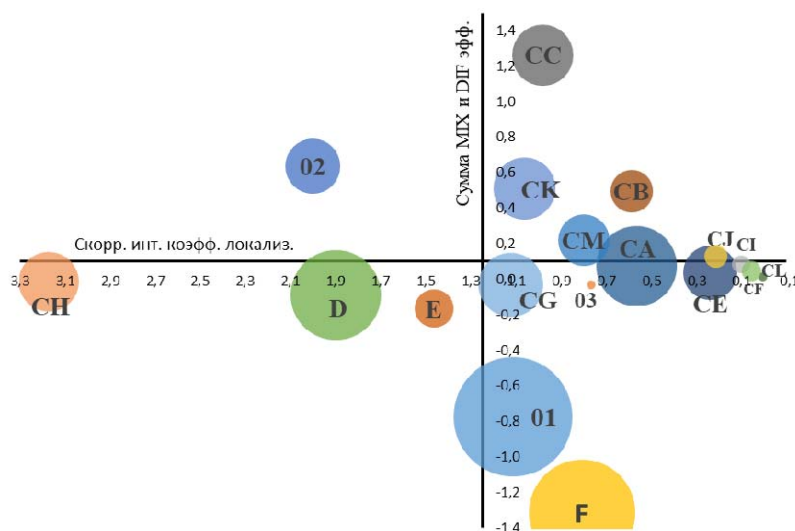


Рис. 3. Матрица ВЭД сферы производства Гомельской области  
 Примечание. В матрице отсутствует секция В с координатами (24,46; 0,08); секция CD с координатами (13,75; -1,60).

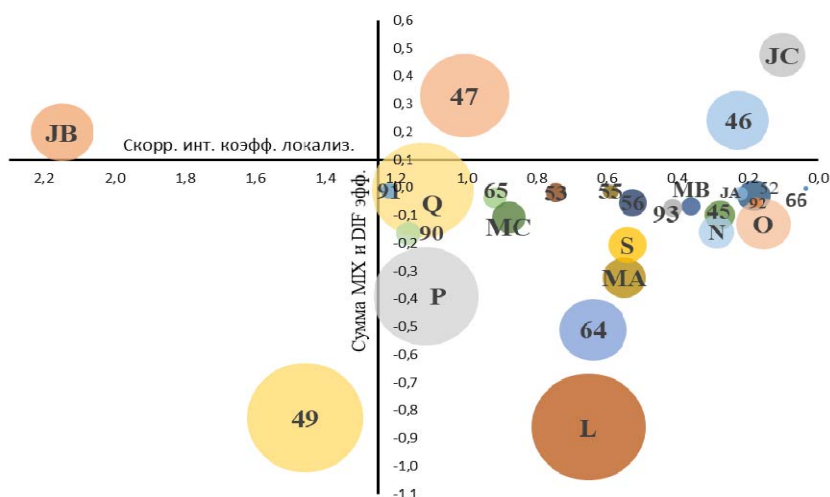


Рис. 4. Матрица ВЭД сферы услуг Гомельской области  
Примечание. В матрице отсутствует секция 50 с координатами (5,61; 0,01).

Таким образом, проведенные расчеты позволили установить перечень ВЭД перспективной специализации Гомельской области и ВЭД-кандидаты в перечень перспективных (табл. 1). Регион характеризуется очень небольшим количеством ВЭД перспективной специализации согласно принятому в настоящем исследовании подходу. Это лесоводство и лесозаготовки (02) в сфере производства и деятельность в области телекоммуникаций (JB) в сфере услуг, т. е. один сырьевой и один инфраструктурный ВЭД.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет не только определить ВЭД перспективной специализации Гомельской области, но и установить источники роста ВЭД, а также направления государственной политики по их развитию.

Таблица 1

### Результаты анализа ВЭД Гомельской области

ВЭД	Коэффициент локализации, коэф.	Коэффициент душевого производства, коэф.	Скорректированный интегральный коэффициент локализации, коэф.	MIX-эффект, п. п.	DIF-эффект, п. п.	Сумма MIX- и DIF-эффектов, п. п.	Квадрант матрицы (рисунок)
<b>Сфера производства</b>							
02	1,32	1,52	2,00	0,22	0,42	0,64	1
<b>В</b>	<b>4,65</b>	<b>5,26</b>	<b>24,46</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,12</b>	<b>0,08</b>	<b>2</b>
CB	0,82	0,72	0,59	0,10	0,40	0,50	3
CC	1,11	0,88	0,98	0,77	0,50	1,26	3
CD	3,47	3,96	13,75	-1,65	0,05	-1,60	2
CH	1,91	1,66	3,17	0,10	-0,11	-0,01	2
CJ	0,48	0,44	0,21	0,08	0,05	0,13	3
CK	1,18	0,90	1,06	0,43	0,08	0,51	3



Окончание табл. 1

ВЭД	Коэффициент локализации, коэф.	Коэффициент душевого производства, коэф.	Скорректированный интегральный коэффициент локализации, коэф.	MIX-эффект, п. п.	DIF-эффект, п. п.	Сумма MIX- и DIF-эффектов, п. п.	Квадрант матрицы (рисунок)
<i>CM</i>	0,98	0,82	0,80	0,17	0,05	0,22	3
<b>D</b>	<b>1,37</b>	<b>1,38</b>	<b>1,90</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,10</b>	<b>-0,09</b>	<b>2</b>
<b>E</b>	<b>1,28</b>	<b>1,14</b>	<b>1,46</b>	<b>-0,12</b>	<b>-0,04</b>	<b>-0,16</b>	<b>2</b>
<b>Сфера услуг</b>							
46	0,65	0,35	0,23	-0,43	0,67	0,24	3
47	1,28	0,78	1,00	0,45	-0,12	0,33	3
<b>49</b>	<b>1,13</b>	<b>1,29</b>	<b>1,46</b>	<b>-0,39</b>	<b>-0,44</b>	<b>-0,82</b>	<b>2</b>
<b>50</b>	<b>2,29</b>	<b>2,44</b>	<b>5,61</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>2</b>
JB	2,14	1,01	2,15	0,13	0,07	0,20	1
JC	0,57	0,18	0,10	0,63	-0,15	0,48	3

*Примечание.* Прямым светлым начертанием выделены ВЭД перспективной специализации региона, прямым жирным начертанием и курсивным светлым начертанием – ВЭД кандидаты в перечень ВЭД перспективной специализации.

Усиление конкурентных преимуществ установленных выше ВЭД перспективной специализации и ВЭД кандидатов в этот перечень в современных условиях невозможно без развития технологических компетенций (табл. 2).

Таблица 2

### Технологические компетенции, необходимые для развития ВЭД перспективной специализации Гомельской области

ВЭД	Технологическая компетенция
Сфера производства	
02 «Лесоводство и лесозаготовки»	– сбор дикорастущих недревесных лесных продуктов; – производство лесоматериалов, используемых в необработанной форме (рудничных стоек, балансовой древесины);
В «Горнодобывающая промышленность»	– добыча и переработка полезных ископаемых (горючих (нефть, торф, горючие сланцы, бурый уголь), черных и цветных металлов, химического и агрохимического сырья (доломит, сапропель, калийные соли и др.), сырья для производства строительных материалов (глины, пески и др.))
СВ «Производство текстильных изделий...»	– производство тканых (текстильных) материалов с повышенным уровнем служебных характеристик, уникальными и заданными свойствами; – производство тканей медицинского назначения; – производство различных видов технического текстиля и нетканых материалов для использования в сельском хозяйстве и мелиорации;

Продолжение табл. 2

ВЭД	Технологическая компетенция
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство новых тканеподобных трикотажных изделий;</li> <li>– производство инновационных пряж на основе современных видов натуральных и химических волокон и нитей, в том числе волокон и нитей нового поколения</li> </ul>
СС «Производство изделий из дерева и бумаги...»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство продуктов лесохимии (целлюлозно-бумажного, гидролизного, пиролизного производств);</li> <li>– переработка древесины с получением различных биологически активных веществ и продуктов</li> </ul>
СД «Производство кокса и продуктов нефтепереработки»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство композиционных материалов на основе использования отходов нефтехимии и нефтепереработки</li> </ul>
СН «Металлургическое производство...»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство инструмента, оснастки, деталей и комплектующих с использованием аддитивных технологий;</li> <li>– производство специальных сталей и сплавов;</li> <li>– производство листового проката;</li> <li>– производство твердосплавной продукции;</li> <li>– нанесение защитных покрытий на металлические изделия</li> </ul>
СЖ «Производство электрооборудования»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство программно-аппаратных решений различного назначения;</li> <li>– производство корпусных изделий электрооборудования со сложными геометрическими плоскостями с применением аддитивных технологий;</li> <li>– производство аккумуляторов и аккумуляторных батарей;</li> <li>– производство интеллектуальных управляющих систем освещения</li> </ul>
СК «Производство машин и оборудования...»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство современного металлорежущего и вспомогательного инструмента;</li> <li>– производство прецизионного оборудования;</li> <li>– роботостроение и создание роботизированных систем и робототехнических комплексов в металлообработке</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство оборудования общего назначения для грузовых автомобилей, сельскохозяйственной, лесной, строительной и иной техники;</li> <li>– производство промышленного холодильного и вентиляционного оборудования</li> </ul>
СМ «Производство прочих готовых изделий...»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство медицинских и стоматологических инструментов и принадлежностей;</li> </ul>
Е «Водоснабжение...»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– утилизация и переработка различных видов отходов, в том числе пищевой и текстильной промышленности и агропромышленного комплекса, с получением из них вторичного сырья и готовой продукции;</li> <li>– утилизация древесных отходов, в том числе с получением возобновляемого топлива;</li> <li>– переработка полимерных отходов производства;</li> </ul>

Окончание табл. 2

ВЭД	Технологическая компетенция
Сфера услуг	
ИС «Информационные технологии...»	– создание программного обеспечения различного назначения (автоматизация конструкторского и технологического проектирования (CAD/CAM/CAE), автоматизация конструкторско-технологической деятельности предприятий (САПР), автоматизация технического документооборота и управления инженерными данными (PDM), поддержка жизненного цикла продукции на всех этапах создания и эксплуатации (PLM), создание цифровых двойников, создание искусственного интеллекта, создание человеко-машинных интерфейсов, создание промышленного интернета вещей (IIoT), создание встраиваемых систем управления и технического контроля и др.)

Таким образом, в результате проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Установлено, что ВЭД перспективной специализации Гомельской области являются лесоводство и лесозаготовки (02) и деятельность в области телекоммуникаций (JB). При условии усиления локализации и роста конкурентных преимуществ ВЭД перспективной специализации региона могут, прежде всего, стать такие ВЭД, как СС «Производство изделий из дерева и бумаги...», СК «Производство машин и оборудования, не включенные в другие группировки», СВ «Производство текстильных изделий...», 46 «Оптовая торговля, за исключением торговли автомобилями и мотоциклами», 47 «Розничная торговля...» и ИС «Информационные технологии...».

2. Определен перечень технологических компетенций, развитие которых в регионе будет способствовать росту конкурентных преимуществ его ВЭД перспективной специализации и ВЭД кандидатов в этот перечень.

Применение методики позволяет определить направления структурной перестройки экономики региона, определить необходимые для этого технологические компетенции и стратегии развития конкурентных преимуществ региона в ВЭД перспективной специализации.

#### Литература

1. Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2021. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32100292&ysclid=l8rslfyo2u78003060>. – Дата доступа: 29.03.2023.
2. Рачкова, И. В. Перспективные направления структурной перестройки экономики Гомельской области / И. В. Рачкова // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2023. – № 1 (92). – С. 57–68.
3. Белоглазова, С. А. Выявление хозяйственной специализации регионов ЮФО в контексте кластеризации: развитие методики и актуальные результаты / С. А. Белоглазова // Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. – 2018. – Vol. 8, iss. 11A. – С. 148–157.

# СЕКЦИЯ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

---

## АНАЛИЗ СХЕМ И СПОСОБОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Д. А. Роговенко

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

Научный руководитель А. П. Лепший

*Рассмотрены схемы магнитно-абразивной обработки, их технологические параметры и способы интенсификации процесса обработки плоских поверхностей. Сделаны выводы об изученности процессов обработки, о влиянии геометрических и технологических параметров на эффективность обработки, что позволяет определить цели и задачи предстоящих исследований.*

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, магнитная система, параметры процесса, производительность.

В современном машиностроении широкое применение находят комбинированные методы финишной обработки деталей машин [1, 2]. Одним из перспективных методов формирования поверхностного слоя является магнитно-абразивная обработка (МАО). Сущность МАО заключается в том, что порошковая ферромагнитная абразивная масса под действием магнитного поля уплотняется, образуя своеобразный упругий абразивный инструмент, и при относительном перемещении инструмента и обрабатываемой заготовки осуществляет абразивное воздействие на ее поверхность, в результате которого происходит процесс микрорезания со снятием тончайших слоев металла и его окислов, а также сглаживание микронеровностей поверхностного слоя путем их пластического деформирования. Метод отличается относительной простотой в осуществлении, экологической чистотой, а также обеспечивает высокое качество микрогеометрии поверхности, формирование остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивление коррозии [3, 4].

В настоящее время известно 210 схем МАО различных поверхностей [5], 54 из которых применимы для обработки плоских поверхностей. В качестве определяющего признака классификации всего многообразия схем МАО плоских поверхностей принят вид взаимодействия системы инструмент–деталь, в соответствии с которым выделены семь групп. Три первые группы охватывают способы и устройства МАО, в которых осуществляется один вид резания: магнитостатическое (МС), кинематическое (К) или динамическое (Д). Следующие три группы включают схемы, реализующие два вида воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность: К-МС, Д-МС или Д-К. Седьмая группа представляет сочетание всех трех видов взаимодействия: Д-К-МС. Согласно этим признакам на рис. 1, 2 представлены наиболее характерные схемы, реализующие каждую из групп.

Очевидно, что формирование режущего инструмента может производиться на торцевой или цилиндрической поверхности магнитного индуктора. Торцовое расположение (рис. 1, а–в и рис. 2, а, б, з) предполагает одновременное участие в резании зерен порошка по всей площади, перекрываемой полюсами индуктора, причем в большинстве схем зерна ориентируются нормально по отношению к обрабатываемой поверхности. Существенными недостатками таких схем является неравномерность обработки по ширине поверхности; конструктивные сложности подвода смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) непосредственно в зону обработки; отставание абразивной массы порошка от вращающихся полюсов, что снижает интенсивность обработки, причем ресурс свойств порошка расходуется на полирование не только изделия, но и рабочих поверхностей полюсов индуктора.

При формировании абразивного порошка на цилиндрической поверхности индуктора, одновременно в резании участвует меньшее количество режущих зерен, размещенных на некоторой площадке индуктора вдоль его образующей (рис. 1, д и рис. 2, в, д, е), и зерна могут ориентироваться по отношению к обрабатываемой поверхности нормально (рис. 1, д и рис. 2, е), касательно (рис. 2, в) и под углом (рис. 2, е). Ненормально ориентированное расположение зерен по отношению к обрабатываемой поверхности приводит к снижению производительности обработки, а некоторые схемы применимы для обработки только диамагнитных материалов (рис. 2, в) [6].

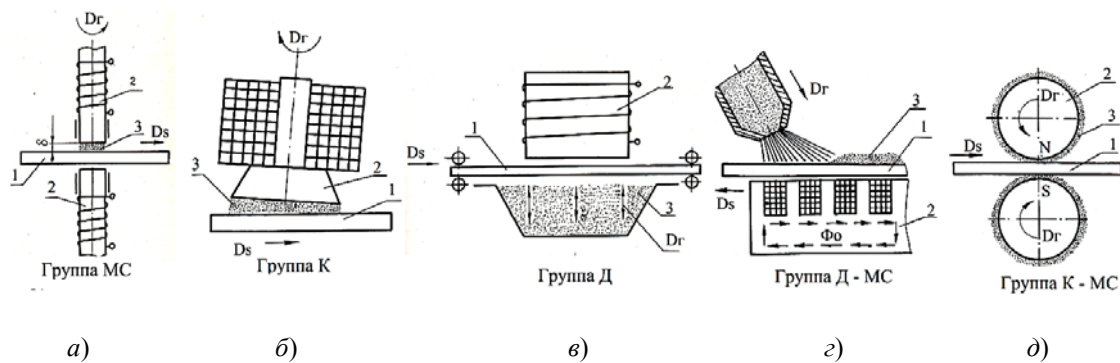


Рис. 1. Схемы и устройства магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей по виду взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью

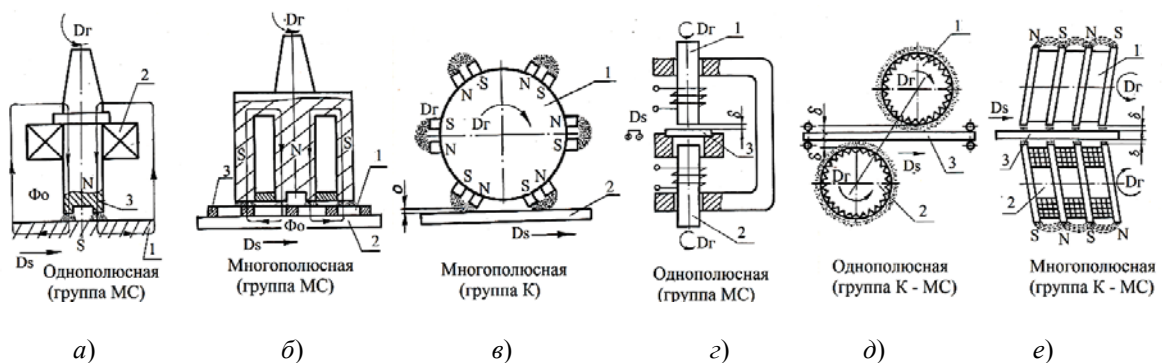


Рис. 2. Схемы и устройства магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей

Анализ исследований различных схем обработки плоских поверхностей [3–6] показал, что большинство исследований проводились на магнитных материалах с шириной изделия до 300 мм, недостаточно раскрыты возможности процесса обработки немагнитных как труднообрабатываемых, так и мягких материалов.

На эффективность процесса МАО плоских поверхностей оказывают влияние много факторов и параметров, которые можно разделить на конструктивные и технологические. К конструктивным относятся такие факторы, как геометрия и конфигурация полюсных наконечников и рабочих зазоров магнитного индуктора, величина рабочего зазора, наличие и форма концентраторов магнитного поля, конструкция магнитной системы, которые определяют количество участвующих в процессе резания зерен магнитно-абразивного порошка, ориентацию порошка относительно обрабатываемой поверхности, условия удержания порошка в рабочем зазоре и т. д. Из технологических факторов наибольшее влияние на процесс МАО оказывают величина магнитной индукции, скорость вращения магнитного индуктора, материал магнитно-абразивного порошка и его зернистость, скорость подачи заготовки, наличие и вид СОЖ, физико-механические свойства обрабатываемой детали и состояние исходной поверхности, характер вспомогательных движений и ряд других факторов.

В настоящее время достаточно широко изучены вопросы влияния технологических факторов на процесс МАО с целью выработки практических рекомендаций по применению данного способа финишной обработки [4, 6].

Возможности повышения эффективности МАО за счет изменения конструктивных факторов, не связанных с повышением энергоемкости оборудования и усложнением устройств, в настоящее время изучены недостаточно [2, 3]. Так, например, установлено, что по сравнению с концентричным серповидный рабочий зазор обеспечивает повышение производительности обработки до 30 % [6]. Применение на индукторах концентраторов магнитного потока в виде треугольных пазов с углом  $90^\circ$ , глубиной 2,5 мм и шагом 5 мм увеличивает съем металла в 1,3 раза по сравнению с прямоугольными пазами [4]. Расположение концентраторов под углом к направлению вектора главного движения позволяет без ущерба для производительности процесса отказаться от дополнительного осциллирующего движения заготовки или магнитного индуктора. Однако для обоснованных рекомендаций этот вопрос еще недостаточно изучен [6]. В настоящее время отсутствуют обобщающие рекомендации по форме поперечного сечения концентраторов, их размерам и частоте размещения на поверхности, а также недостаточно изучен вопрос эффективности МАО в зависимости от расположения концентраторов под углом к направлению вектора магнитной индукции [3].

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- формирование инструмента на периферии (цилиндрической поверхности) магнитного индуктора имеет свои особенности и закономерности. Оценка его эффективности и перспектив практического применения требует проведения дополнительных исследований;

- возможности повышения эффективности МАО за счет изменения конструктивных факторов, не связанных с повышением энергоемкости оборудования и усложнением устройств, в настоящее время изучены недостаточно;

- одна из важнейших характеристик МАО – кинематика процесса – исследовалась лишь для определенной части схем применительно к обработке цилиндрических и сферических поверхностей;

- недостаточно изучен вопрос МАО диамагнитных материалов (особенно цветных сплавов) и влияния концентраторов магнитного потока на эффективность МАО.

## Литература

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 376 с.
2. Григорьев, С. Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии / С. Н. Григорьев, Е. В. Смоленцов, М. А. Волосова. – Старый Оскол : ТНТ, 2012. – 280 с.
3. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.
4. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1986. – 176 с.
5. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с.
6. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 232 с.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ, РАБОТАЮЩИХ В ВОДЕ

**А. Е. Марченко, В. А. Пракапович**

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

Научный руководитель В. П. Кириленко

*Представлена установка для проведения испытаний, максимально приближенных к условиям эксплуатации узлов трения уплотнительных элементов насосов, реализующая трение вращения торцов двух полых цилиндрических образцов при коэффициенте взаимного перекрытия равном единице. Установка позволяет осуществлять синхронную запись силы трения, температуру смазывающей жидкости, а также дает возможность фиксировать момент образования течи жидкости через уплотнительное соединение. Описан метод определения линейного износа полимерных образцов путем создания искусственных баз.*

**Ключевые слова:** полимерные материалы, сила трения, искусственная база, стенд.

Торцовые уплотнения конструктивно состоят из корпуса, двух контактных колец, образующих пару трения. Одно кольцо соединено с вращающимся валом, а второе – с неподвижным корпусом уплотнительного узла. Контактные кольца поджаты упругим элементом, обеспечивающим постоянное усилие в сопряжении. Герметичность в неподвижных и аксиально-подвижных соединениях обеспечивается кольцами круглого сечения или манжетами, выполненными из эластичного материала.

Для проведения испытаний, максимально приближенных к условиям эксплуатации узлов трения уплотнительных элементов насосов, был разработан стенд на базе вертикально-сверлильного станка, реализующей трение вращения торцов двух полых цилиндрических образцов при коэффициенте взаимного перекрытия равном единице. Установка позволила осуществлять синхронную запись силы трения, температуру смазывающей жидкости, а также позволила зафиксировать момент образования течи жидкости через уплотнительное соединение.

Сила трения измерялась индуктивным датчиком, ферромагнитный сердечник которого закреплен на двух опорах в виде плоских пружин, позволяющих перемещаться сердечнику только вдоль его оси и минимизировать механический гистерезис. Запись сигнала с индуктивного датчика силы трения в течение всего времени испытания осуществлялась на самопишущем потенциометре. Температура смазывающей среды измерялась хромель-копелевой термопарой и регистрировалась потенциометром.

Перед проведением испытаний нагрузочное устройство и устройство для регистрации силы трения тарировались. Для исследования фрикционных характеристик при заданной температуре смазочной среды стенд оборудовался нагревательным элементом и устройством, позволяющим осуществлять капельный долив смазочной жидкости для компенсации испаряющейся с целью поддержания объема жидкости на постоянном уровне в течение всего периода испытаний. Износ исследуемых образцов определялся гравиметрированием на аналитических весах с точностью  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  г и контролировался методом искусственных баз при использовании оптического микроскопа.

Общий вид разработанного стенда представлен на рис. 1.

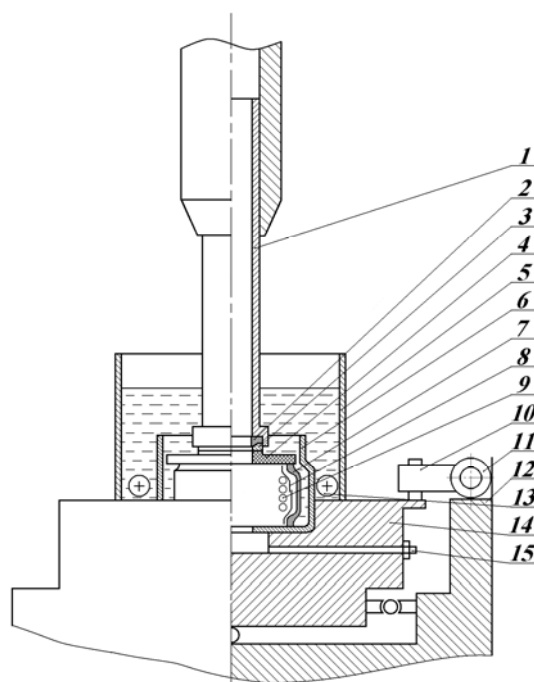


Рис. 1. Общий вид стенда:

- 1 – державка; 2 – резиновое кольцо; 3 – контртело;  
 4 – исследуемый образец; 5 – рабочая камера; 6 – обойма;  
 7 – резиновый кожух; 8 – оправка; 9 – пружина; 10 – упор;  
 11 – индуктивный датчик; 12 – корпус; 13 – нагревательный элемент; 14 – платформа; 15 – штуцер

Цилиндрический образец исследуемого материала 4 и контртела 3 при помощи рычажного устройства нагружения приводятся в контакт друг с другом в стеклянной рабочей камере 5, наполненной водой или другой исследуемой жидкостью. Для плотного контактирования рабочих поверхностей используется компенсирующее пружинное устройство, которое состоит из пружины 9, заключенной в металлическую оправку 8, а для предотвращения протекания смазки во внутреннюю полость цилиндров, закрывается резиновым кожухом 7. Контртело 3 устанавливается в державку 1, которая крепится в шпинделе вертикально-сверлильного станка, а крутящий момент передается через резиновое кольцо 2 за счет силы трения. Исследуемый образец фиксируется в обойме 6 от поворота вокруг своей оси за счет специально сделанных выточек. В камере предусмотрен нагревательный элемент 13, посредством которого можно поддерживать требуемую температуру. Рабочая камера 5 уста-



новлена на свободно вращающейся платформе 14, сила сопротивления вращению оценивается индуктивным датчиком 11, закрепленным на корпусе 12, сердечник которого жестко связан с упругим элементом и контактирует с упором 10.

Данный стенд позволяет быстро и точно устанавливать исследуемые образцы в исходное положение при длительных испытаниях, когда есть необходимость контроля рабочей поверхности в период испытания. При исследовании торцовых уплотнительных подшипников предусмотрен выход жидкости через специально сделанное отверстие 15 для контроля появления течи.

При выборе нагрузочно-скоростных режимов лабораторных испытаний на трение и износ материалов трибосопряжения основным требованием являлось максимальное приближение к условиям эксплуатации торцовых уплотнений.

Анализ режимов работы торцовых уплотнений насосов в системе охлаждения двигателей внутреннего сгорания и погружных водяных насосов показал, что скорости скольжения достигают 3 м/с, а нормальные нагрузки находятся в пределах 0,1÷4 МПа.

Исследование проводилось при скорости скольжения 2,7 м/с и удельной нагрузке 1 МПа. В процессе испытаний регистрировались: сила трения, температура, изменение массы полимерных образцов и контртела. Изменение массы полимерного и металлического образцов после высушивания определялось гравиметрированием на аналитических весах. Линейный износ определялся методом искусственных баз. Для металлического контртела использовали оптический микроскоп с рабочим увеличением  $2 \times 10^3$  для определения изменения отпечатка до и после фрикционных испытаний полученного алмазной пирамидой. С последующим пересчетом в линейный износ ( $\Delta h$ ).

Для полимерного образца искусственная база делалась путем проточки пояска глубиной  $0,1 \div 0,2$  мм и шириной 1 мм, как показано на рис. 2.

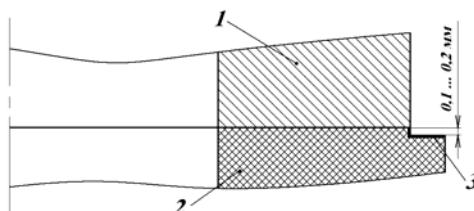


Рис. 2. Схема проточки пояска на полимерном образце:  
1 – стальное контртело; 2 – полимерный образец;  
3 – проточка под искусственную базу

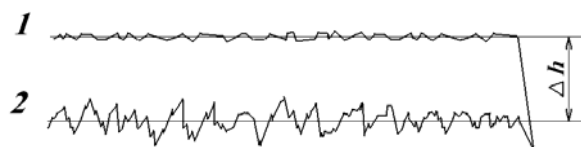


Рис. 3. Оценка износа полимерного образца профилографированием поверхности трения:  
1 – профилограмма до испытаний на трение;  
2 – профилограмма после испытаний

Линейный износ исследуемого полимерного образца определяли по профилограммам, проведенным перпендикулярно к направлению скольжения, до и после испытаний на износ. Об износе судили по расстоянию между средними линиями профилей изношенной и неизношенной поверхностями (рис. 3).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАППАРАТОВ ЗОЛОТНИКОВОГО ТИПА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИХ РАБОТЫ

Ю. И. Железнякова

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Усовершенствование гидроприводов мобильных и технологических машин сопровождается повышением требований по эффективности, безопасности и долговечности систем управления и их аппаратному обеспечению. Такие приводы во многом определяют динамические характеристики работы как отдельных гидроагрегатов, так и всей системы в целом. Однако несмотря на многочисленные исследования, еще не решена проблема выбора оптимальных проектных параметров для улучшения динамических показателей работы гидроаппаратов. Целью данной работы является выявление определения и оптимизации основных параметров элементов гидроклапана золотникового типа, влияющих на динамические характеристики его работы.

**Ключевые слова:** золотник, гидроаппарат, оптимизация работы, конструктивные параметры, динамика работы.

Для оптимизации работы гидроаппарата золотникового типа необходимо правильно определить усилия, необходимые для перемещения золотника. Положение золотника в таких устройствах зависит от баланса сил, действующих на него со стороны потока рабочей жидкости при обтекании золотника (гидродинамическая), сил трения, действующих на поверхности золотника, и сил, преодолевающих инерцию золотника (рис. 1) [1].

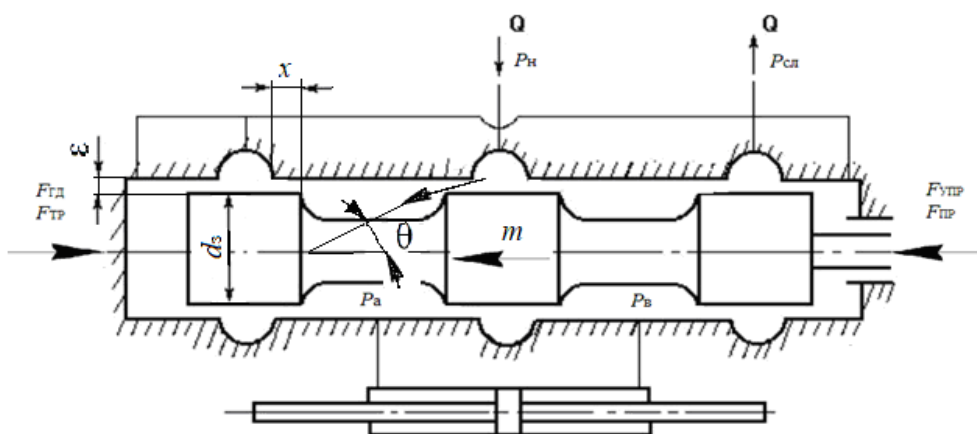


Рис. 1. Направление действия сил на золотник

Силы трения разделяются на силы сухого и жидкостного трения. Величина силы сухого трения зависит от давления рабочей жидкости в системе, а также от правильности геометрических форм золотника и гильзы и соосности их расположения. Кроме того, трение зависит от продолжительности пребывания золотника в покое. Из-за наличия малых зазоров между элементами золотниковой пары увеличение

пребывания золотника в неподвижном состоянии возникают значительные силы трения покоя, сопровождающиеся облитерацией (заращиванием) зазоров, что препятствует страгиванию и перемещению золотника. При облитерации щели происходит сращивание адсорбированными слоями молекул поверхностей золотниковой пары. В этих случаях для того, чтобы сдвинуть золотник, необходимо приложить усилие, способное разрушить слои из молекул, связывающие поверхности золотника и расточки в корпусе гидроаппарата.

При недостаточной твердости материала корпуса гидроклапана и золотника повышение давления рабочей жидкости может вызвать их деформацию, что приведет к механическому защемлению золотника. С целью предотвращения деформации деталей применяют плавающие золотники, которые располагаются в корпусе гидроклапана с небольшим зазором. Для этой же цели на поверхности деталей золотниковой пары наносятся специальные покрытия, которые препятствуют возникновению схватывания металлов золотника и корпуса гидроаппарата.

Силы жидкостного трения характеризуются касательными напряжениями, возникающими на поверхностях золотниковой пары. При наличии зазора между золотником и гильзой касательные напряжения могут возникать как при относительном движении золотника, так и при движении рабочей среды. Силы жидкостного трения зависят от площади поверхности золотниковой пары, скорости перемещения золотника и скорости течения рабочей среды, величины зазора между элементами золотниковой пары, а также от вязкости рабочей жидкости, т. е. от давления и температуры рабочей среды.

Для уменьшения сил трения применяют золотники, совершающие поступательные или поворотные вибрационные (осциллирующие) колебания небольшой амплитуды (0,01–0,1 мм) и высокой частоты (около 50 Гц), в результате чего силы трения резко снижаются, хотя амплитуда колебаний золотника, вследствие высокой частоты, близка к нулевой [2].

Полную силу трения можно определить по зависимости

$$F_{\text{ТР}} = F_{\text{ТР.С}} + F_{\text{ТР.Ж}} = F_{\text{ТР.С}} \cdot \text{sign} \frac{dx}{dt} + \nu \rho \frac{A_{\text{max}}}{\varepsilon} \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{ТР.С}}$  – силы сухого трения;  $F_{\text{ТР.Ж}}$  – силы жидкостного трения;  $x$  – величина перемещения золотника;  $\nu$  – вязкость рабочей жидкости;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости;  $A_{\text{max}}$  – площадь дроссельной щели, перекрываемая золотником;  $\varepsilon$  – радиальный зазор между золотником и корпусом распределителя.

Силы со стороны потока рабочей жидкости при обтекании золотника (силы давления) разделяются на гидростатические и гидродинамические. Гидростатические силы возникают от действия давления на неподвижный золотник при покоящейся или движущейся с очень малыми скоростями рабочей среды.

Гидродинамические силы (осевые) обусловлены действием давления при движении золотника или при движении рабочей среды. Действия сил давления эквивалентны силе жидкостного трения и аналогично силе пружины стремятся вернуть золотник в нейтральное положение. Сначала гидродинамическая сила возрастает с увеличением перемещения золотника, а затем падает до нуля, что приводит к возникновению автоколебаний золотника, а впоследствии и системы в целом. Величина гидродинамической силы зависит от изменения угла отклонения потока рабочей

среды от оси золотника, а также от правильности геометрических форм элементов золотниковой пары, от величины зазоров между ними и от давления в системе. У одного и того же золотника угол отклонения потока рабочей жидкости от оси золотника может быть различным при разных значениях величины смещения золотника от нейтрального положения. Кроме того, при протекании через каналы гидроаппарата абсорбированные молекулы рабочей жидкости могут прилипнуть к поверхностям элементов деталей золотниковой пары, что также будет влиять на изменение величины гидродинамической силы [3].

Для уменьшения сил давления на золотник применяют метод компенсации, при котором золотнику и расточке в корпусе гидроаппарата придают форму обратного конуса, что обеспечивает встречное направление действия гидродинамических сил на золотник при обтекании его буртов потоком рабочей жидкости.

Полная сила давления определяется по зависимости:

$$F_{ГД} = 2 \cdot \mu^2 \cdot \pi \cdot d_3 \cdot x \cdot \cos \theta (P_n - P_A + P_B - P_{сл}), \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода жидкости в окне распределителя;  $d_3$  – диаметр золотника;  $\theta$  – угол наклона вектора гидродинамической силы к оси золотника;  $P_n, P_A, P_B, P_{сл}$ , соответственно – давление жидкости перед распределителем, на входе в трубопровод высокого давления и на выходе трубопровода низкого давления, в сливном канале.

Таким образом, можно выделить основные конструктивные параметры золотника, непосредственно влияющие на динамику работы гидроаппарата золотникового типа:

- размеры и форма элементов золотниковой пары;
- относительная величина зазора между элементами золотниковой пары;
- правильность геометрических форм рабочих окон золотника и гидроаппарата и соосность их расположения;
- длина рабочей полости запорно-регулирующего элемента гидроаппарата;
- давление рабочей жидкости в системе;
- жесткость упругого элемента в конструкции гидроаппарата, применяемого для возвращения золотника в нейтральное положение.

#### Литература

1. Железнякова, Ю. И. Расчет золотникового гидрораспределителя с улучшенными динамическими характеристиками / Ю. И. Железнякова, Д. Л. Стасенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; редкол.: А. А. Бойко [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 41–43.
2. Лаевский, Д. В. Рекомендации по проектированию направляющих аппаратов / Д. В. Лаевский, Д. Л. Стасенко // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 20–21 окт. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого»; под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – С. 63–64.
3. Свойкин, А. О. Уменьшение гидродинамической силы в гидрораспределителе путем модернизации деталей золотниковой пары / А. О. Свойкин // Науч.-техн. вестн. Брян. гос. ун-та. – 2021. – № 4. – С. 356–367.

## РАЗРАБОТКА ГИДРОСИСТЕМЫ С ОБЪЕМНОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Е. В. Хазеев

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Рассмотрена гидросистема с объемной адаптацией к нагрузке с улучшенными показателями энергоэффективности основных потребителей. Использование перепада давления между линиями максимального, промежуточного и минимального давления в системе обеспечивает дополнительный запас величины давления. Данная особенность позволяет уменьшить потери на регуляторе насоса при работе потребителей с низкими и средними нагрузками. Из проведенного эксперимента на базе колесного погрузчика приведен пример использования вспомогательного блока с аккумулятором в исследуемой гидросистеме для улучшения динамических характеристик работы основных потребителей.

**Ключевые слова:** гидросистема, объемная адаптация к нагрузке, энергоэффективность.

В современных мобильных машинах наиболее часто применяются гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке. В данных гидросистемах насос подает требуемую величину рабочей жидкости на основные потребители в заданный момент времени, тем самым подстраиваясь под внешнюю нагрузку, возникающую на них. Величина давления адаптируется к наибольшей величине нагрузки на потребителях, а потери на регуляторе насоса имеют минимальные значения, тем самым позволяя данным гидросистемам быть более эффективными при использовании, следовательно, исследования, направленные на изучение энергоэффективности данных гидросистем, являются перспективной и актуальной задачей [1].

Целью настоящей работы является разработка гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке, обладающей улучшенными характеристиками энергоэффективности.

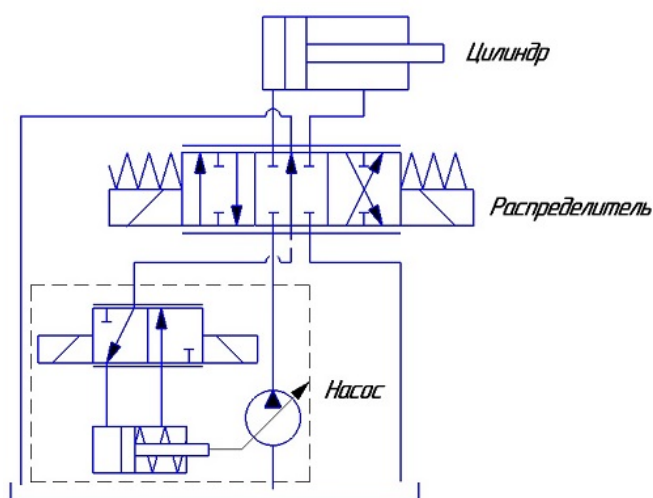


Рис. 1. Принципиальная схема гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке

Гидросистема с объемной адаптацией к нагрузке (рис. 1) является на порядок более энергоэффективной по сравнению с гидросистемами с дроссельным или клапанным регулированием, однако при одновременном использовании в данной системе двух и более потребителей, на которых возникают разные величины внешней нагрузки, в системе появляются большие потери, особенно при работе мобильных машин на низких или средних величинах давления.

Одним из решений устранения данного недостатка и улучшения эффективности работы гидросистемы является установка в систему дополнительного вспомогательного блока с заданным уровнем давления, который расположен между напорной и сливной линиями (рис. 2).

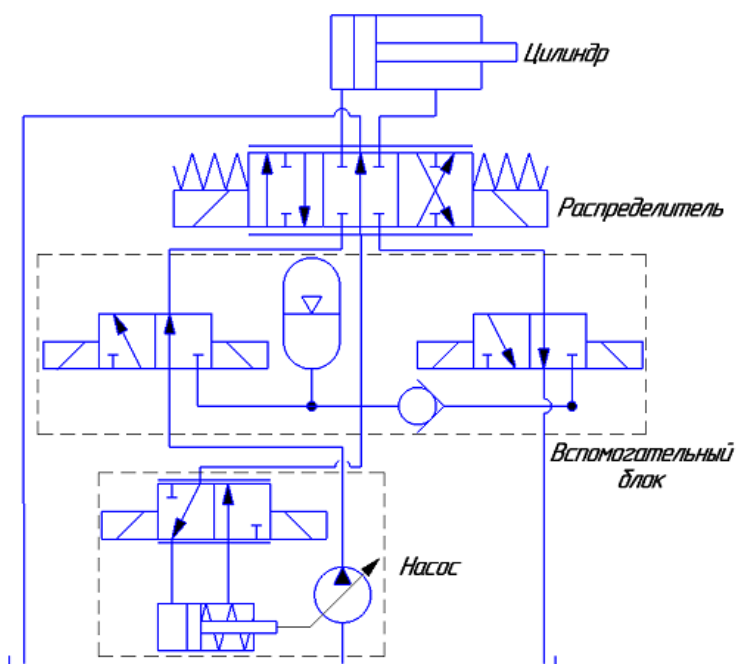


Рис. 2. Принципиальная схема гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке с улучшенными характеристиками энергоэффективности

Для анализа энергоэффективности исследуемой гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке данная система была теоретически применена в прототипе колесного погрузчика, на валу двигателя которого установлены два изолируемых гидравлических контура: замкнутый контур для работы привода и разомкнутый контур, который включает в себя гидросистему с объемной адаптацией к нагрузке, которая питает цилиндры наклона (подъема) и рулевого управления машины. В данной работе исследуемая гидросистема проанализирована с точки зрения работы цилиндра наклона (подъема) ковша. Для определения энергоэффективности гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке со встроенным вспомогательным блоком с линией промежуточного давления был рассмотрен полный цикл работы колесного погрузчика и выполнен его энергетический анализ [2].

Для исследования энергоэффективности гидросистемы был выбран рабочий цикл машины – загрузка (разгрузка). Работа погрузчика по загрузке инертных материалов в ковш и транспортировке к месту разгрузки состоит из пяти стадий:

1) погрузчик перемещается из начального положения (точка А) к инертному материалу (точка Б). Ковш погрузчика опущен и выровнен по уровню земли;

2) инертный материал загружается в ковш. Погрузчик начинает движение к месту разгрузки (точка В);

3) погрузчик прибыл к месту разгрузки (точка В), ковш поднимается на максимальную величину для выгрузки инертного материала в транспортное средство;

4) ковш находится над кузовом транспортного средства и начинает опускаться за счет работы цилиндра, в результате инертный материал загружается в транспортное средство;

5) по завершению разгрузки погрузчик возвращается в начальное положение (точка А), ковш опускается и выравнивается по уровню земли.

Описанный рабочий цикл за одну смену работы машины в реальных условиях повторяется около 90 раз.

Результат работы базовой гидросистемы и гидросистемы с улучшенными характеристиками энергоэффективности представлен на рис. 3.

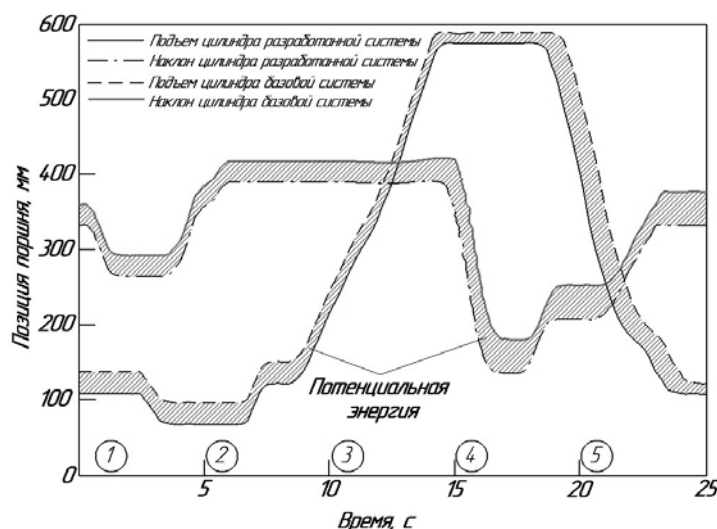


Рис. 3. График рабочего цикла машины

В ходе анализа одного усредненного рабочего цикла погрузчика выявлено, что в базовой гидросистеме с объемной адаптацией к нагрузке мощность насоса состоит из двух составляющих: первая подводится к потребителю системы, а вторая представляет собой потери мощности за счет постоянной разницы перепада давления около 2 МПа. Таким образом, в базовой гидросистеме с объемной адаптацией к нагрузке входная энергия равна мощности насоса, поскольку гидросистема является однопоточной, а выходная энергия складывается из затрачиваемой мощности, необходимой для подъема груза и потерь мощности на дросселирование, входная энергия и выходная энергия всегда находятся в равновесии. В свою очередь в разработанной гидросистеме с объемной адаптацией к нагрузке за счет использования перепада давления между линиями максимального, промежуточного и минимального давления в системе обеспечивается дополнительный запас величины давления. Данная особенность позволяет уменьшить потери на регуляторе насоса при работе потребителя на низких и средних нагрузках, тем самым улучшая показатели энергоэффективности работы всей системы мобильной машины.

В разработанной гидросистеме с объемной адаптацией к нагрузке за счет добавления вспомогательного блока были улучшены характеристики энергоэффективности. Исходя из теоретического анализа, энергоэффективность работы разработанной гидросистемы повышается в зависимости от режимов эксплуатации мобильной машины по сравнению с базовой гидросистемой с объемной адаптацией к нагрузке.

#### Литература

1. Stasenko, D. Comparative analysis of load-sensing hydraulic systems for mobile machines / D. Stasenko, A. Hinzburh, Y. Khazeyeu // Scientific-technical union of mechanical engineering "INDUSTRY 4.0" : VI International scientific conference winter session, Borovets, 08–11 December 2021. – Borovets, 2021. – P. 189–192.
2. Гидросистема мобильной машины : пат. RU 2276237 С2 / Баторшин В. П., Голоскин Е. С., Петров А. М. ; опубл. 10.05.2004. – 8 с.

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА НАМОТОЧНОГО УСТРОЙСТВА ПО ПРОИЗВОДСТВУ ПОЛИЭФИРНЫХ НИТЕЙ В ПРОГРАММЕ AMESIM

А. С. Колодко

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

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

*Исследованы возможности применения программы LMS Imagine.Lab Amesim для моделирования гидравлических систем при предварительном определении параметров гидропривода без построения опытного образца и проведения испытаний, что позволяет оптимизировать схемотехническое решение и корректировать параметры на этапе проведения опытно-конструкторских работ. Произведено имитационное моделирование гидравлического привода рабочих органов намоточного устройства по производству полиэфирных нитей, определены параметры отдельных элементов гидропривода при заданных нагрузочных и скоростных режимах рабочих органов.*

**Ключевые слова:** гидропривод, моделирование, автоматическая линия, LMS Imagine.Lab Amesim.

Целью данной работы является имитационное моделирование гидросистемы намоточного устройства, проверка работоспособности гидравлической системы, а также графическая интерпретация движения конечных потребителей.

Гидравлическая система намоточного устройства представлена на рис. 1. Основные значения системы были предварительно определены при проведении конструкторского проектирования гидропривода:  $Q = 30$  л/мин;  $P = 12,5$  МПа,  $D_{Ц1, Ц2} = 63$  мм;  $D_{Ц3, Ц4} = 50$  мм;  $D_{Ц5, Ц6} = 80$  мм;  $d_{шт Ц1, Ц2} = 45$  мм;  $d_{шт Ц3, Ц4} = 36$  мм;  $d_{шт Ц5, Ц6} = 50$  мм.

В программе LMS Imagine.Lab Amesim имеется стандартная библиотека компонентов, которая позволяет на основе имеющихся элементов собирать недостающие.

В результате замены элементов получаем исследуемую схему (рис. 2), задаем также основные параметры системы как диаметры поршней и штоков, расход и давление (рис. 3, а), и параметры управления для каждого элемента (рис. 3, б):



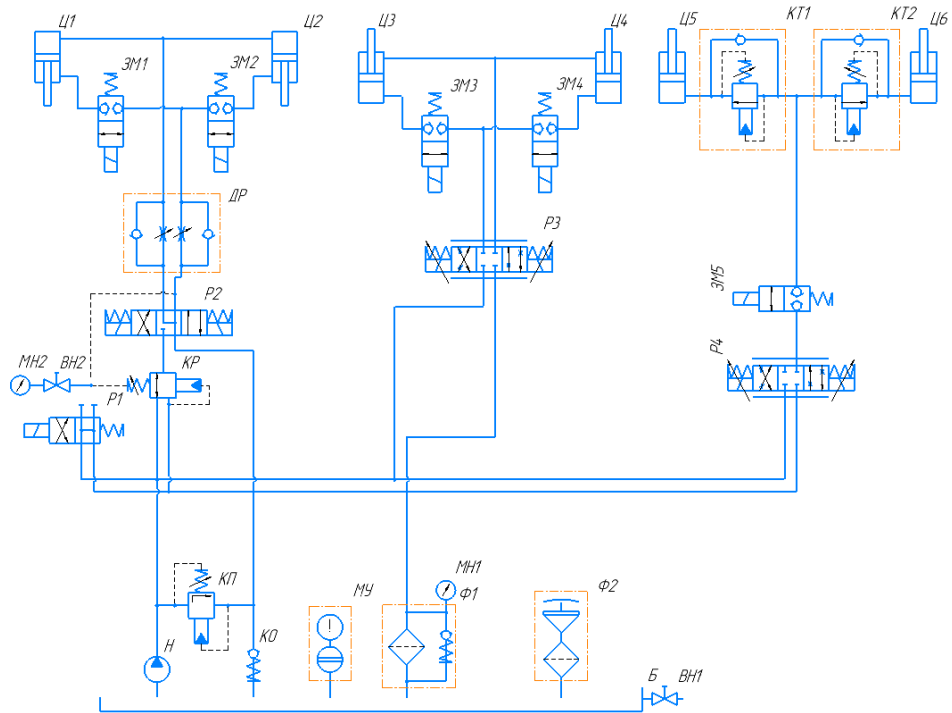


Рис. 1. Схема гидравлическая принципиальная

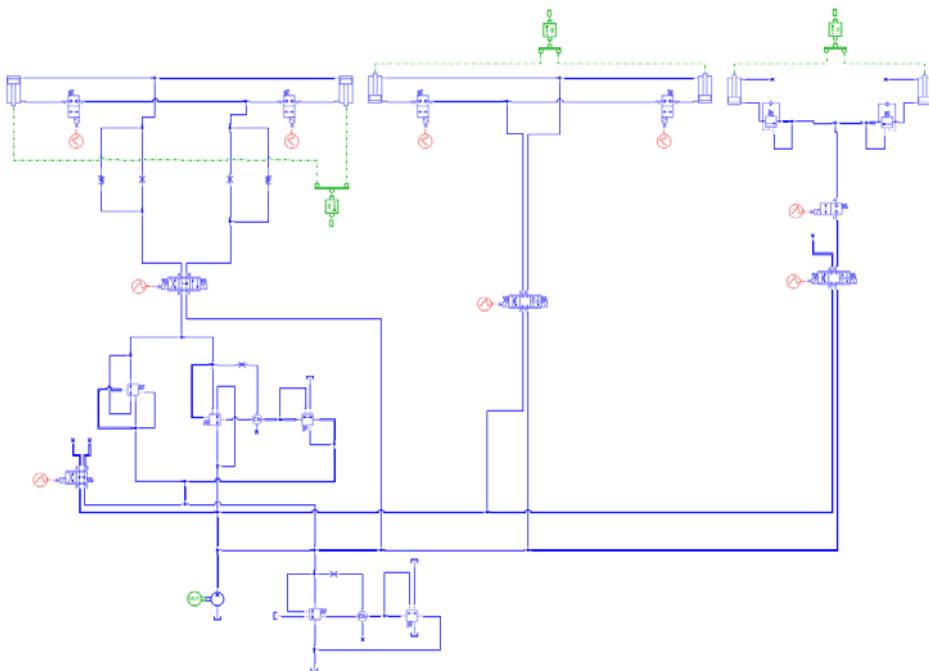


Рис. 2. Имитационная модель гидравлической схемы намоточного устройства

Parameters of actuator001_1 [HJ020-1]					Parameters of piewiseliner_7 [UD00-8]				
Title	Value	Unit	Tags	Name	Title	Value	Unit	Tags	Name
# pressure at port 1	0	bar		p1	number of stages	3			nstages
# pressure at port 2	0	bar		p2	cyclic	no			iscyclic
index of hydraulic fluid	0			indexf	time at which duty cycle starts	0	s		tstart
use initial displacement	no			usedispl	output at start of stage 1	-40	null		start1
piston diameter	63	mm		diamp	output at end of stage 1	-40	null		end1
rod diameter	45	mm		diamr	duration of stage 1	5	s		t1
length of stroke	0.8	m		stroke	output at start of stage 2	40	null		start2
dead volume at port 1 end	50	cm**3		dead1	output at end of stage 2	40	null		end2
dead volume at port 2 end	50	cm**3		dead2	duration of stage 2	5	s		t2
viscous friction coefficient	0	N/(m/s)		visc	output at start of stage 3	0	null		start3
leakage coefficient	0	L/min/bar		leak	output at end of stage 3	0	null		end3
spring rate at endstops	100000	N/mm		k	duration of stage 3	5	s		t3
damping coefficient on endstops	100000	N/(m/s)		cdamp					
deformation on endstops at which damping rate is fully effec...	0.001	mm		distdef					

а)

б)

Рис. 3. Окно параметризации:

а – окно параметров цилиндра; б – окно параметров сигнала на распределители

После симуляция получаем графические характеристики расхода жидкости, давления и перемещения штока от времени работы гидродвигателя (рис. 4).

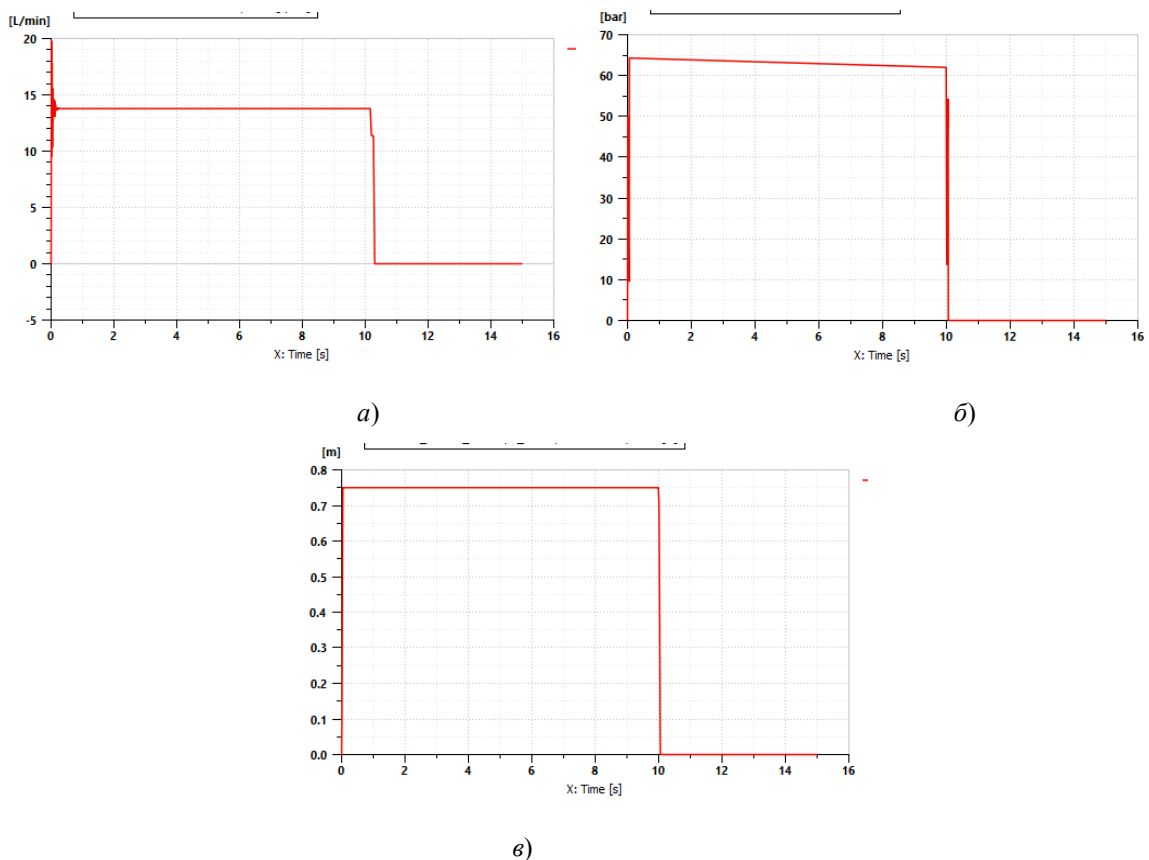


Рис. 4. Графические характеристики работы гидроцилиндра:

а –  $Q = f(t)$ ; б –  $P = f(t)$ ; в –  $x = f(t)$

В данной работе было проведено имитационное моделирование гидравлического привода рабочих органов намоточного устройства для производства полиэфирных нитей. При моделировании использовались стандартные элементы из библиотеки программы, а также были созданы и новые, характерные для схмотехнического решения исследуемого гидропривода. Произведен также анализ работоспособности гидросистемы при заданных нагрузочных и скоростных режимах работы выходных звеньев. Определено, что параметры работы гидродвигателей, полученные в результате симуляции в программе LMS Imagine.Lab Amesim, аналогичны результатам, полученным расчетным путем при проектировании гидропривода.

#### Литература

1. Гимадиев, А. Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах / А. Г. Гимадиев, П. И. Грешняков, А. Ф. Сиянов. – Самара : СамНЦ РАН, 2014. – 138 с.
2. Колодко, А. С. Моделирование гидравлической системы с адаптацией к нагрузке в программе LMS Imagine.Lab AMESim / А. С. Колодко, Ю. А. Андреевец // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, Таиз. ун-т ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – Ч. 1. – С. 72–75.

### **К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ АГРЕГАТОРА ЦИФРОВОГО БУРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН (НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИН МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА)**

**Н. В. Бочаров, Т. В. Атвиновская**

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

**Д. С. Матвеев**

*Республиканское унитарное предприятие «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Речица*

Научный руководитель В. М. Ткачев

*Рассмотрены вопросы цифровизации нефтегазовой отрасли, в частности в области бурения скважин. Описаны основные принципы работы агрегатора цифрового бурения на основе микросервисной платформы «Унофактор», а также рассмотрены понятия ключевых показателей эффективности и скрытого непроизводительного времени. Представлен опыт применения агрегатора цифрового бурения на скважинах белорусских нефтяных месторождений.*

**Ключевые слова:** цифровизация, цифровое бурение, агрегатор цифрового бурения, цифровое месторождение, скрытое непроизводительное время.

В мире высоких технологий не прекращается гонка на опережение, в которой участвуют высокотехнологичные компании, претендующие на роль лидеров в своей области рынка. В области строительства скважин у недропользователя и буровой компании неизменными остаются две ключевые задачи: обеспечить безаварийность проведения работ и снизить стоимость строительства скважины. Для решения задач безаварийности и оптимальной стоимости скважин используются такие контролируемые сервисы, как геолого-технологические исследования (ГТИ), удаленный мониторинг, видеонаблюдение и т. д. [1]. Во всем мире (и особенно в Беларуси) актив-

но наращивается фонд скважин для поисков, разведки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Строительство скважины – это очень дорогостоящий процесс, поэтому задача сокращения затрат путем мониторинга эффективности ее бурения с применением новых цифровых решений является актуальной задачей.

Целью данной статьи является рассмотрение опыта и дальнейших перспектив применения агрегатора цифрового бурения (АЦБ) на скважинах белорусских нефтяных месторождений, тем самым реализуя программу внедрения цифровых технологий в различные отрасли промышленности Республики Беларусь.

Агрегатор цифрового бурения является программным обеспечением, разработанным ООО НПО «Союзнефтегазсервис». Агрегатор функционирует на основе цифровой микросервисной платформы «Унофактор», предназначенной для решения задач интерактивного управления нефтегазовым месторождением на базе технологий «Индустрии 4.0». Целевое предназначение АЦБ – автоматический контроль сроков выполнения строительных работ, соответствие плану, выявление скрытого непроизводительного времени (СНПВ).

Ежедневно со скважин поступают суточные отчеты (рапорты) бурового мастера и супервайзера, которые дополняются полученными в реальном времени данными ГТИ. Поскольку данные представлены в различных форматах, на первом этапе выполняется распознавание и интеграция полученной информации в единой системе хранения. После этого происходит автоматизированная обработка полученных данных: определяются технологические этапы, производится расчет различных ключевых показателей эффективности (КПЭ) и баланса СНПВ [2]. Для анализа КПЭ устанавливается своя адекватная цель (норма), в зависимости от которой, рассчитывается потенциал экономии времени по каждой из операции в процессе бурения.

Скрытое непроизводительное время – это неэффективное время работы буровых бригад в пределах производительного времени. Оно рассчитывается как разница между фактическим временем выполнения операции и установленной нормой [3]. Скрытое непроизводительное время подвержено влиянию двух основных факторов: конструкции и эффективности наземного оборудования и оптимизации технологического процесса, также это и эргономическая неэффективность человека, связанная с этими факторами. То есть это время – потерянное, так как часть буровых операций выполняется не с максимальной эффективностью.

На основании изучения процесса строительства скважины авторами статьи был разработан вариант интеграции АЦБ в РУП ПО «Белоруснефть», который представлен на рис. 1.

Для апробации АЦБ на белорусских объектах были выбраны три скважины Речицкого месторождения Припятского прогиба. В ходе обработки скважинных данных были выявлены следующие две основные проблемы: относительно низкое качество данных ГТИ, отсутствие для каждой скважины детальных норм на все технологические операции и подробной режимно-технологической карты. Эти две достаточно серьезные проблемы не позволяют, во-первых, в автоматизированном режиме произвести определение технологических операций на всем протяжении бурения и, во-вторых, произвести расчет эффективности и аналитику строительства данной скважины.

Далее представлены аналитические экранные формы (рис. 2) определения СНПВ в операции бурения скважин РУП ПО «Белоруснефть». Проводилось сравнение фактической механической скорости с ее нормой на определенном интервале бурения, причем расчет СНПВ в данном случае проводился только за сутки с наиболее представительными данными ГТИ. Отбраковка данных проводилась при сравнении суточных рапортов супервайзера, непосредственно наблюдавшего за процессом

бурения, с результатами автоматизированного определения технологических операций АЦБ. Скрытое непроизводительное время рассчитывалось для роторного и направленного бурения по отдельности, также с разделением по вахтам.

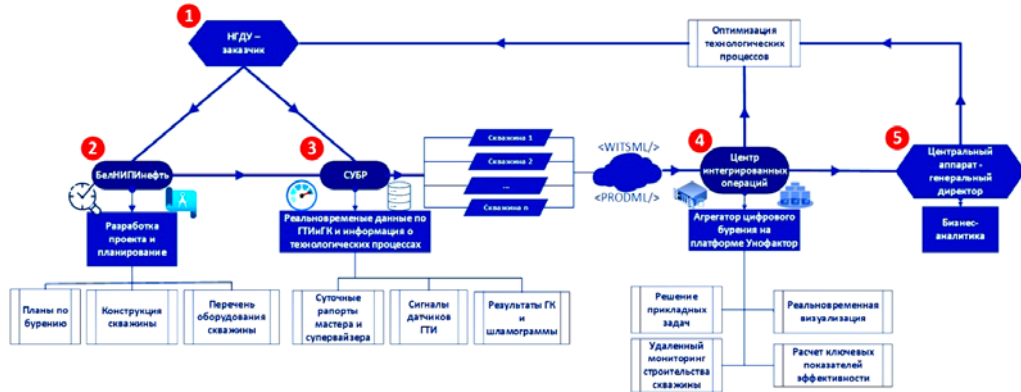


Рис. 1. Функциональная схема движения данных при строительстве скважин на примере Республиканского унитарного предприятия «Производственное объединение «Белоруснефть»



Рис. 2. Соотношение скрытого непроизводительного времени и производительного времени бурения по параметру механической скорости за сутки представительных данных геолого-технического исследования (Речицкое месторождение): а – скважина 527; б – скважина 426; в – скважина 395

Таким образом, цифровизация различных технологических процессов является неотъемлемой частью развития современного предприятия. Одним из таких примеров является цифровизация бурения в нефтегазовой отрасли с помощью применения программного обеспечения, которое позволяет контролировать процесс сооружения скважины, а также производить анализ ключевых показателей эффективности ее строительства. По результатам апробации АЦБ применительно к скважинам белорусских месторождений можно сделать следующие выводы: для корректной работы АЦБ необходимо коренным образом изменить работу станций ГТИ, чтобы повысить качество исходных данных, а также разработать новые принципы составления оптимальных норм на основе анализа СНПВ.

*Работа выполнялась при программно-аппаратной поддержке ООО НПО СНГС, г. Москва, Российская Федерация.*

#### Литература

1. Косенков, С. О. Платформенный подход в решении задач строительства скважин / С. О. Косенков, В. Ю. Турчанинов, И. Кузнецов // Нефтегазовая вертикаль. – 2020. – № 9–10. – С. 95–98.
2. Турчанинов, В. Ю. Программная роботизация бизнес-процессов / В. Ю. Турчанинов // Открытые системы. СУБД. – 2019. – № 2. – Режим доступа: [www.osp.ru/os/2019/02/13054963](http://www.osp.ru/os/2019/02/13054963). – Дата доступа: 09.04.2023.
3. Иванов, Б. В. Особенности автоматизированной системы измерения и анализа эффективности процессов бурения – проНова Современный подход к анализу эффективности выполнения буровых работ / Б. В. Иванов // Бурение и нефть. – 2015. – № 10. – Режим доступа: [burneft.ru/archive/issues/2015-10/66](http://burneft.ru/archive/issues/2015-10/66). – Дата доступа: 09.04.2023.

## ПРЕИМУЩЕСТВА СИСТЕМ С АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ ПО СРАВНЕНИЮ С ГИДРОСИСТЕМАМИ ДРОССЕЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

М. А. Янковец

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

*Принцип Load Sensing (load sensing – «чувствующий нагрузку») применяется для гидравлических систем, в которых мгновенное давление нагрузки служит сигналом обратной связи для управляющего устройства, которое устанавливает необходимое давление насоса. Давление насоса поддерживается равным давлению нагрузки наиболее нагруженного потребителя плюс постоянное управляющее давление. С помощью компенсаторов давления поддерживается постоянный перепад давления на дросселях. Это и является основным принципом LS-системы. Система имеет хороший КПД даже при частичных нагрузках, так как насос дает расход и давление в соответствии с потребностью. Это ведет к снижению экономических затрат, ускоряет и упрощает рабочий процесс.*

**Ключевые слова:** гидравлические системы, адаптация к нагрузке, LS-системы, энергетическая эффективность.

Принцип Load Sensing (load sensing – «чувствующий нагрузку») применяется для гидравлических систем, в которых мгновенное давление нагрузки служит сигналом обратной связи для управляющего устройства, которое устанавливает необходимое давление насоса [1]. Давление насоса поддерживается равным давлению

нагрузки наиболее нагруженного потребителя плюс постоянное управляющее давление. С помощью компенсаторов давления поддерживается постоянный перепад давления на дросселях (рис. 1). Это и является основным принципом LS-системы. Система имеет хороший КПД даже при частичных нагрузках, так как насос дает расход и давление в соответствии с потребностью.

Целью работы является сравнительная характеристика насосов с LS-регулятором, особенности применения регуляторов насосов в системах с адаптацией к нагрузке, выявление достоинств и недостатков LS-системы.

Гидросистема LS может быть выполнена в двух вариантах: с открытым центром и нерегулируемым насосом (рис. 1) и закрытым центром и регулируемым насосом (рис. 2).

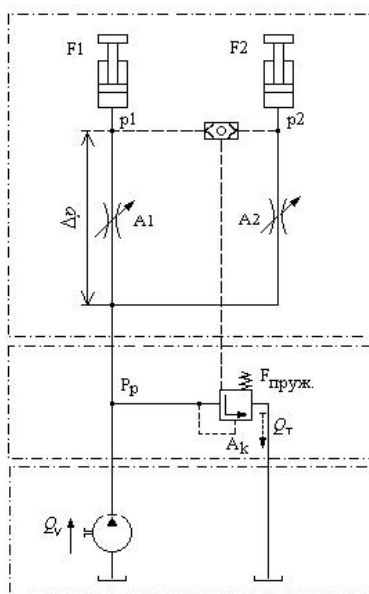


Рис. 1. Система LS. Закрытый центр с регулируемым насосом

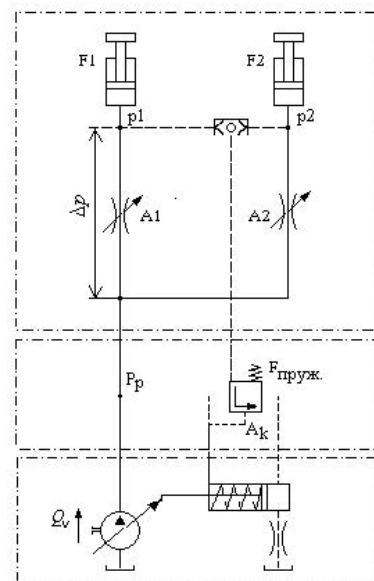


Рис. 2. Система LS. Открытый центр с нерегулируемым насосом

LS-система с открытым центром и нерегулируемым насосом имеет преимущество перед гидросистемой с открытым контуром и дроссельным регулированием (рис. 1).

При сравнении гидросистем [2] установлено, что наибольшая экономия энергии будет в LS-системе с закрытым центром и регулируемым насосом (рис. 2).

Системы с LS-регулированием имеют более высокий КПД и более высокую точность управления. На рис. 3 изображена гидросистема с открытым контуром и график энергетического баланса привода двух исполнительных механизмов с насосом постоянной производительности и без LS-регулирования.

На рис. 4 изображена гидросистема с нерегулируемым насосом постоянного рабочего объема с LS-регулированием. Нагрузка одинакова в двух системах (рис. 4, 5).

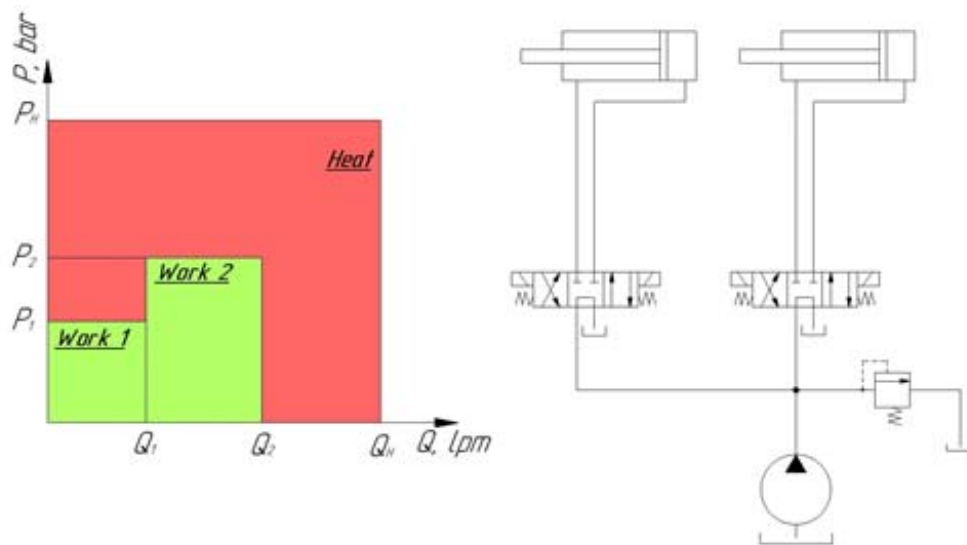


Рис. 3. Гидравлическая система открытого контура с дроссельным регулированием

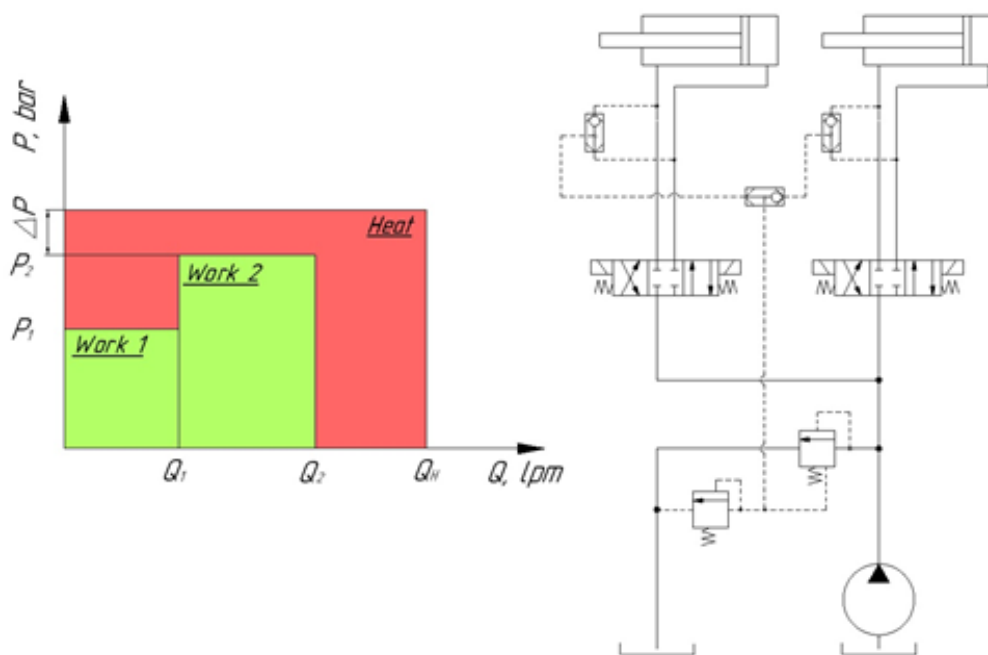


Рис. 4. Гидравлическая система с нерегулируемым насосом и LS-регулированием (открытый центр)

Вырабатываемая мощность в системе, представленной на рис. 4, в отличие от системы показанной на рис. 3, используется эффективнее, происходит меньше тепловых потерь [3].

Рассмотрим систему с регулируемым насосом и LS-регулированием (рис. 5).

В данной системе величина подачи насоса будет такой, которая необходима для работы исполнительных механизмов, а максимальное давление в насосе – минимальным. В данной системе почти вся вырабатываемая насосом мощность будет эффективно использоваться исполнительными механизмами и тепловые потери будут



минимальны. В основе принципа LS-управления лежит независимость распределения расхода от их давления нагрузки между исполнительными механизмами.

Машины с такой гидросхемой потребляют меньше топлива, меньше загрязняют окружающую среду, компоненты имеют больший ресурс. Требуется отводить в атмосферу меньше тепла, тогда сократятся затраты на охладители масла.

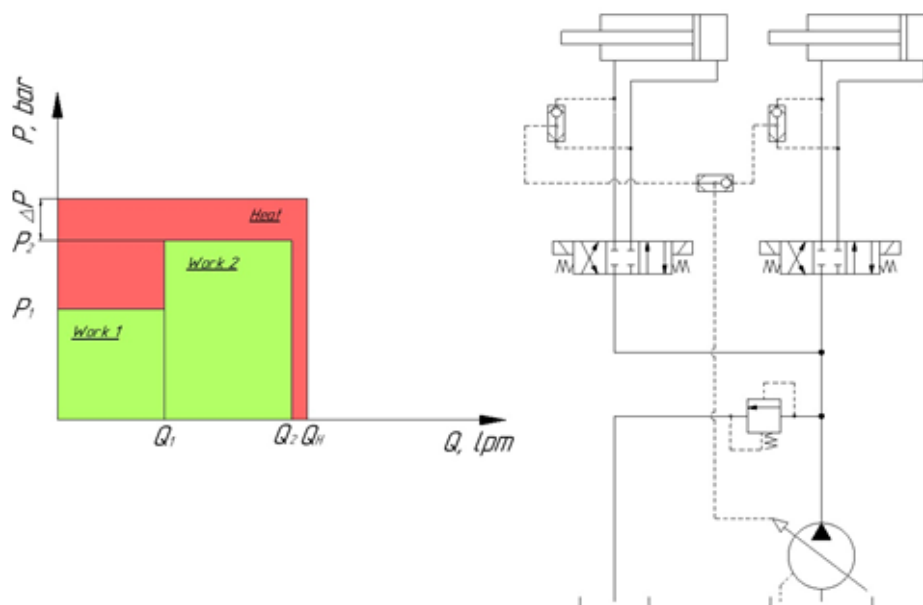


Рис. 5. Гидравлическая система с регулируемым насосом и LS-регулятором (закрытый центр)

В результате проведенных исследований установлено, что машины с гидравлической системой с LS-регулированием эффективнее расходуют мощность; потребляют меньше топлива; меньше засоряют окружающую среду; имеют больший ресурс гидравлических компонентов; более корректную и точную управляемость исполнительных механизмов; обладают энергоэкономичностью; повышают сроки между техобслуживанием оборудования и увеличивают сроки эксплуатации; снижают потери энергии; обладают пониженной шумностью по сравнению с гидросистемами дроссельного регулирования, применяемыми для большинства оборудования.

Анализ использования LS-систем показал, что повышается динамика всех подвижных частей гидропривода, существенно увеличивается общий КПД системы, что ведет к снижению экономических затрат, таким образом, ускоряется и упрощается рабочий процесс. Особое внимание в таких системах уделено безопасности рабочего процесса. Но при всех указанных достоинствах существенным недостатком является их стоимость.

#### Литература

1. Гинзбург, А. А. Дроссельное регулирование в гидросистемах и адаптация гидропривода к нагрузке (LS-принцип) : курс лекций / А. А. Гинзбург. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 77 с.
2. Петоченко, М. И. Влияние конструктивных особенностей регулятора насоса с адаптацией к нагрузке на его быстродействие / М. И. Петоченко, Д. Л. Стасенко // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Минск, 2017. – Вып. 6. – С. 282–286.

3. Стасенко, Д. Л. Сравнение однопоточных гидросистем с объемной и клапанной адаптацией к нагрузке по уровню потерь мощности / Д. Л. Стасенко, А. А. Гинзбург // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 3. – С. 67–74.

## **ЭКСПОРТООРИЕНТИРОВАННОСТЬ ОАО «МИНСКИЙ АВТОМОБИЛЬНЫЙ ЗАВОД» И ОАО «МИНСКИЙ ТРАКТОРНЫЙ ЗАВОД»**

**М. В. Ляховская, А. В. Лавриненко**

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

Научный руководитель И. П. Хомин

*Описана экспортоориентированность ОАО «Минский тракторный завод» и ОАО «Минский автомобильный завод». Рассмотрены статистические данные по экспорту за 2021 и 2022 гг., показан рост экспорта по сравнению с прошлым годом, выявлены ключевые задачи на 2023 г. Сделано предположение о том, как расширить рынки сбыта продукции заводов.*

**Ключевые слова:** экспорт, темп роста, объем грузооборота, спрос, сальдо внешней торговли.

Машиностроение занимает ведущее положение среди других хозяйственных комплексов. Это обусловлено тем, что основные производственные процессы во всех отраслях промышленности, строительства и сельского хозяйства выполняют разнообразные машины. Поэтому первостепенная роль в техническом перевооружении всего общественного производства нашей страны, повышении его технического уровня, улучшении качественных показателей всех сфер деятельности принадлежит машиностроению. Данная сфера в нашей стране имеет высокий технический и научный потенциал. Развитие белорусского машиностроения направлено на увеличение конкурентоспособности производимых изделий. Высокие показатели достигаются за счет внедрения в производство ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов, обновления и модернизации производства, максимально эффективного использования трудового, финансового ресурса. Ведущими в этой отрасли в нашей стране являются ОАО «Минский тракторный завод» (МТЗ) и ОАО «Минский автомобильный завод» (МАЗ).

Сегодня на МТЗ работает более 16000 человек, и это один из крупнейших производителей сельскохозяйственной техники не только в СНГ, но и во всем мире. На заводе создана система качества, соответствующая требованиям международных стандартов.

ОАО «Минский тракторный завод» разрабатывает, изготавливает и экспортирует колесные тракторы и запасные части к ним, организует на лицензионной основе их производство за рубежом, оказывает услуги по наладке и проведению сервиса поставленных машин, проводит обучение по эксплуатации и техническому обслуживанию выпускаемой техники [1].

В настоящее время МТЗ ведет активную деятельность на рынках более чем 60 государств и имеет сборочные производства в различных уголках планеты. Сборочное производство налажено в России, Азербайджане, Казахстане, Кыргызстане, Сербии и т. д.

В 2021 г. в дальнее зарубежье МТЗ экспортировал продукции на 41,6 % больше, чем в 2020 г. Увеличились поставки в Пакистан, Египет и Кубу. Темп роста экспорта в страны Европы превысил 120 %. В страны ближнего зарубежья экспорт продукции вырос на 20,4 %. На постсоветском пространстве в лидерах по объему Россия – туда поставлено более 13,5 тыс. единиц техники, в Казахстан – 4,1 тыс.

В 2022 г. МТЗ увеличил экспорт на 28,3 %. Статистика за 2022 г. позволила обнаружить, что в 2022 г. МТЗ продал 37,3 тыс. тракторов и машин, «МТЗ-ХОЛДИНГ» – 48,7 тыс. единиц техники, а на внутренний рынок было отправлено более 3,1 тыс. тракторов, на внешние рынки – 35,7 тыс. единиц техники. Темп роста экспорта составил 128,3 %. В Азербайджане, Зимбабве, Казахстане, России, Узбекистане были реализованы наиболее крупные контракты за 2022 г. В том числе подписан контракт с Гянджинским автомобильным заводом на поставку 950 тракторов BELARUS в несобранном виде на сумму 15,5 млн долл. США. Следует отметить, что техника поставлялась в страны, в которые в позапрошлом году отгрузок не было: Бенин, Того, Гвинея, ЮАР, Чехия и др. [2].

Результатом работы в 2023 г. должно стать как сохранение позиций на ключевых рынках, так и наращивание поставок по всем направлениям экспортной деятельности. В настоящее время спрос на продукцию очень хороший. Разработана стратегия до 2030 года. Планируется увеличить объем производства и выйти на более чем 60 тыс. тракторов в год, что потребует серьезных инвестиций и модернизации [3].

ОАО «Минский автомобильный завод» – управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ» – советская и белорусская автомобилестроительная компания, специализирующаяся на выпуске большегрузной автомобильной, а также автобусной, троллейбусной и прицепной техники. В 2013 г. специалистами БелАЗ была создана уникальная машина, самый большой карьерный самосвал в мире грузоподъемностью 450 т БелАЗ-75710.

В 2021 г. объем экспорта транспортных услуг был самый высокий в истории суверенной республики – 4,3 млрд долл. США. За 2021 г. совокупный объем грузооборота транспорта составил 119 млрд т · км, перевезено 385 млн т грузов. Рост грузооборота достигнут в результате освоения новых направлений и выстраивания логистических цепочек. Экспорт товаров составил около 5,3 млрд долл. США, темп роста – 135,5 %. Сальдо внешней торговли товарами положительное – 2,4 млрд долл. США [4].

В 2022 г. МАЗ вошел в ТОП-10 марок рынка новых грузовых автомобилей в России. Что касается реализации автобусов, МАЗ занимает 2-е место среди лидирующих марок производства автобусов на рынке России.

Спрос на автомобили МАЗ в январе – июне 2022 г. на российском рынке новых грузовиков снизился на 28,9 % по сравнению с аналогичным периодом 2021 г, что не помешало белорусскому производителю автотехники занять в полугодовом рейтинге 5-е место. Белорусский производитель грузовых машин реализовал в России в феврале 2022 г. 423 автомобиля (в феврале 2021 г. – 431)[5].

На 2023 г. в сфере автомобильного транспорта были поставлены две ключевые задачи – создание условий для международных перевозок грузов и рынок пассажирских перевозок.

На рис. 1 можно увидеть рост экспорта по сравнению с прошлым годом. Экспорт МТЗ имеет возрастающую тенденцию, а экспорт МАЗ, по сравнению с 2021 г., в 2022 г. сократился.

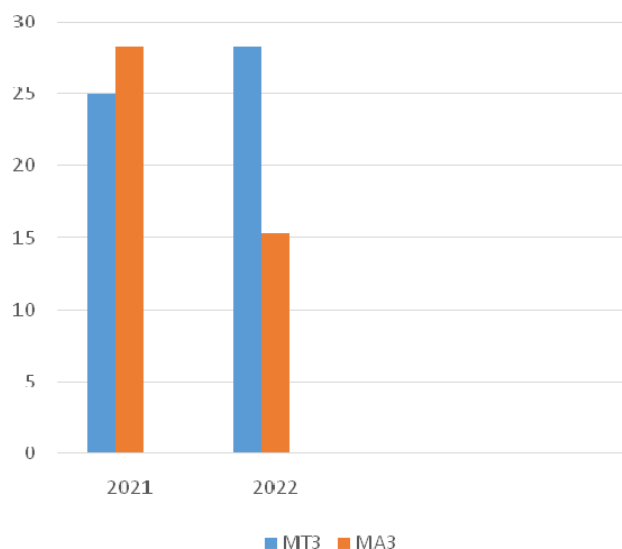


Рис. 1. Рост экспорта по сравнению с прошлым годом, %  
Примечание. Разработано на основе [3, 4].

В настоящее время основными элементами развития современного машиностроения является совершенствование средств производства, методов организации производства, переход к стандартизации, автоматизации и информационному обеспечению процессов.

Таким образом, следует отметить, что МАЗ и МТЗ продолжают завоевывать автомобильные рынки по всему миру, заключая многомиллионные контракты и являясь лидерами в своей отрасли. В тоже время заводы продолжают формулировать свои цели и стратегии развития на долгосрочную перспективу.

На основе изученной информации можно предположить, что расширение рынков сбыта техники можно достичь с помощью более эффективной рекламы, т. е. распространения информации всеми возможными способами (сеть Интернет, социальные сети, телевидение).

#### Литература

1. О холдинге «МТЗ-ХОЛДИНГ». – Режим доступа: <https://www.belarus-tractor.com/company/>. – Дата доступа: 01.04.2023.
2. МТЗ к 2030 году увеличит производство тракторов до 60 тыс. в год. – Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/mtz-k-2030-godu-uvlichit-proizvodstvo-traktorov-do-60-tys-v-god-486549-2022/>. – Дата доступа: 01.04.2023.
3. МТЗ поставил на экспорт более 36 тыс. единиц техники в 2021 г. – Режим доступа: [https://primepress.by/news/kompanii/mtz\\_postavil\\_na\\_eksport\\_bolee\\_36\\_tys\\_edinits\\_tekhniki\\_v\\_2021\\_g-41745/](https://primepress.by/news/kompanii/mtz_postavil_na_eksport_bolee_36_tys_edinits_tekhniki_v_2021_g-41745/). – Дата доступа: 01.04.2023.
4. Минтранс подвел итоги 2021 года и определил планы на 2022. – Режим доступа: <https://maz.by/media/news/2022/02/03/mintrans-podvel-itogi-2021-goda-i-opredelil-plany-na-2022>. – Дата доступа: 02.04.2023.
5. МАЗ занял пятое место по продажам грузовиков в России по итогам первого полугодия 2022 г. – Режим доступа: [https://primepress-by.turbopages.org/primepress.by/s/news/kompanii/maz\\_zanyal\\_pyatoe\\_mesto\\_po\\_prodazham\\_gruzovikov\\_v\\_rossii\\_po\\_itogam\\_pervogo\\_polugodiyu\\_2022\\_g-44765/](https://primepress-by.turbopages.org/primepress.by/s/news/kompanii/maz_zanyal_pyatoe_mesto_po_prodazham_gruzovikov_v_rossii_po_itogam_pervogo_polugodiyu_2022_g-44765/). – Дата доступа: 02.04.2023.

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Д. А. Галайдо, А. В. Силивончик

Учреждение образования «Белорусский государственный  
экономический университет», г. Минск

Научный руководитель И. П. Хомин

*Машиностроительная отрасль Республики Беларусь является неотъемлемой частью экономики, влияющей на состояние и развитие экономического потенциала страны. В республике функционируют такие крупные предприятия, как ОАО «БелАЗ», ОАО «Минский тракторный завод», ОАО ПО «Гомсельмаш», ОАО «Белкоммунмаш», ОАО «Амкодор» и многие другие, продукция которых уже успела стать известной на мировом рынке. Республика Беларусь изготавливает грузовые автомобили, автобусы, спецтехнику, а также сельскохозяйственные машины. Так, деятельность машиностроительного комплекса формирует внутренний валовой продукт Республики Беларусь и является движущей силой экономики.*

**Ключевые слова:** машиностроительная отрасль, промышленность, инвестиции, экспорт, производство.

Машиностроительный комплекс формирует 15 % общего объема промышленного производства. В его структуру включены металлургическое производство, производство машин и оборудования, транспортных средств, электронного и оптического оборудования, а также вычислительной техники.

За 2021 г. в Республике Беларусь произведено продукции машиностроения на общую сумму 23,7 млрд руб., в сопоставимых ценах эта цифра на 13,7 % больше, чем в 2020 г. По отдельным ее видам зафиксирован рост выпуска по сравнению с предыдущим годом (рис. 1) [1].



Рис. 1. Объем промышленного производства, млн руб. [1]

Машиностроительная отрасль Республики Беларусь в значительной степени направлена на внешние рынки, свыше 80 % выпускаемой продукции поставляется на экспорт. Таким образом, экспортный потенциал является необходимым условием для экономического роста, модернизации производства, а также для закупок топливно-сырьевых ресурсов.

Развитие машиностроительного комплекса придает огромное значение инвестициям в основной капитал. Инвестиции в основной капитал в отрасль машиностроения за январь–июнь 2022 г. составили 445,4 млн руб., или почти 11 % от объема инвестиций в промышленный комплекс страны.

Машиностроительный комплекс республики в 2021 . включает более 1600 организаций, в том числе основные из них:

– ОАО «Минский тракторный завод» – один из мировых лидеров по производству сельскохозяйственной техники. Предприятие занимается разработкой и производством колесных и гусеничных тракторов, мотоблоков, оборудования для сельскохозяйственных, коммунальных, строительных и лесных работ. За шесть месяцев 2021 года заводом было произведено свыше 17 тыс. единиц техники;

– ОАО «Амкодор» является одним из ведущих производителей специализированных машин и оборудования в Республике Беларусь и среди стран СНГ. В состав холдинга входит 28 предприятий и 18 заводов. Компания каждый год производит более 5 тыс. единиц специальных машин высокого технического уровня. Предприятие занимается производством и реализацией дорожно-строительной, коммунальной, сельскохозяйственной, лесной, торфодобывающей и аэродромно-уборочной техники;

– ОАО «Минский автомобильный завод» реализует автомобильную технику грузового и пассажирского назначения. Продукция соответствует европейскому экологическому стандарту Евро-5. Под маркой «МАЗ» с конвейера сходят седельные тягачи, бортовые автомобили, шасси под установку различного спецоборудования [2].

Существует ряд факторов, влияющих на замедление темпов развития машиностроительной отрасли, к которым относятся:

– недостаточное обновление основных средств в машиностроительном комплексе;

– низкая инвестиционная активность;

– недостаточная конкурентоспособность белорусской машиностроительной продукции на внешнем рынке;

– снижение спроса как на внутреннем, так и на внешних рынках [2].

Преодоление трудностей, связанных с проблемами замедления машиностроительного комплекса, позволит создать благоприятные условия для зарубежных инвесторов. Это в дальнейшем поспособствует скорейшему внедрению современных технологий в производство, что значительно повысит качество производимой продукции.

На данный момент предприятия машиностроительной отрасли ведут активную работу по завоеванию новых рынков, тем самым повышая качество и конкурентоспособность отечественной продукции.

Успешно формируется новая отрасль – производство электротранспорта. С 2020 г. количество электромобилей в стране выросло в 39 раз.

Так, по Минску курсируют электробусы. На БелАЗе изготовлены образцы карьерных самосвалов грузоподъемностью 90 т (на аккумуляторных батареях) и 220-тонные образцы дизель-троллейвозного типа. «Белкоммунмаш» разработал экспериментальный образец электрогрузовика грузоподъемностью 10 т, МАЗ – грузовой электромобиль грузоподъемностью до 4 т.

В первом полугодии 2023 г. должен появиться и первый белорусский электротрактор мощностью до 40 л. с. [3].

Министерство промышленности активно продолжает работу по созданию и другой техники нового поколения. Так, недавно «Гомсельмаш» представил первый белорусский зерноуборочный комбайн с роторной схемой обмолота и сепарации.

Таким образом, в машиностроительном комплексе наблюдается положительная динамика развития. Для поддержания стабильности и обеспечения конкурентоспособности отрасли необходимо осуществление ряда мероприятий, направленных на модернизацию и комплексную перестройку строительной базы, создание мобильных подразделений, а также на осуществление инновационных процессов. Перспективное развитие машиностроительной отрасли невозможно без инвестиций в основные фонды предприятий. Их привлечение и рост инновационной составляющей может обеспечиваться за счет вступления машиностроительных предприятий в холдинговые компании, использования государственно-частного партнерства, интеграции академических институтов в реальный сектор экономики.

#### Л и т е р а т у р а

1. Промышленность Республики Беларусь : стат. буклет / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2022. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/254/6n0355kev4y4cnpqqt0p2886gl0f1j4b.pdf>. – Дата доступа: 01.04.2023.
2. Машиностроение Беларуси. – Режим доступа: <https://factories.by/news/mashinostroenie-belarusi?ysclid=lg597nrok422740819>. – Дата доступа: 01.04.2023.
3. Перспективы отраслей: машиностроение и легпром на фоне санкций. – Режим доступа: <https://neg.by/novosti/otkrytj/perspektivy-otrasley-mashinostroenie-i-legprom-na-fone-sanktsiy/>. – Дата доступа: 01.04.2023.

## АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ГИДРОПРИВОДА РАБОЧИХ ОРГАНОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ХОЛОДНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

А. Д. Дещеня

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

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

*Произведен анализ основных требований, предъявляемых к конструкции гидропривода рабочих органов автоматической линии холодного профилирования, которые являются основополагающими для проектирования схемы гидросистемы. Конструктивные требования определены порядком работы линии холодного профилирования и требованиями безопасности при эксплуатации гидропривода. Произведенный анализ данных требований позволил разработать схему гидравлическую принципиальную автоматической линии.*

**Ключевые слова:** гидропривод линии холодного профилирования, требования к конструкции гидросистемы, схемотехническое решение, гидросистема.

Цель работы – обосновать схемотехническое решение гидравлического привода автоматической линии холодного профилирования как результат анализа режимов движения выходных звеньев гидропривода, требований к точности движения и позиционирования, надежности и безопасности работы, условий эксплуатации.

Линия автоматическая холодного профилирования (рис. 1) предназначена для изготовления профилированных деталей, относится к оборудованию обработки металлов давлением.

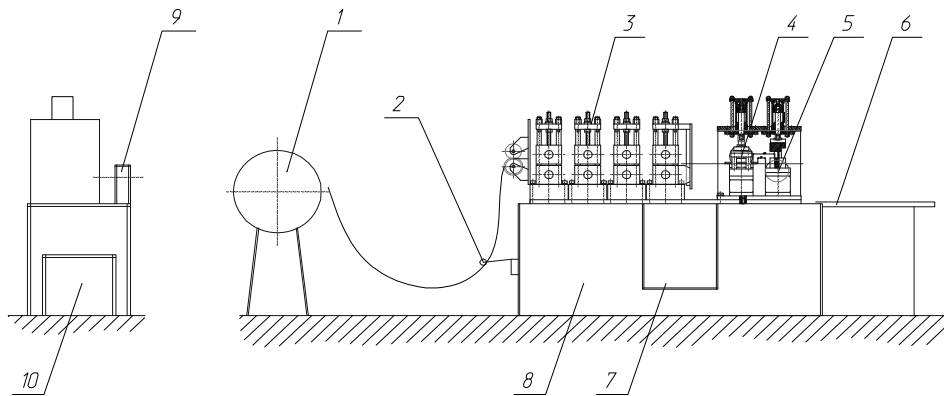


Рис. 1. Автоматическая линия холодного профилирования:

1 – размотчик; 2 – компенсатор петлевой; 3 – стан профилообразующий;  
4 – штамп пробивной; 5 – штамп отрезной; 6 – лоток; 7 – шкаф управления;  
8 – стол; 9 – привод стана; 10 – гидростанция

Посредством профилировочного инструмента осуществляется последовательное деформирование ленты до получения заданного профиля, в котором пробиваются отверстия с заданным шагом. Последующей операцией является отрезка заготовки на штампе отрезном.

Конструктивные требования, влияющие на проектирование схемы гидропривода, можно скомпоновать в следующие группы [1–3].

Гидроприводы должны быть разработаны таким образом, чтобы повышение давления и возможные гидравлические удары не создавали опасности. Предпочтительными защитными гидроустройствами против превышения максимально допустимого давления являются предохранительные клапаны (рис. 2, а).

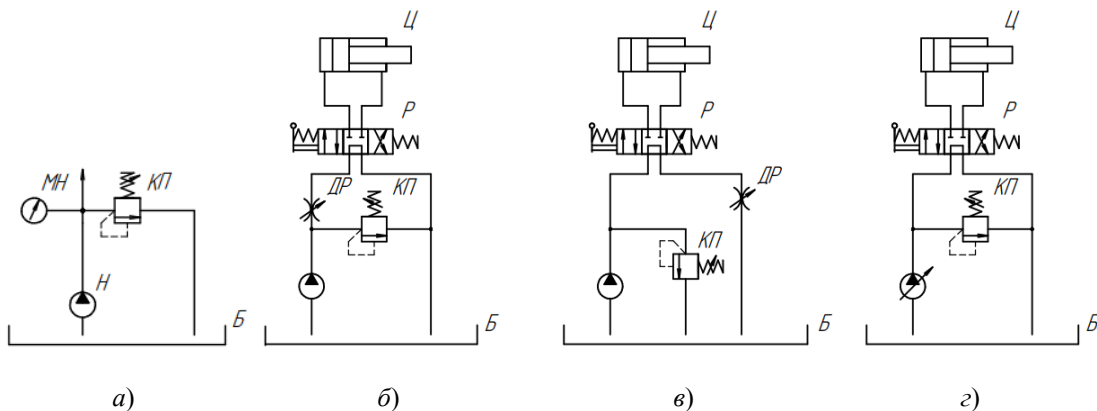


Рис. 2. Типовые схематические решения:  
а – предохранение системы от перегрузки; б, в – дроссельного регулирования; г – объемного регулирования

При необходимости усилия на рабочем органе и настройки давления в гидросистеме в схему либо должны быть включены манометры или другие устройства для контроля и/или регистрации давления, либо должны быть предусмотрены места для их подключения (диагностические точки). Манометры устанавливаются напорной



линии для контроля давления в системе, обязательно устанавливают перед аккумулятором, в других местах устанавливаются при необходимости.

Если работа гидропривода сопровождается длительными периодами простоя при работающем насосе, то гидравлическую систему необходимо разгружать от давления. Наиболее простым схмотехническим решением для обеспечения данного требования является использование трехпозиционного распределителя 64-го исполнения (рис. 2, б).

При работе гидрофицированной машины часто скорости движения рабочих органов должны иметь разные значения. Для обеспечения данного требования можно применять типовые способы регулирования скорости рабочих органов гидросистемы: дроссельный (рис. 2, б, в), объемный (рис. 2, з). Объемное регулирование применяют при большой мощности гидропривода ( $N > 10$  кВт) и длительных режимах работы, в остальных случаях – дроссельное регулирование.

Гидроприводы должны быть оснащены устройствами аварийного отключения, обеспечивающими самофиксирование рабочих органов при отключении насоса. При возникновении опасной ситуации должно автоматически происходить полное отключение гидропривода (гидросистемы) от источника энергии, должна автоматически происходить нейтрализация накопленной в гидроприводе (гидросистеме) энергии при останове, должно наблюдаться отсутствие самозапуска, а переключатель вида работ должен запирается.

Для обеспечения данного требования в гидросистему устанавливают гидрозамки (рис. 3, а), гидроаккумуляторы для возврата рабочего органа гидропривода в исходное положение (рис. 3, б), гидроаккумуляторы для компенсации утечек (рис. 3, в), магнитные клапаны, датчики положения и другие устройства.

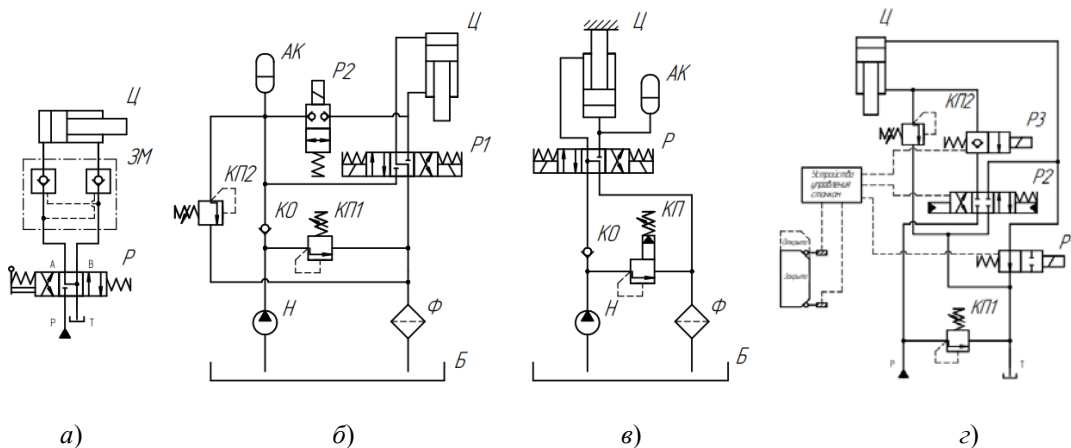


Рис. 3. Типовые схемы обеспечения безопасной работы гидропривода:

- а – применение двустороннего гидрозамка; б – применение гидроаккумулятора для аварийного управления; в – применение гидроаккумулятора для компенсации утечек; г – обеспечение отсутствия самозапуска

Отсутствие самозапуска можно обеспечить следующим образом (рис. 3, г): переключатель прямого режима при его активации удерживается в положении выключения кулачком, прикрепленным к заграждению, которое может находиться в любом положении, кроме полностью закрытого. Финальное закрывающее движение заграждения отпускает переключатель, открывая подачу питания к продукции посредством

вом возвратной пружины. Если заграждение открыто, питание перекрывается, продукция возвращается в бак под действием кулачка. В режиме работы обратного переключателя финальное закрывающее движение напрямую управляет переключателем, подавая питание к продукции и позволяя запустить станок. Если заграждение открыто, переключатель переводится в противоположное положение под действием пружины при отпуске рабочего механизма, таким образом отключая питание.

На основании проведенного анализа и порядка действий рабочих органов автоматической линии холодного профилирования разработана принципиальная схема гидропривода (рис. 4). В данной схеме использован предохранительный клапан для предотвращения превышения максимального давления в системе; установлены гидрозамки у каждого гидроцилиндра для самофиксирования рабочих органов и защиты от самопроизвольного опускания рабочих органов гидропривода; гидропривод снабжен манометром для настройки давления; обеспечивается разгрузка насоса в периоды смены заготовки с помощью P1, регулирование скорости движения рабочих органов – с помощью ДР, автоматическое изменение направления движения рабочих органов (штоков ГЦ) – за счет подачи управляющих сигналов от концевых переключателей на электромагниты распределителей.

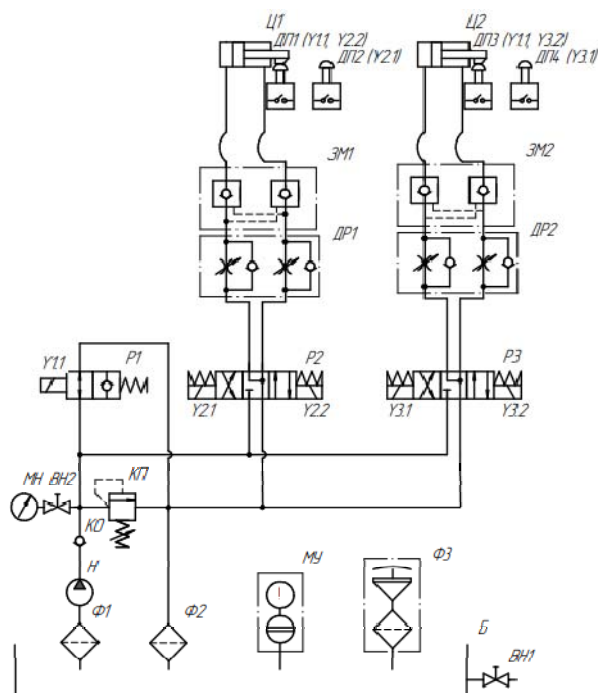


Рис. 4. Гидравлическая схема автоматической линии холодного профилирования

Разработанная гидросистема используется в качестве привода автоматической линии холодного профилирования при производстве заготовок клапанов в системах кондиционирования УП «ВЕЗА-Г».

#### Литература

1. Гойдо, М. Е. Проектирование объемных гидроприводов / М. Е. Гойдо. – М. : Машиностроение, 2009. – 304 с.

2. Наземцев, А. С. Пневматические и гидравлические приводы и системы : учеб. пособие : в 2 ч. / А. С. Наземцев, Д. Е. Рыбальченко. – М. : ФОРУМ, 2007. – Ч. 2. – 304 с.
3. Проектирование гидравлических систем машин : учеб. пособие. – Г. М. Иванов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1992. – 224 с.

## АНАЛИЗ АВТОМАТИЧЕСКИХ СМАЗОЧНЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Д. Н. Станкевич, В. С. Юркевич

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

Научный руководитель Г. С. Кульгейко

*Представлен анализ смазочных систем, применяемых в автоматизированных технологических машинах. Рассмотрены схемы принципиальные гидравлические смазочные системы различного дозирования и указаны области их применения.*

**Ключевые слова:** смазочная система, циркуляционное смазывание, питатель, доза смазки, датчик циклов.

Проблема борьбы с трением и износом деталей машин и механизмов является одной из основных проблем в технике. От успешного ее решения зависит надежность и долговечность работы машин и величина их коэффициента полезного действия. Широко используемые в прошлом методы смазывания пополняются новыми, более совершенными, автоматическими смазочными системами (СС). Смазочное оборудование непрерывно модернизируется.

В современных СС циркуляционного смазывания используют принцип принудительной подачи масла насосом под давлением непосредственно в подшипник или зону контакта подвижных деталей (узлов) машин с точным дозированием и автоматическим контролем выхода смазки.

Выбор СС производят после оценки характеристик различных типов систем применительно к особенностям смазываемых объектов с учетом их технико-экономических и эксплуатационных характеристик.

Один из классификационных признаков автоматизированных СС – по типу питателей –направление смазочных аппаратов для подачи смазочного материала к одной или нескольким парам поверхностей трения определенными порциями.

В СС дроссельного дозирования (рис.1) количество смазочного материала, подаваемого к поверхности трения, зависит от степени дросселирования его потока. При этом количество смазочного материала, поступающего от нагнетателя, регулируется изменением гидравлического сопротивления напорных смазочных линий путем установки линейных сопротивлений (дросселей) или подбором сечений и длины трубопроводов. Системы дроссельного дозирования применяют в основном для жидких смазочных материалов. Преимуществами систем дроссельного дозирования являются большая пропускная способность и конструктивная простота маслораспределительных устройств, в которых практически отсутствуют движущиеся детали. Недостаток – зависимость величины потока смазочного материала, проходящего через дроссель от перепада давлений на входе и выходе, от температуры. Относительно малые зазоры в дросселях легко засоряются и требуют высокой степени очистки смазочного материала.

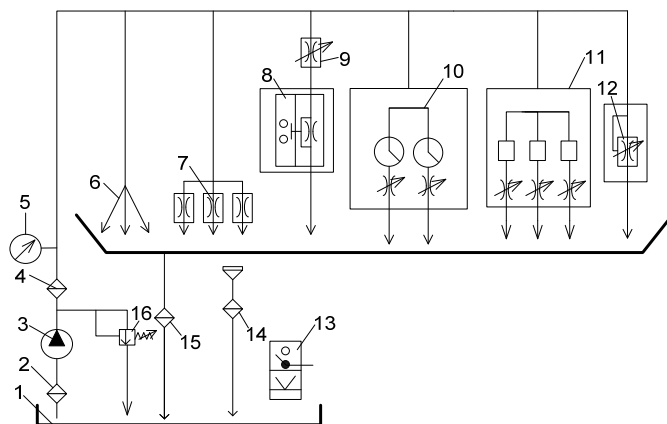


Рис. 1. Схема смазочной системы дроссельного дозирования:  
 1 – бак; 2 – приемный фильтр; 3 – насос; 4 – напорный фильтр;  
 5 – манометр; 6 – смазочные линии; 7 – нерегулируемый дроссель;  
 8 – реле расхода; 9 – регулируемый дроссель; 10 – смазочный  
 дроссельный блок; 11 – ротаметры; 12 – регулятор подачи;  
 13 – реле уровня; 14 – заливной фильтр; 15 – сливной фильтр;  
 16 – предохранительный клапан

В отличие от дроссельных СС, в последовательных СС (рис. 2) доза смазки не зависит от перепада давлений в системе. Один датчик циклов контролирует работу всей системы в целом, т. е. система обладает централизованным контролем, что делает ее особенно полезной для уникального и дорогостоящего оборудования с множеством смазываемых точек.

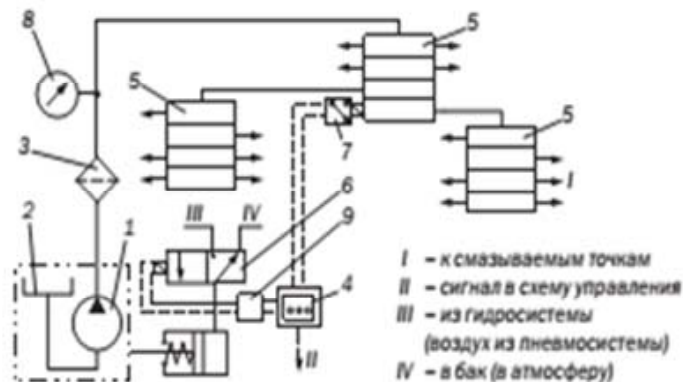


Рис. 2. Схема последовательной смазочной системы периодической подачи:  
 1 – станция смазочная (насос) с гидравлическим (пневматическим) приводом;  
 2 – резервуар; 3 – фильтр; 4 – блок управления; 5 – питатель; 6 – золотник  
 распределительный (пневмораспределитель); 7 – выключатель конечный;  
 8 – манометр; 9 – реле промежуточное (в комплект поставки не входит)

Импульсная СС (рис. 3) питается от насоса с электроприводом. Импульсы давления создаются периодическими включениями электродвигателя насоса. Импульсные смазочные системы могут быть составной частью циркуляционных СС.

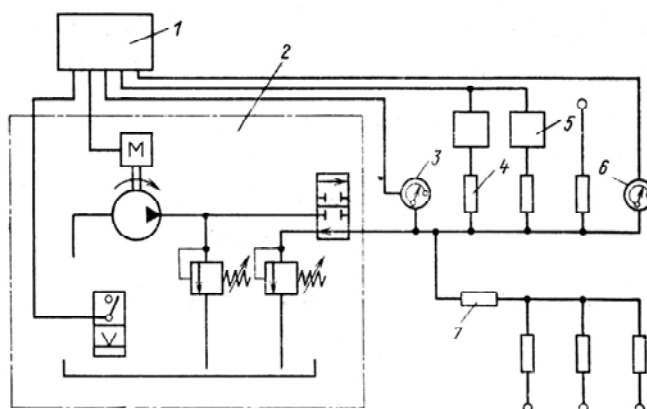


Рис. 3. Схема импульсной смазочной системы:  
 1 – блок управления; 2 – гидростанция; 3, 6 – реле давления;  
 4 – питатели; 5 – контрольное реле; 7 – счетчик импульсов

Системой гидростатического смазывания является формирование масляной пленки на поверхности пар трения (например, салазок и направляющих станка) для предотвращения износа и прерывистой подачи рабочего органа. Для достижения этого масло подается под давлением в полость между поверхностями трения (рис. 4), что обеспечивает их разделение даже во время простоя машины.

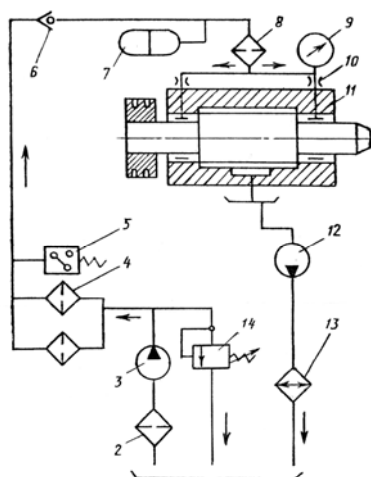


Рис. 4. Схема смазочной системы гидростатических опор шпинделя металлорежущего станка:  
 1 – бак; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – питательный насос;  
 4 – фильтр тонкой очистки; 5 – реле давления; 6 – обратный клапан;  
 7 – гидроаккумулятор; 8 – фильтр особо тонкой очистки; 9 – манометр;  
 10 – дроссели; 11 – гидростатическая опора шпинделя;  
 12 – насос откачки; 13 – теплообменник; 14 – перепускной клапан

Смазочные системы пленочного типа (система масло+воздух) (рис. 5) давлением воздуха создают непосредственно на поверхностях трения масляную пленку.

В точке смешения дозированные объемы смазки циклично подаются в поток сжатого воздуха. При этом между точкой смешения и распылительной насадкой точки смазывания образуется практически непрерывный поток масла, а (практически) не содержащий масла воздух отводится наружу.



Ведущие специалисты Союзного государства России и Беларуси, работающие на передовых промышленных предприятиях, в вузах и научных учреждениях, проводят непрерывные совместные исследования в высших учебных заведениях области безопасности эксплуатации объектов техносферы.

Проблема обеспечения безопасности и защищенности объектов техносферы и населения имеет приоритетное значение, причем ее важность постоянно возрастает связи с усложнением технических объектов. Совершенно очевидно, что без фундаментальных научных исследований добиться выполнения целей и задач в этой сфере не представляется возможным.

Используемые ранее традиционные нормы и правила проектирования, строительства и эксплуатации не отражали в полной мере опасностей возникновения и развития аварийных и катастрофических ситуаций. Только в последние десятилетия в полной мере была осознана необходимость перехода к новым методам оценки ресурса, живучести, риска и безопасности. Это обстоятельство обусловило переход к постановке и решению новых фундаментальных задач механики катастроф, включающих в себя задачи анализа напряженно-деформированных и предельных состояний элементов конструкций в заведомо нелинейной постановке, задачи физического и математического моделирования сценариев их эксплуатации и оценки рисков возникновения и развития в них аварий и катастроф.

В связи с этим в союзном государстве пропорционально увеличивается объем научных исследований и прикладных разработок по комплексным проблемам обеспечения безопасности населения и среды жизнедеятельности, а также по подготовке и переподготовке специалистов по этим проблемам. Результаты этих исследований и разработок отражены в ряде концептуальных положений, федеральных и государственных законов России и Беларуси, а также в публикациях специалистов (например, [1]).

Для России и Беларуси в ближайшей и отдаленной перспективе вопросы обеспечения безопасности техносферы будут приобретать большее значение в таких областях техники и промышленности, как атомная и тепловая энергетика, транспорт (железнодорожный и автомобильный), сельскохозяйственное машиностроение, нефтегазохимия, оборонный комплекс.

В основу научно-исследовательских работ в области теории и практики комплексной безопасности положен риск-ориентированный подход [2]. При этом внимание должно быть уделено обоснованию и обеспечению безопасности критически и стратегически важных объектов и инфраструктур. Обеспечение жизнедеятельности и защиту от опасностей следует осуществлять на основе многопараметрического анализа функционирования сложной С-П-Т-системы, включающей социальную, природную и техногенную сферы.

В рамках риск-ориентированного подхода вводятся следующие коэффициенты запаса:  $n_{\sigma}$  – по напряжениям;  $n_N$  – по циклической долговечности;  $n_{\tau}$  – по временной долговечности;  $L(\tau)$  – по живучести с оценкой трещиностойкости;  $P(\tau)$  – по целостности и надежности с оценкой вероятности;  $S(\tau)$  – по безопасности;  $R(\tau)$  – по рискам. В риск-ориентированном подходе риски  $R(\tau)$  не должны превышать допустимых, а защищенность  $Z(\tau)$  от аварий и катастроф определяется достигнутым уровнем безопасности.

Показатель риска  $R(\tau)$  является наиболее важным как для безопасности  $S(\tau)$ , так и для защищенности  $Z(\tau)$ . При этом следует учитывать, что риски  $R(\tau)$  будут непрерывно и пропорционально увеличиваться по мере увеличения срока эксплуатации  $\tau$  системы, поскольку в системе при этом закономерно происходит накопление эксплуатационных повреждений  $d(\tau)$  (рис. 1) [3].

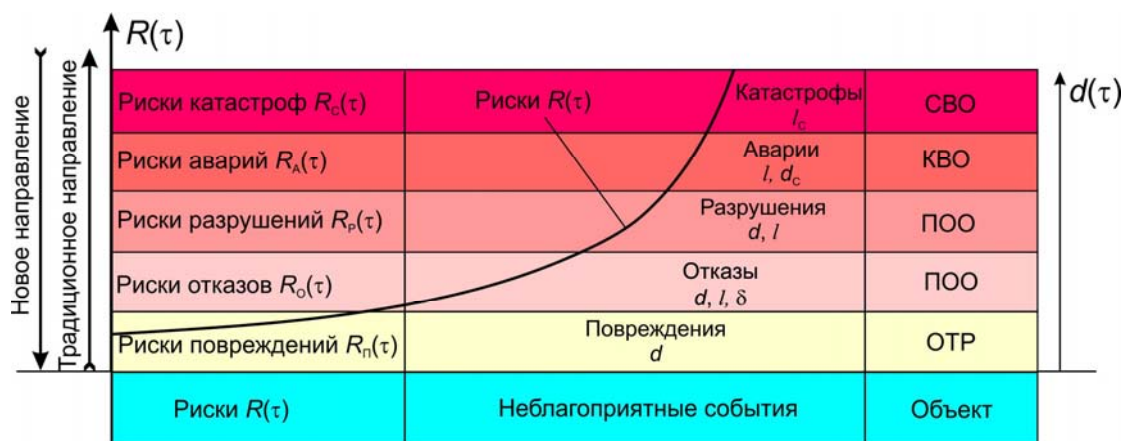


Рис. 1. Уровни анализа опасных состояний объектов

Эти повреждения на определенной стадии жизненного цикла переходят в отказы (с развитием трещин  $l$  и уменьшением несущих сечений  $\delta$ ), в частичные разрушения несущих элементов при повышенных параметрах  $d$  и  $l$ . Такие разрушения создают аварийные ситуации при критических повреждениях  $d_c$  и развитых трещинах  $l$ , которые могут переходить в катастрофы при критических (разрушающих) размерах трещин  $l_c$ .

По мере повышения ответственности и важности функционирующих технических систем возрастает опасность последовательности переходов опасных состояний: от массовых объектов технического регулирования (ОТР) к серийным потенциально опасным объектам (ПОО) и далее к мелкосерийным критически важным объектам (КВО) и уникальным стратегически важным объектам (СВО). Показатель риска для каждого из рассматриваемых объектов свой –  $R_n(\tau)$ ,  $R_o(\tau)$ ,  $R_p(\tau)$ ,  $R_A(\tau)$ ,  $R_c(\tau)$ .

Для оценки экономических рисков в С-П-Т-системе справедливым оказывается суммирование рисков:

$$R(\tau) = R_c(\tau) + R_n(\tau) + R_T(\tau). \quad (1)$$

Для техногенных аварий и катастроф определяющими являются неконтролируемые выбросы (выходы) за пределы соответствующих объектов:

- опасных химических, биологических, радиационных веществ  $W$ ;
- опасных кинетических, взрывных, тепловых, сейсмических, аэрогидродинамических потоков энергии  $E$ ;
- опасных искаженных, поврежденных потоков управляющей и контролирующей информации  $I$ .

Тогда по аналогии с (1) можно записать:

$$R(\tau) = R_W(\tau) + R_E(\tau) + R_I(\tau). \quad (2)$$

Использование риск-ориентированного подхода для оценки комплексной безопасности будет способствовать успешной реализации современных подходов к проектированию и эксплуатации критически и стратегически важных объектов и инфраструктур.



## Литература

1. Махутов, Н. А. Обоснование безопасности эксплуатации объектов техносферы с использованием критериев риска / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, Л. А. Сосновский // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп. Наука и транспорт. – 2016. – № 1 (32). – С. 67–73.
2. Сосновский, Л. А. L-риск / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 317 с.
3. Махутов, Н. А. Динамическое напряженно-деформируемое состояние и повреждаемость режущего инструмента комбайна / Н. А. Махутов // Живучесть и конструкционное материаловедение : науч. тр. VI Междунар. конф. SSMS–2022, Москва, 9–11 нояб. 2022 г. – М. : ИМАШ РАН им. А. А. Благонравова, 2022. – С. 227–232.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КОСИЛКИ-ПЛЮЩИЛКИ КС-200

Н. С. Селиверстов, Д. Г. Кудренко

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

Научный руководитель В. Б. Попов

*Проведено математическое моделирование механизма подъема косилки-плющилки КС-200. Полученная функциональная математическая модель позволяет как провести анализ механизма подъема, так и обеспечить одно из условий его синтеза.*

**Ключевые слова:** косилка-плющилка, механизм подъема, математическое моделирование.

Косилка-плющилка КС-200 предназначена для кошения и плющения трав. Одним из основных агрегатов косилки КС-200 является ее подъемно-навесное устройство, объединенное с механизмом вывешивания, закрепленное на раме КС-200 и связывающее энергоноситель с адаптером (жаткой).

Подъемно-навесное устройство состоит из гидропривода и механизма подъема (МП) адаптера, причем звенья МП одновременно являются компонентами механизма вывешивания адаптера. Автоматизированное проектирование КС-200 предполагает рациональный выбор параметров МП [1–4].

Задачей данной статьи является математическое моделирование МП, которое позволит обоснованно назначить размеры его звеньев (рис. 1).

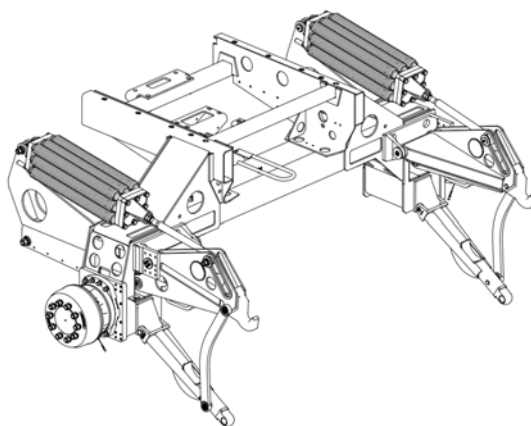


Рис. 1. Общий вид подъемно-навесного устройства косилки КС-200

Подъемно-навесное устройство представляет собой комбинацию 4- и 6-звенных шарнирно-рычажных механизмов связанных гидроприводом. Плоская модель механизма навески получена из пространственного МП (рис. 2) проецирования на продольную плоскость симметрии его правой и левой частей.

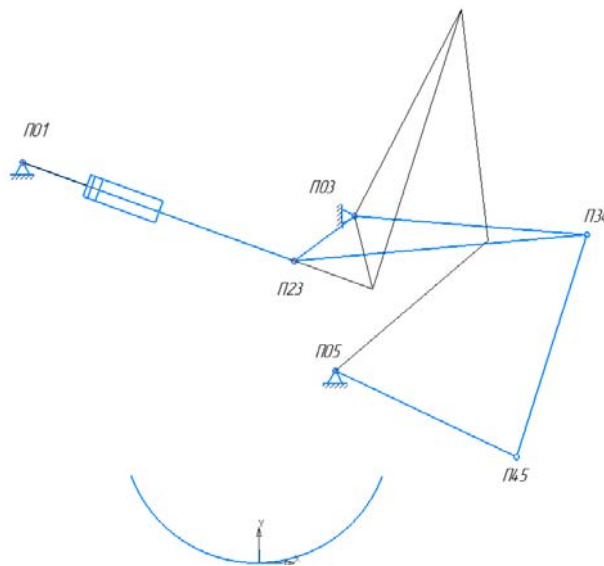


Рис. 2. Схема механизма подъема адаптера

В 6-звенном одноподвижном шарнирно-рычажном механизме имеем:

$$W = 3n - 2p_5;$$

$$W = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 = 1,$$

где  $W$  – число степеней свободы;  $n$  – число подвижных звеньев;  $p_5$  – число кинематических пар 5-го класса.

Так как в механизме одна степень свободы мы можем построить математическую модель методом замкнутых векторных контуров (метод Зинovieва). В результате определим все углы, образованные звеньями МП. Далее определим координаты всех подвижных звеньев, например, координаты шарнира штока гидроцилиндра (1)–(4):

$$x_{23} = x_{01} + S \cos \varphi_{12}; \quad (1)$$

$$y_{23} = y_{01} + S \sin \varphi_{12}. \quad (2)$$

Проверить расчеты возможно с помощью следующих формул:

$$x_{23} = x_{03} + l_3 \cos \varphi_3; \quad (3)$$

$$y_{23} = y_{03} + l_3 \sin \varphi_3, \quad (4)$$

где  $x_{23}$  и  $y_{23}$  – координаты точки П<sub>23</sub>;  $l_3$  – длина 3-го звена;  $\varphi_3$  – угол.

Следующим этапом моделирования является кинематический анализ для определения передаточных отношений и аналогов угловых скоростей звеньев:

$$\varphi'_3 = \frac{2 \cdot S}{\sqrt{4L_{13}^2 \cdot L_3^2 - [S^2 \cdot L_{13}^2 \cdot L_3^2]^2}},$$

где  $S$  – обобщенная координата;  $L_i$  – длины звеньев.

$$U_{43} = \frac{l_{34} \sin(\varphi_5 - \varphi_{34})}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_5)},$$

где  $U_{43}$  – передаточное отношение угловых скоростей;  $l_i$  – длина звена;  $\varphi_i$  – угол образуемый звеньями в правой декартовой системе координат.

Далее определяем передаточные числа:

$$I_{56} = \varphi'_3 U_{53} L_{56} \cos \varphi_5,$$

где  $\varphi'_3$  – аналог угловой скорости.

Последовательность проведения силового анализа МП соответствует обратному порядку его структурной формулы, начинается с последней группы 2-го класса, 2-го порядка 1-го вида:

$$R_{56}^x = P_6 \frac{G(x_{56} - x_{S6})}{2A};$$

$$R_{56}^y = P_6 \frac{(x_{S6} - x_{67})F - G \cdot D}{2A},$$

где  $x_{S6}$  – координата центра тяжести навесной машины;  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$  – координаты центров шарниров звеньев группы  $L_7-L_6$ ;  $D$ ,  $F$ ,  $G$  – переменная разность координат;  $R_{ij}^x$ ,  $R_{ij}^y$  – составляющие сил, действующих в шарнирах  $L_7-L_6$ .

Полученная функциональная математическая модель позволяет как провести анализ МП, так и обеспечить одно из условий его синтеза.

#### Л и т е р а т у р а

1. Попов, В. Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 251 с.
2. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / Н. И. Артоболевский. – М. : Машиностроение, 1988. – 687 с.
3. Попов, В. Б. Математическое обеспечение для проектирования подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Вести АПК Верхневолжья. – № 3. – 2014. – С. 67–71.
4. Попов, В. Б. Функциональная математическая модель анализа подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Механика – 2011 : сб. науч. тр. V Белорус. конгр. по теорет. и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г. : в 2 т. / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 169–176.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ПОТЕРЮ ДАВЛЕНИЯ В ОБЪЕМНОМ ГИДРОПРИВОДЕ

В. С. Юркевич

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

Научный руководитель Ю. А. Андреевец

*Рассмотрен вопрос о влиянии отрицательных температур на работу объемного гидропривода. Определено, что при работе в условиях отрицательных температур энергетические потери в начальный период возрастают на 10 % и более от номинального давления и оказывают значительное влияние на работу привода, что негативно сказывается на общем КПД. Определена зависимость потерь давления от вязкости рабочей жидкости, которая в свою очередь зависит от температуры и условий эксплуатации.*

**Ключевые слова:** объемный гидропривод, влияние температуры на вязкость жидкости, потери давления в трубопроводе.

При проектировании гидрофицированных машин необходимо оценивать потери давления рабочей жидкости, так как они позволяют установить эффективность работы гидропривода и определить предел его работоспособности при низких температурах. Гидросистема считается работоспособной, если потери давления не превышают 6 % от номинального давления насосов.

В установившемся температурном режиме работы любое отклонение от оптимальной вязкости жидкости в ту или иную сторону приводит либо к увеличению потерь давления, либо к увеличению утечек и снижению КПД гидропривода [1–3].

В условиях холодного климата при отрицательных температурах окружающей среды допустимая вязкость при пуске объемных насосов лежит в пределах 800–5000 сСт, а оптимальная вязкость в установившемся температурном режиме работы гидросистемы – от 15 до 80 сСт. Предварительную оценку применимости жидкости с учетом прокачиваемости насоса можно осуществить по температуре ее застывания. Нормальный пуск насоса возможен при температуре жидкости на 10–15 °С выше температуры застывания. Нормальной рабочей температурой жидкости в гидроприводе является относительно узкий диапазон (от +40 до +60 °С), так как именно при таких условиях создаются оптимальные зазоры в парах трения.

Основные виды потерь в гидравлическом приводе: на гидроаппаратах, на местных сопротивлениях, по длине трубопровода.

Потери давления в гидросистеме, обусловленные трением жидкости о стенки трубопроводов и гидрооборудования и внутренним трением жидкости, зависят от длины, диаметра и формы трубопроводов, скорости течения и вязкости рабочей жидкости, разветвленности гидросистемы, режима течения жидкости в трубопроводе.

Общая величина потерь давления может быть определена как сумма потерь в отдельных элементах гидросистемы:

$$\Delta p = \sum \Delta p_{\Pi} + \sum \Delta p_{\text{МС}} + \sum \Delta p_{\text{ГА}}, \quad (1)$$

где  $\sum \Delta p_{\Pi}$  – суммарные путевые потери давления на прямолинейных участках трубопроводов;  $\sum \Delta p_{\text{МС}}$  – суммарные местные потери давления на местных сопротив-

лениях (в изгибах трубопроводов, штуцерах, переходниках, тройниках);  $\sum \Delta p_{ГА}$  – суммарные потери давления на гидроаппаратах (распределителях, обратных клапанах, фильтрах и т. д.).

При расчете гидравлических потерь напорный и сливной трубопроводы разбиваются на отдельные участки, в каждом из которых равны скорость и диаметр трубопровода. При практических расчетах учитывают суммарную длину напорного трубопровода и принимают скорость потока жидкости в нем на всех участках одинаковой. В этом случае при определении потерь на местных сопротивлениях можно объединить коэффициенты местных сопротивлений трубопроводов. В гидравлических системах потери на местных сопротивлениях принимают равными 10 % от потерь на трение при условии правильной прокладки трубопроводов (минимальное количество поворотов, замена резких поворотов на плавные и т. д.). Потери давления в гидрооборудовании можно определить простым суммированием потерь на гидроаппаратах, встречающихся по ходу напорного или сливного трубопровода, которые указаны в технических характеристиках на каждого выбранного гидроаппарата.

Потери давления по длине трубопровода с учетом потерь на местных сопротивлениях определяются по формуле

$$\Delta p_{II} = 1,1 \frac{\lambda l v^2 \rho}{2d}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения;  $\rho$  – плотность жидкости;  $l$  – протяженность трубопровода, м;  $d$  – диаметр трубопровода, м;  $v$  – скорость потока жидкости, м/с.

Коэффициент трения жидкости о стенки трубопровода в первую очередь зависит от режима движения жидкости (числа Рейнольдса). Для реальной гидросистемы в один и тот же промежуток времени в различных участках трубопровода числа Рейнольдса будут различными, более того, режим течения жидкости может быть в одной точке гидросистемы ламинарным, а в другой – турбулентным. Ламинарному режиму течения жидкости в трубопроводах круглого поперечного сечения соответствуют числа Рейнольдса  $Re < 2200-2300$ , а турбулентному –  $Re > 2200-2300$ . В гидравлических системах, работающих на различных маслах в условиях отрицательных температур, возможен либо ламинарный режим течения, либо первая область турбулентного режима – область гидравлически гладких труб. В этих случаях коэффициент трения определяется по формулам Пуазейля и Блазиуса:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad \lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}.$$

Для трубопроводов круглого сечения число Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{v d}{\nu}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – вязкость рабочей жидкости при заданной температуре.

Для практически всех видов рабочих жидкостей вязкость существенно изменяется при изменении температуры (рис. 1) и определяется по формуле

$$\nu = \nu_0 e^{-\alpha(T-T_0)},$$

где  $\nu$  и  $\nu_0$  – вязкость при температуре  $T$  и  $T_0$ ;  $\alpha$  – показатель крутизны вискограммы (рис. 1). Эмпирический коэффициент, определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\ln(\nu_0 / \nu_1)}{T_1 - T_2},$$

где  $\nu_1$  – вязкость при температуре  $T_1$ .

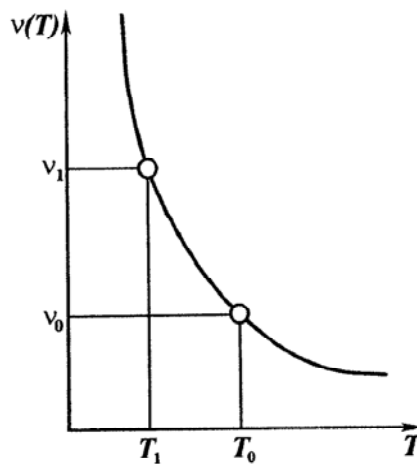


Рис. 1. Зависимости вязкости от температуры

Таким образом, задавшись диаметром трубопровода 20 мм и видом жидкостей АМГ-10 (кривая 1), МГЕ-10А (кривая 2) и АУ (кривая 3), получим графическую зависимость потерь давления от температуры жидкости (рис. 2).

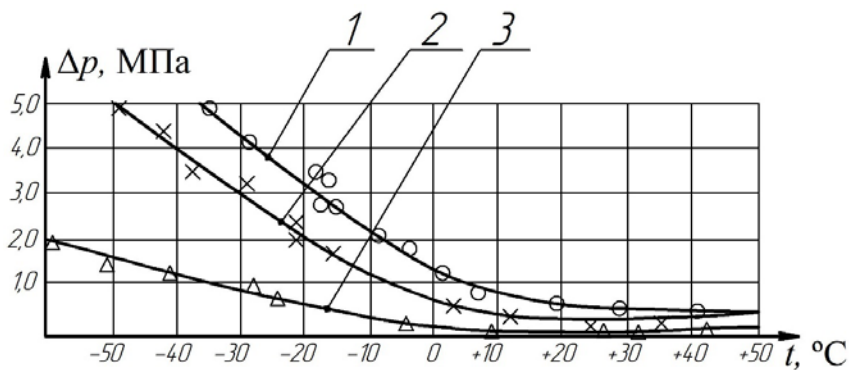


Рис. 2. Потери давления в трубопроводе в зависимости от температуры рабочей жидкости

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– в гидроприводах машин, работающих в условиях холодного климата, при пуске и в начальный период работы значительно возрастают потери давления в трубопроводах. При температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  потери давления рабочей жидкости в гидролиниях привода возрастают в 10 раз по сравнению с потерями давления при  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

– увеличение потерь приводит к увеличению приводной мощности при неизменной полезной мощности на гидродвигателях и, как следствие, к уменьшению КПД гидропривода и увеличению стоимости эксплуатации системы;

– проектирование гидросистемы должно быть основано на детальном анализе теплового режима работы и климатических условий эксплуатации;

– при эксплуатации гидропривода в условиях отрицательных температур необходимо предусматривать меры по поддержанию оптимальной температуры: применять системы нагрева рабочей жидкости в период запуска, покрывать трубопроводы теплоизоляционным материалом или использовать специальные жидкости с минимальной зависимостью вязкости от температуры.

#### Литература

1. Скорняков, Н. М. Проектирование и расчет объемной гидропередачи : учеб. пособие / Н. М. Скорняков, В. В. Кузнецов, К. А. Ананьев ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2010. – 104 с.
2. Наземцев, А. С. Пневматические и гидравлические приводы и системы : учеб. пособие : в 2 ч. / А. С. Наземцев, Д. Е. Рыбальченко. – М. : ФОРУМ, 2007. – Ч. 2. Гидравлические приводы и системы. Основы. – 304 с.
3. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы : учебник / Т. М. Башта [и др.]. – 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

## УЗЕЛ КОНТРОЛЯ КОДОВОГО ДОСТУПА К ТУРНИКЕТУ С ГОЛОСОВЫМИ СООБЩЕНИЯМИ

К. А. Любинский, А. Ю. Гулич, А. И. Голубович

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель А. В. Исаев

*Системы контроля управления доступом являются одним из основных инструментов в обеспечении безопасности таких объектов и территорий, как офисы, склады, производственные предприятия, государственные учреждения и другие.*

**Ключевые слова:** системы контроля управления доступом, безопасность, бесконтактные замки, кодовые замки, уязвимости, контрольный элемент.

При разработке современных систем контроля управления доступом достаточно часто возникает необходимость в системе управления, которая бы производила отпирание и запираание блокировочного элемента. Бесконтактные замки – технология, которая становится более популярной в различных системах контроля доступа. Однако у этих замков есть серьезные недостатки безопасности, которые могут быть использованы злоумышленниками.

Одной из основных уязвимостей является возможность копирования карт или ключей доступа. Это можно сделать с помощью простого устройства для чтения и записи карт, которое можно приобрести без каких-либо ограничений. Для смягчения этих недостатков безопасности, необходимо реализовать такие дополнительные ме-

ры безопасности, как шифрование учетных данных для доступа, использование многофакторной аутентификации и регулярные обновления программного обеспечения.

Кодовые замки используют в качестве контрольного элемента набор символов, которые могут быть изменены по мере необходимости. Таким образом, кодовые замки позволяют управлять доступом без необходимости использования физического ключа. Это может быть особенно удобно, если требуется предоставлять временный доступ, например, посетителям, работникам на временной работе или подрядчикам. Одним из главных преимуществ кодовых замков является возможность быстрого изменения кода при необходимости. Если код становится известен злоумышленникам, администраторы могут легко изменить код без необходимости замены замка. Исходя из этого, применение кодового замка является более безопасным и экономически эффективным чем бесконтактного. Структурная схема узла контроля кодового доступа представлена на рис. 1.

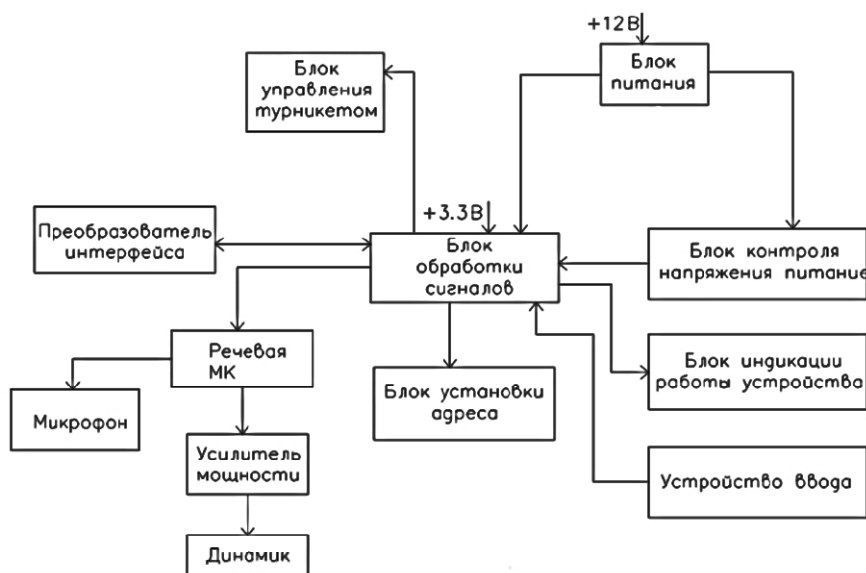


Рис. 1. Структурная схема узла контроля кодового доступа

Данное устройство способно управлять различными блокировочными устройствами при помощи кода. Устройство ввода представляет собой клавиатуру из 16 клавиш. Из них 14 предназначены для ввода символов и 2 – для подтверждения и сброса. Код редактируется непосредственно с клавиатуры и записывается в энергонезависимую память микроконтроллера. Для разблокировки замка необходимо ввести код с клавиатуры и нажать клавишу подтверждения. При верном коде на светодиодной индикации включается зеленый индикатор, выводится голосовое сообщение об успешной операции и происходит изменение состояния на выходах устройства. После 10 секунд устройство переходит в режим ожидания. Если был введен неверный код, то на светодиодной индикации включается красный индикатор, выводится соответствующее голосовое сообщение. Для изменения текущего кода используется дополнительный код доступа.



## УЗЕЛ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СИГНАЛОВ ОПОВЕЩЕНИЯ РЕЧЕВОГО ОПОВЕЩАТЕЛЯ С РАДИОКАНАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

А. Ю. Гулич, К. А. Любинский, А. И. Голубович

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель А. В. Исаев

*Одной из наиболее актуальных проблем современности является гибель людей при пожаре. Для предотвращения или минимизации этой проблемы могут использоваться системы эвакуации, позволяющие скоординировать движение людей при пожаре, ускорить их эвакуацию и исключить неадекватное поведение людей. Среди существующих систем оповещения наиболее мобильной и удобной в монтаже является система оповещения с радиоканальным управлением, и ключевым элементом таких систем является узел записи и воспроизведения сигналов оповещения речевого оповещателя.*

**Ключевые слова:** радиоканальное управление, узел записи и воспроизведения, сигналы оповещения, речевой оповещатель, пожар, радиоканал, система передачи извещений.

В современных системах оповещения большее значение приобретает использование радиоканального управления. Узел записи и воспроизведения сигналов оповещения речевого оповещателя является ключевым элементом таких систем. Речевой оповещатель (РО) с радиоканальным управлением – это устройство, предназначенное для передачи голосовых сообщений при пожаре. Оно позволяет быстро и эффективно оповещать людей о пожаре и способствует организованной эвакуации из помещения или здания. Радиоканальное управление обеспечивает дистанционное управление РО и позволяет реализовать настройку режимов работы устройства с помощью радиоканала. Система передачи извещений, как правило, характеризуется большим количеством монтажных работ, что не всегда является эффективным на определенных объектах, также при пожаре могут происходить обрывы линий связи, что недопустимо. Исходя из этого основными преимуществами РО с радиоканальным управлением являются удобство при монтаже и минимальное количество кабелей. Благодаря использованию радиоканального управления устройство может быть установлено в любом месте, где имеется необходимость в оповещении людей. Кроме того, возможность беспроводной передачи информации позволяет быстро и эффективно настраивать работу оповещателя, регулировать уровень громкости, выбирать нужные речевые сообщения для воспроизведения в соответствии с ситуацией. Одним из наиболее эффективных способов управления РО является использование микроконтроллерного устройства, что позволяет реализовывать более сложные алгоритмы работы РО и осуществлять контроль состояния в автоматическом режиме.

Речевой оповещатель с радиоканальным управлением состоит из нескольких основных компонентов: микроконтроллер, микрофон для записи голосовых фонограмм, устройство для воспроизведения сообщений, усилитель мощности для усиления звука, радиоканальный модуль для дистанционного управления устройством.

Таким образом, речевой оповещатель с радиоканальным управлением является важным компонентом системы оповещения и имеет следующие преимущества: беспроводной контроль работы устройства, дистанционное управление оповещателем, обеспечивает быстрое и эффективное оповещение людей при пожаре. Структурная схема речевого оповещателя представлена на рис. 1.

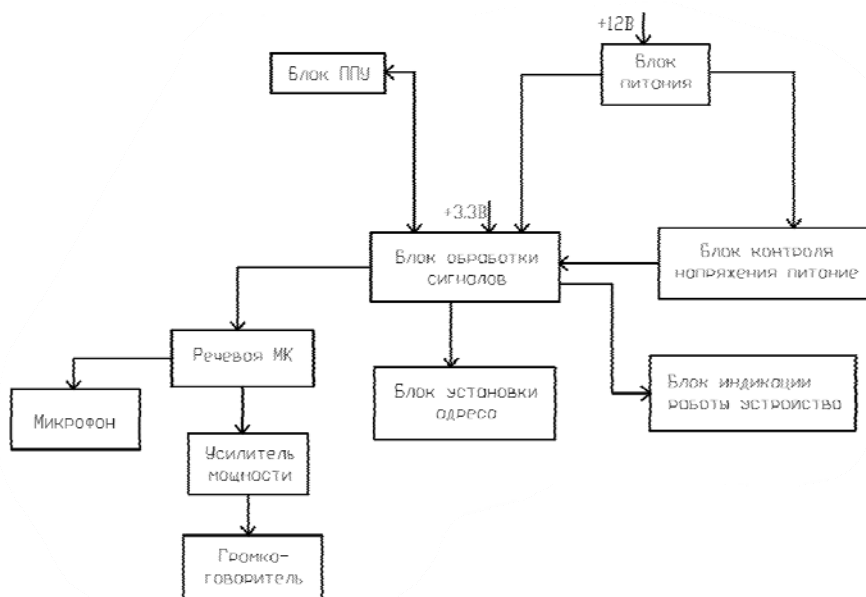


Рис. 1. Структурная схема речевого оповещателя

Работа РО поддерживается питанием от преобразователя напряжения в блоке питания, управление осуществляется микроконтроллерным устройством в блоке обработки сигналов. В блоке индикации работы устройства находится индикация «Работа», «Питание», «Пожар», «Запись». Речевой оповещатель воспроизводит разные фонограммы, заранее записанные в речевую МК, в соответствии с командой, полученной по радиоканалу на частоте 432–433 МГц.

## ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

В. Ю. Процко

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Газопламенное напыление применяется на многих современных металлообрабатывающих предприятиях или в ремонтных цехах крупных промышленных объектов. Заметное повышение механических свойств получаемых покрытий наблюдается при использовании комплексных сплавов на основе железа, бора и углерода при легировании хромом, марганцем, никелем и ванадием. В случае напыления шихты, один из компонентов которой имеет метастабильную аморфную структуру, рост температуры поверхности основы неизбежно влечет за собой кристаллизацию аморфной составляющей с последующим падением механических свойств. Установлено, что максимальная прочность адгезии составила 36 МПа при температуре основы  $\approx 450$  °К, при дальнейшем же разогреве подложки до 700 °К и выше происходит спад прочности до 22 МПа. Исследования показали, что по мере возрастания в напыляемом порошке содержания высокотвердых частиц аморфного сплава до 40–50 % происходит последовательное возрастание прочности адгезии с основой и твердости покрытия, которые стабилизируются на уровне, соответственно, 60–75 МПа и HRC 64–68.

**Ключевые слова:** газопламенное напыление, порошок, материал, покрытие, прочность адгезии, твердость покрытия.

Технология газотермического напыления относится к категории ресурсосберегающих, так как масса нанесенного покрытия редко превышает десятые доли процента от общей массы изделия. По этой причине оборудование для газотермического напыления является не переменным атрибутом современного металлообрабатывающего предприятия или ремонтных цехов крупных промышленных объектов. Сущность газотермического напыления покрытий заключается в использовании порошка, проволоки или прутков подаваемых в высокотемпературную зону, где происходит нагрев выше температуры плавления [1]. Параллельно в камеру под высоким давлением поступает газ – энергоноситель (обычный воздух или особый состав), – функция которого заключается в диспергировании основного материала на предварительно подготовленную поверхность.

Заметное повышение механических свойств наблюдается в комплексных сплавах на основе железа, бора и углерода при легировании хромом, марганцем, никелем и ванадием. Последний выступает как эффективный микролегирующий компонент, усиливающий эффект измельчения и инвертирования структуры, существенно упрочняющий матрицу. Он обеспечивает однородность структуры, повышение коррозионной стойкости и упруго-пластических свойств. Бор является наиболее эффективной легирующей добавкой в сплавах на основе железа. В сравнении с Si, P, C его влияние на прочностные свойства в литом состоянии наиболее высокое. Оптимальная концентрация бора в сплавах системы Fe-B-Si составляет 3,7–4,5 (масс. %). Углерод по влиянию на механические свойства уступает только бору. При дополнительном введении углерода в сплавы системы Fe-B-Si прочность возрастает. Оптимальная концентрация углерода в таких сплавах составляет 0,5–1,2 (масс. %). Анализ литературных данных [1–3] по основам создания высокопрочных аморфных сплавов позволяет рекомендовать использование в опытных условиях ряд высокопрочных и коррозионностойких сплавов на основе железа и никеля.

Основными влияющими параметрами технологии газотермического напыления являются не только свойства и химический состав напыляемого порошка, но и технологические параметры процесса, такие как разогрев поверхности основы, скорость частиц напыляемого материала.

В качестве базового компонента порошкового материала был взят самофлюсующийся сплав на основе никеля ПГ-10Н-01 (ГОСТ 28377–89), в который в качестве упрочняющей добавки вводились высокотвердые частицы дискретного волокна фракции 5–50 мкм из аморфного сплава  $Fe_{73,9}Cr_{4,5}Ni_{1,8}Al_{0,6}Cu_{5,5}B_{4,5}Si_{7,6}V_{0,9}C_{1,0}$  (масс. %), закаленных из расплава со скоростью  $\Delta T/\Delta t = 4,0 \cdot 10^5$  К/с и подвергнутых атриторной обработке в течение четырех часов. Дискретное волокно имело степень аморфизации 95 % и следующие параметры кристаллизации: температура начала кристаллизации сплава  $T_{ви} = 818$  К/с, энергия активации  $E_a = 520,7$  кДж/моль, показатель Д-М-А  $n = 2,96$ .

Подготовка порошковой смеси, поверхности основы и нанесение покрытий методом высокоскоростного газопламенного напыления выполнялись на опытно-производственном участке Государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси» с использованием размещенного там оборудования и оснастки.

Для большинства напыляемых материалов предварительный нагрев поверхности основы может рассматриваться как дополнительный активирующий фактор, интенсифицирующий процесс схватывания. В случае напыления шихты, один из компонентов которой имеет метастабильную аморфную структуру, рост температуры поверхности основы неизбежно влечет за собой кристаллизацию аморфной состав-

ляющей с последующим падением механических свойств [2]. В этой связи нагрев поверхности основы до и в процессе напыления должен рассматриваться как фактор, в определенный момент способный снизить эксплуатационные характеристики покрытия. Оценено влияние разогрева поверхности основы на прочность адгезии и твердость получаемых покрытий. Газопламенным напылением наносили порошки с размером частиц  $d_p = 40\text{--}50$  мкм, производительность  $Q_p = 4$  кг/ч, расход горючей смеси в газопламенной струе  $2,8$  м<sup>3</sup>/ч, дистанция напыления – 75 мм. Результаты экспериментов приведены на рис. 1.

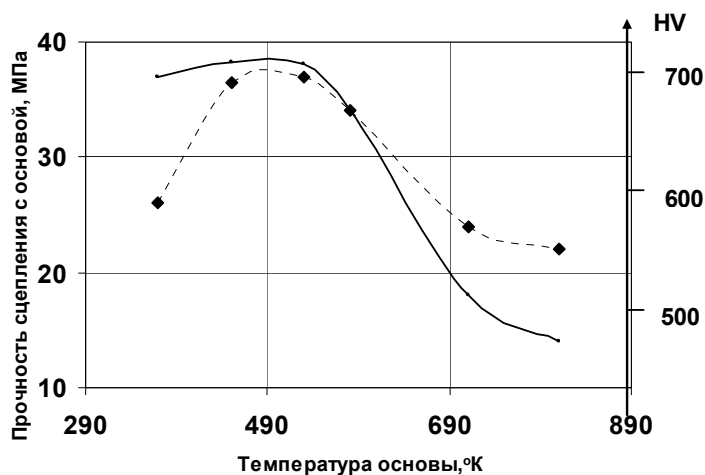


Рис. 1. Влияние температуры поверхности основы на прочность адгезии и твердость покрытия:  
 --- прочность адгезии; — твердость покрытия

Температура нагрева основы – 650 °К. Температура газовой смеси – 1000 °К. Скорость истечения газа из сопла – 200–220 м/с. Средняя скорость частиц напыляемого материала – 140–150 м/с. Толщина полученного покрытия – 0,8–1,1 мм.

Экспериментальные образцы покрытий были напылены на стальную подложку из Стали 45 в количестве 125 штук из порошкового композиционного материала на основе самофлюсующегося никелевого сплава Ni-Cr-B-Si и аморфного сплава.

Степень аморфизации вышеуказанного материала после высокоскоростного газопламенного напыления определена методом рентгеноструктурного анализа и составила 62–70 %. Микротвердость 11,1–11,4 ГПа. Испытания на износ полученных покрытий проводились на машине 2070 СМТ-1 по схеме «диск-колодка». Результаты испытаний механических и триботехнических свойств покрытий представлены в таблице.

#### Механические и триботехнические свойства покрытий

№	Материал	Твердость, HRC	Прочность адгезии, МПа	Интенсивность износа, мкм/10 <sup>3</sup> м		Коэффициент сухого трения по стали
				Образец	Контртело	
1	Сталь45 (закалка ТВЧ, эталон)	50–52	–	6,8	2,2	0,21
2	ПГ-10Н-01+50 % аморфного сплава	66–68	60–65	1,7	5,2	0,2

Установлено, что максимальная прочность адгезии составила 36 МПа при температуре основы  $\approx 50$  °К, при дальнейшем же разогреве подложки до 700 °К и выше происходит спад прочности до 22 МПа. Наибольшая твердость покрытия составила 750 HV, но при нагреве основы свыше 560 °К резко падает до 450 HV. Данное обстоятельство может быть объяснено полной кристаллизацией аморфной составляющей и потерей материалом его начальных свойств.

Исследования показали, что по мере возрастания в напыляемом порошке содержания высокотвердых частиц аморфного сплава до 40–50 % происходит последовательное возрастание прочности адгезии с основой и твердости покрытия, которые стабилизируются на уровне, соответственно, 60–75 МПа и HRC 64–68. Повышение механических свойств сопровождается снижением пористости покрытия вплоть до 2–4 % для разработанной композиции при ощутимом улучшении его триботехнических свойств: износ на уровне 1,6–1,7 мкм/10<sup>3</sup> м, коэффициент сухого трения по стали – 0,19–0,20, износ поверхности равномерный.

#### Литература

1. Коробов, Ю. С. Основные методы и материалы газотермического напыления / Ю. С. Коробов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2016. – 80 с.
2. Стасенко, Д. Л. Процесс получения сферических порошков и дискретных волокон методом высокоскоростной закалки расплава / Д. Л. Стасенко, М. Н. Верещагин // Изв. НАН Беларуси. Серия физ.-техн. наук. – 2003. – № 10. – С. 1–63.
3. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы : справ, изд. / А. П. Шлямнев [и др.]. – М. : Промметсплав, 2008. – 336 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ ПОКРЫТИЯ ЕДИНИЧНОЙ КАПЛИ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ

**В. Ю. Процко**

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

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

*Процесс газотермического напыления покрытий основан на взаимодействии с поверхностью обрабатываемого изделия частиц расплава, которые, растекаясь, деформируются и заполняют все поры и неровности заготовки, что позволяет сформировать защитный слой. Процесс растекания капли расплава по твердой поверхности состоит из трех последовательных стадий – образование из капли пленки, утончение пленки при растекании, затвердевание. Получена аналитическая зависимость для определения конечных размеров растекающейся по поверхности заготовки капли расплава. Рассмотрен процесс растекания капли расплава высокопрочного сплава на основе железа, из которого видно, что для того чтобы получить наименьшие по высоте размеры частицы, необходимо, чтобы исходные размеры капель, попадающих на поверхность кристаллизатора, были минимальными, при этом скорость их полета должна быть максимальной.*

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, расплав, растекание капли, энергия капли.

При газотермическом напылении покрытий происходит взаимодействие с поверхностью обрабатываемого изделия частицы расплава, которые, растекаясь, деформируются и заполняют все поры и неровности заготовки, что позволяет сформировать защитный слой, обладающий высокими эксплуатационными характеристиками. Однако

при формировании покрытия возникают следующие недостатки: наличие пористости и других видов несплошностей (2–15 %), сравнительно невысокая адгезионная и когезионная прочность покрытия (максимальные значения составляют 80–100 МПа) [1].

Процесс растекания капли расплава по твердой поверхности можно разделить на три последовательные стадии: 1) на начальной стадии капля под воздействием капиллярных сил и кинетической энергии превращается в плоскую «лужицу»; 2) происходит дальнейшее растекание жидкости со степенной зависимостью расстояния от времени; 3) на последней стадии скорость растекания быстро уменьшается и растекание прекращается [2].

Поэтому анализ формирования пленки из капли расплава является важной задачей, обуславливающей формирование эксплуатационных свойств получаемого покрытия.

Цель работы заключается в определении толщины пленки покрытия единичной капли при газотермическом напылении на поверхности вращающейся заготовки.

Формирование покрытия связано с процессом растекания расплава по поверхности заготовки. Второй стадии растекания расплава препятствует, главным образом, вязкое сопротивление жидкого металла, на который расходуется запас свободной поверхностной энергии. Для случая линейной задачи имеет место следующий закон перемещения фронта жидкого металла, который подчиняется уравнению [2]:

$$X = \left( \frac{3m_{\text{ж}} \Delta\sigma_{\text{ж}}}{2\eta_l \rho_l \xi} \right)^{1/3} \cdot t^{1/3}, \quad (1)$$

где  $X$  – расстояние от центра капли с массой  $m_{\text{ж}}$ ;  $\eta_l, \rho_l$  – вязкость и плотность жидкого металла;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий неоднородность толщины слоя расплава ( $\xi = 10$ ).

Процесс растекания капли расплава условно можно разделить на два этапа: кинематический и диффузионный. При кинематическом этапе происходит перемещение периметра смачивания под действием тянущего усилия  $\Delta\sigma_{\text{ж}}$ , а второй этап характеризуется доставкой массы жидкости к периметру смачивания за счет объемных сил. При изотермическом процессе термодинамическая сила  $\Delta\mu_l$  определяет тянущее усилие  $\Delta\sigma_{\text{ж}}$  на периметре смачивания:

$$\Delta\mu_l = \Delta\sigma_{\text{ж}} = \sigma_T - \sigma_{T-\text{ж}} - \sigma_{\text{ж}} \cos \theta. \quad (2)$$

Скорость перемещения жидкого металла с учетом выражения (2) описывается следующим уравнением:

$$V_{\text{ж}} = k \Delta\sigma_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяемый в начальный момент по скорости растекания  $V^0$  и угле смачивания  $\theta = \theta_0$ . С учетом уравнения Юнга соотношение для радиуса растекания жидкого металла примет следующий вид:

$$\Delta\sigma_{\text{ж}} = \sigma_{\text{ж}} (\cos \theta_0 - \cos \theta). \quad (4)$$

Используя соотношения (3) и (4), можно оценить величину скорости растекания капли жидкого металла по поверхности заготовки, а также режимы смачивания.

Теоретический анализ полной системы уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости [2] показывает, что кинетика растекания тонкого слоя при  $\delta_k \ll r_{kp}$  расплава описывается следующим соотношением:

$$r_{kp} = \left( \frac{4\Delta\sigma_{ж} m_{ж}}{\pi\mu_l \rho_l \alpha} \right)^{1/4} \cdot t^{1/4}, \quad (5)$$

где  $\Delta\sigma_{ж} = k_1(\sigma_T - \sigma_{ж}) - \sigma_{ж}$ ,  $k_1$  – коэффициент шероховатости подложки;  $m_{ж}$  – масса капли расплава;  $\mu_l$ ,  $\rho_l$  – вязкость и плотность расплава;  $\delta_k$  – толщина слоя,  $\alpha > 1$  – поправочный коэффициент учитывающий повышение гидравлического сопротивления слоя.

Соотношение (5) справедливо при выполнении условий квазистационарности ( $t \gg \frac{\rho_l \delta_k^2}{\mu_l}$ ) и безинерционности ( $Re \ll r_{kp} / \delta_k$ ).

Кинетическую энергию капли жидкого металла, летящей со скоростью  $V_r$  в направлении закалочной поверхности, можно рассчитать по следующей формуле:

$$E = 0,5\rho_l V_l V_r^2, \quad (6)$$

где  $V_l$ ,  $\rho_l$  – объем и плотность расплава. Если предположить, что температура расплава постоянна до окончания кристаллизации и приобретения пленкой расплава конечной формы, а также если пренебрегать кривизной боковой поверхности полученной пленки на цилиндрической поверхности диска-кристаллизатора, процесс утонения пленки расплава можно рассматривать с момента принятия капель формы цилиндра с квадратным осевым сечением высотой  $h_k$  и объемом  $V_r = (\pi h_k^3)/4$ .

Кинетическую энергию, необходимую для перевода сферической капли в тонкую пленку на охлаждающей поверхности кристаллизатора, можно найти из следующего выражения:

$$E = \frac{1}{2} \rho_l V_k \left( 0,5 \frac{dh_k}{dt} \right)^2. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (6, 7) позволяет получить выражение для нахождения конечных размеров растекающейся по поверхности заготовки капли расплава, т. е. пленки затвердевшего металла:

$$h_k = 0,406 \left( \frac{v}{\rho_l V_0} \right)^{0,178} \cdot h_{k0}^{0,822}. \quad (8)$$

Для анализа полученной зависимости рассмотрим процесс растекания капли расплава высокопрочного сплав на основе железа  $Fe_{75,49}Cr_1Ni_{2,5}Al_6Ca_{0,06}V_{3,1}P_{0,2}Si_{7,5}Mg_{0,05}C_{1,2}Mn_{2,9}$ . В качестве исходных данных были приняты следующие параметры:

Кинематическая вязкость и плотность расплава при температуре 1550 °С:

$$V_1 = 729,023 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \rho_1 = 7270 \text{ кг/м}^3.$$

Скорость полета капли расплава:

$$V_{01} = 2 \text{ м/с}; \quad V_{022} = 5 \text{ м/с}; \quad V_{023} = 10 \text{ м/с}; \quad V_{024} = 20 \text{ м/с}.$$

Начальный диаметр порошка:

$$d_1 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad d_2 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad d_3 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad d_4 = 150 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Зависимости конечных размеров растекающейся по поверхности кристаллизатора капли расплава от размеров капли при различных скоростях полета капли, представлены на графиках (рис. 1).

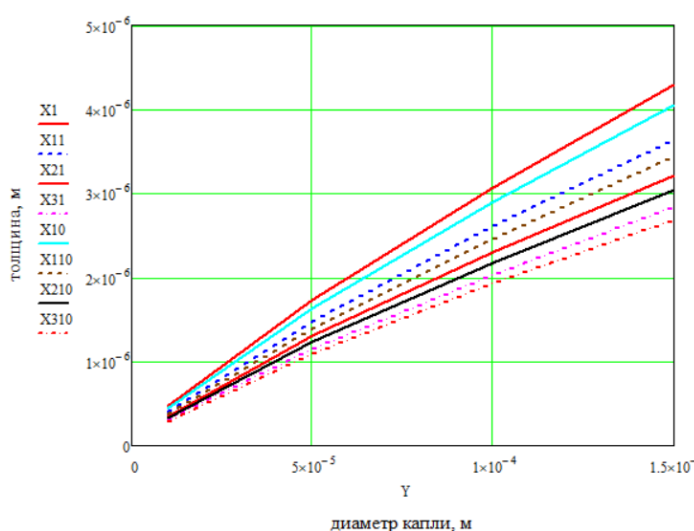


Рис. 1. Результаты расчета по определению толщины пленки, полученной из капли расплава при различных начальных условиях (линии меняются от скорости капли)

Из графиков можно видеть, что с увеличением исходных размеров капли  $d_c$  увеличивается высота растекающейся капли  $h_k$ , а с увеличением скорости полета капли  $V_0$  высота растекающейся капли  $h_k$  уменьшается. Из этого же можно сделать вывод, что для того чтобы получить наименьшие по высоте размеры частицы, необходимо, чтобы исходные размеры капель, попадающих на поверхность кристаллизатора были минимальными, а скорость их полета должна быть максимальной.

#### Литература

1. Коробов, Ю. С. Основные методы и материалы газотермического напыления / Ю. С. Коробов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2016. – 80 с.
2. Стасенко, Д. Л. Процесс получения сферических порошков и дискретных волокон методом высокоскоростной закалки расплава / Д. Л. Стасенко, М. Н. Верещагин // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2003. – № 10. – С. 1–63.



## ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМНОГО КПД ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА ОТ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХ РАБОЧУЮ КАМЕРУ

Е. М. Голубчикова

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

Научный руководитель Г. С. Кульгейко

*Представлен анализ объемных потерь жидкости в шестеренном насосе как основной фактор, определяющий КПД объемной гидромашины. Рассмотрены особенности составляющих общих утечек в зависимости от геометрической точности сопряженных поверхностей деталей рабочей камеры насоса.*

**Ключевые слова:** шестеренный насос, КПД, утечки жидкости, рабочий зазор, геометрическая точность сопряжений

Широкое применение шестеренных насосов в гидромеханических системах машин объясняется простотой и компактностью конструкции, надежностью, малой трудоемкостью изготовления, удобством обслуживания, а также, в отличие от других типов объемных насосов, возможностью непосредственного их соединения с приводными механизмами. Шестеренные насосы широко применяются в технологическом оборудовании, в системах смазки, в авиации, в качестве основного узла системы топливопитания. Эффективность работы шестеренных насосов зависит от многих факторов, в том числе от КПД насоса.

Составной частью КПД насоса является объемный коэффициент полезного действия:

$$\eta_o = \frac{Q_d}{Q_T} = 1 - \frac{Q_{ут} + Q_{вс}}{Q_T}, \quad (1)$$

где  $Q_T$  – теоретическая производительность насоса;  $Q_d$  – действительная производительность насоса;  $Q_{вс}$  – потери на всасывание;  $Q_{ут}$  – расход жидкости на утечки,

В правильно сконструированном насосе при отсутствии кавитации объемные потери определяются исключительно величиной зазоров между сопряженными поверхностями рабочих органов и уплотняющих деталей. Утечки жидкости из камеры нагнетания в камеру всасывания могут иметь место по трем основным каналам:

– через радиальный зазор между цилиндрическими поверхностями шестерен и расточек в корпусе;

– через зону зацепления вследствие погрешностей контакта зубьев;

– через зазор между торцовыми поверхностями шестерен и уплотняющих деталей.

Таким образом, объемные потери насоса:

$$Q_{ут} = Q_{y(p)} + Q_{y(z)} Q_{y(t)}, \quad (2)$$

где  $Q_{y(p)}$  – утечки через радиальные зазоры;  $Q_{y(z)}$  – утечки через зазоры в зоне зацепления;  $Q_{y(t)}$  – утечки через торцовые зазоры.

Утечки через радиальные зазоры  $\delta_p = \frac{1}{2}(D_{\text{раст}} - D_e)$ :

$$Q_{y(p)} = \left( p_{\text{нр}} \frac{\delta_p^3}{12\mu l} - \omega \frac{\delta_p D_e}{4} \right) b, \quad (3)$$

где  $p_{\text{нр}}$  – давление нагнетания;  $\mu$  – абсолютная вязкость жидкости;  $l$  – длина дуги, образующей радиальную щель;  $\omega$  – угловая скорость;  $D_e$  – диаметр окружности выступов зубьев;  $b$  – ширина зубьев (рис. 1).

Из формулы (3) следует, что с увеличением скорости вращения  $\omega$  величина радиальных утечек сокращается, а увеличение погрешностей изготовления основных деталей насоса (корпуса, роторов и валов) приводит к повышению радиальных утечек.

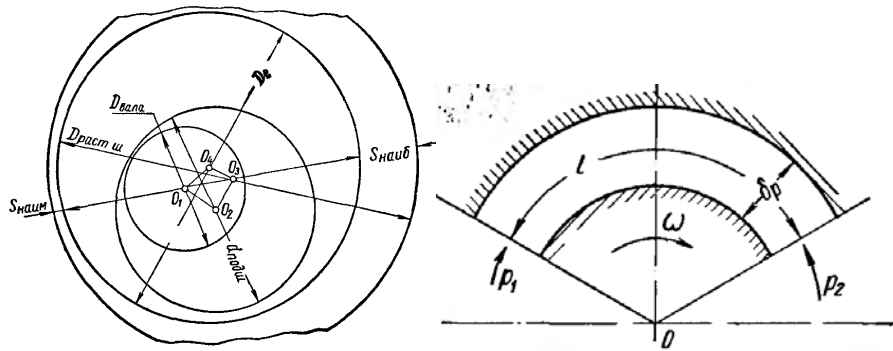


Рис. 1. Относительное положение центров:

$O_1$  – центр шестерни;  $O_2$  – центр отверстия под подшипник в корпусе;  
 $O_3$  – центр расточки в корпусе;  $O_4$  – центр вала;  $D_{\text{вала}}$  – диаметр вала;  
 $D_{\text{раст}}$  – диаметр расточки;  $D_e$  – диаметр окружности выступов зубьев;  
 $d_{\text{подш}}$  – диаметр подшипника;  $S_{\text{наиб}}$  и  $S_{\text{наим}}$  – наибольший  
 и наименьший радиальный зазор

В результате износа шестерен, дефектов поверхностей зубьев и погрешностей изготовления плотное прилегание профилей происходит не по всей ширине, а по линии «смятия» длиной  $l$  (рис. 2). В этом случае имеют место утечки из камеры нагнетания в камеру всасывания через зазор  $\delta_3$ .

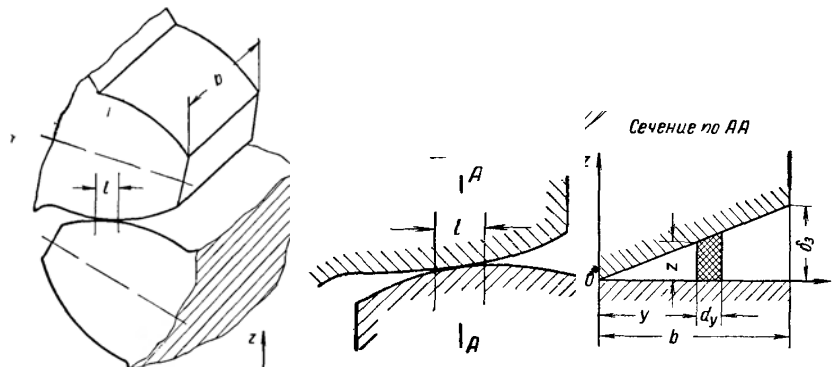


Рис. 2. Схема к расчету утечек через зазоры в зацеплении зубьев

Утечки жидкости через зазоры в зоне зацепления вследствие погрешностей контакта зубьев можно определить по формуле

$$Q_{y(3)} = p_{\text{нр}} \frac{\delta_3^3 b}{48\mu l} \quad (4)$$

Объемный КПД шестеренного насоса в значительной степени зависит от утечек через торцовые зазоры, обеспечение которых в пределах 0,01–0,02 мм весьма затруднительно. В насосах с гидравлическим поджимом опорных втулок к торцам шестерен задача достижения малых торцовых зазоров несколько облегчается, но не снимается. На рис. 3 представлена конструктивная схема шестеренного насоса с нанесенной размерной цепью для расчета торцового зазора. Плавающие втулки (левые) поджимаются к торцам шестерен давлением масла, подводимого из камеры нагнетания.

В размерной цепи для расчета торцового зазора (рис. 3) участвуют следующие звенья:  $C_1$  – несовпадение торцов колодцев (глухих расточек) в корпусе насоса;  $C_2$  – разность по высоте правых втулок;  $C_3$  – отклонение от перпендикулярности торца втулки к оси посадочной поверхности по наружному диаметру;  $C_4$  – биение правого торца шестерни;  $C_5$  – разность по высоте шестерен (ведущей и ведомой);  $C_6$  – биение левого торца шестерни. Звенья  $C_4$  и  $C_6$  (торцовое биение) относятся к оси посадочных поверхностей.

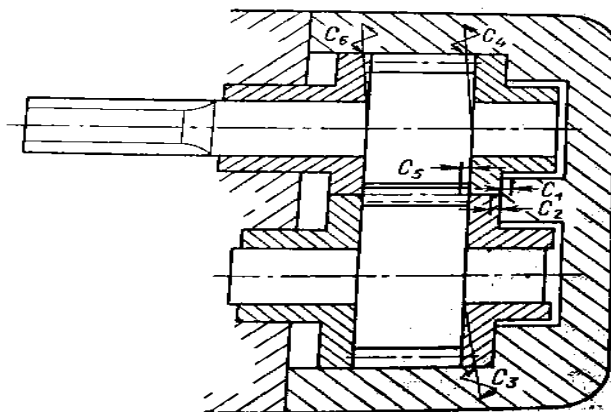


Рис. 3. Схема размерной цепи шестеренного насоса

В результате расчета размерной цепи определяется верхнее и нижнее отклонение  $\delta_T$ . Максимальная величина зазора находится в месте зацепления зубьев шестерен. Аналогичный зазор образуется и на левых торцах шестерен, несмотря на гидравлический поджим левых втулок.

Утечки через торцовые зазоры  $\delta_T$ :

$$Q_{y(T)} = p_{\text{нр}} \frac{\delta_T^3 (\beta_{\text{нр}} - \beta_{\text{вс}})}{12\mu \ln \frac{R_e}{r}} \quad (5)$$

где  $\beta_{\text{нр}}$  и  $\beta_{\text{вс}}$  – угол камеры нагнетания и всасывания;  $r$  – радиус внутренней границы торцового зазора.

Таким образом, анализ формул (3)–(5) для определения объемных потерь (утечек) жидкости в шестеренных насосах свидетельствует о чрезвычайно большом значении геометрической точности сопряженных поверхностей деталей, образующих рабочую камеру. А так как при прочих равных условиях максимальная доля утечек происходит через торцовые зазоры, наиболее высокие требования предъявляются к точности линейных размеров роторов, втулок и колодцев корпусов, а также к точности формы (плоскостности) и расположения (перпендикулярности к осям) торцовых поверхностей этих деталей.

#### Литература

1. К расчету характеристик шестеренного насоса на основе двухмерного и трехмерного моделирования / Д. П. Алексеев [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – № 4. – С. 39–44.
2. Рыбкин, Е. А. Шестеренные насосы для металлорежущих станков / Е. А. Рыбкин, А. А. Усов. – М. : Машгиз, 1960. – 187 с.
3. Юдин, Е. М. Шестеренные насосы. Основные параметры и их расчет / Е. М. Юдин. – М. : Машиностроение, 1964. – 236 с.

### **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ НАПИСАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ САМ MILL-ПРИЛОЖЕНИЯ К КОМПАС-3DV19**

**С. А. Пинчук**

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

Научный руководитель Н. А. Старовойтов

*Изложен большой набор многопроходных, сверлильных и резьбонарезных стратегий следующих видов обработки: многопроходная – наружное фрезерование, растачивание; контур – контурное фрезерование (как правило, черновое и чистовое); сверление – одно- и многопроходное сверление, центрование, обработка отверстий осевым инструментом; нарезание резьбы резцом – многопроходное нарезание резьбы резцом (цилиндрических, конических, торцевых поверхностей).*

**Ключевые слова:** САМ-системы, стратегии обработки, наружное фрезерование, растачивание, контурное фрезерование, сверление, центрование, нарезание резьбы, генерирование управляющих программ.

Сегодня львиная доля всех управляющих программ написана с использованием САМ-систем. Это очень удобно для современных станков. Использование САМ-систем позволяет в разы уменьшить время написания управляющих программ как для сложных деталей, так и для относительно простых. Помимо скорости написания увеличивается и точность обработки. Внедрение САМ-систем позволило также применить современные способы обработки, такие, как высокоскоростное фрезерование и т. д.

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

Траектория – кривая движения кромки центра инструмента, которую инженер-программист рассчитывает в САМ-системе. Траектория состоит из линейных участ-

ков и дуг. Набор данных о траектории называется CLDATA (CutterLocation DATA). Такая информация не понятна для станка.

Постпроцессор – это, как правило, файл и или несколько файлов, в которых заложена информация о конфигурации оборудования и системе ЧПУ, установленной на данное оборудование, о наличии различных функций. Разрабатывая постпроцессор, мы имеем дело с двумя фундаментальными объектами САМ-систем.

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

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

После того как управляющая программа сгенерирована в САМ-модуле, она должна быть передана на станок с ЧПУ.

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

В качестве исходных данных при создании программы управления станком, используются результаты проектирования из САМ-системы. Хотя программирование даже на этом этапе может быть осуществлено при наличии только исходного чертежа или эскиза, а также описания технологического процесса. Результатом программирования будет ввод в станок данных о размерах заготовки, параметрах ее обработки, траекториях движения детали и режущего инструмента, команд управления подачей и другими движущимися системами станка. Современные САМ-системы используются при разработке сложных технологических процессов, а в металлообработке применяются в основном как средство синтеза программ для управления станками с ЧПУ и моделирования процессов обработки. Система рассчитывает траектории и относительное движение инструмента и заготовки. Благодаря наличию специального программного модуля, называемого постпроцессором, при построении управляющей траектории САМ-система учитывает особенности кинематики конкретного станка, на котором ведется обработка.

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

Фрезерная обработка – первое САМ-приложение, полностью интегрированное в систему трехмерного моделирования КОМПАС-3D. Приложение предназначено для автоматизации разработки управляющих программ для фрезерных станков с ЧПУ.

С появлением приложения весь процесс от проектирования детали до передачи 3D-модели на станок с ЧПУ проходит в единой среде КОМПАС-3D. Для предприятия это означает сокращение срока подготовки изделий к производству – нет необходимости экспортировать данные из КОМПАС-3D в САМ-системы, нет потерь времени на конвертацию и исправление ошибок при некорректной передаче. Нет даже вероятной возможности некорректной передачи данных, а это залог успе-

ха! Упрощается и работа инженера-технолога – он использует одну 3D-систему, не отвлекаясь на сторонние приложения, и уверен в точности данных, на основе которых разработана управляющая программа.

Работа приложения в составе КОМПАС-3D позволяет в автоматическом режиме перестраивать управляющую программу для станка с ЧПУ в случае изменения геометрии детали.

Основные возможности приложения:

- построение контуров обработки визуальным выбором поверхностей или эскизов непосредственно на трехмерной модели, созданной в системе КОМПАС-3D;
- автоматический расчет траекторий. Полученные траектории полностью ассоциативны с элементами 3D-модели;
- генерация управляющей программы в промежуточном коде на основе стандарта ISO;
- конвертация управляющей программы в коды конкретной системы ЧПУ с помощью постпроцессоров. В базовый пакет поставки входят постпроцессоры для следующих систем: Маяк 600T, HI-31, FANUC Series MODEL D, SINUMERIK 802D, FAGOR CNC 8035T, CNC200;
- визуализация обработки в окне системы КОМПАС-3D с имитацией удаления материала и контролем процесса обработки.

Все операции выполняются в рабочем пространстве системы КОМПАС-3D с использованием элементов ее интерфейса (панель свойств, вкладка в дереве построения, панель инструментов). «Модуль ЧПУ. Токарная обработка» функционирует в составе 32 и 64-разрядной версии КОМПАС-3D 19.

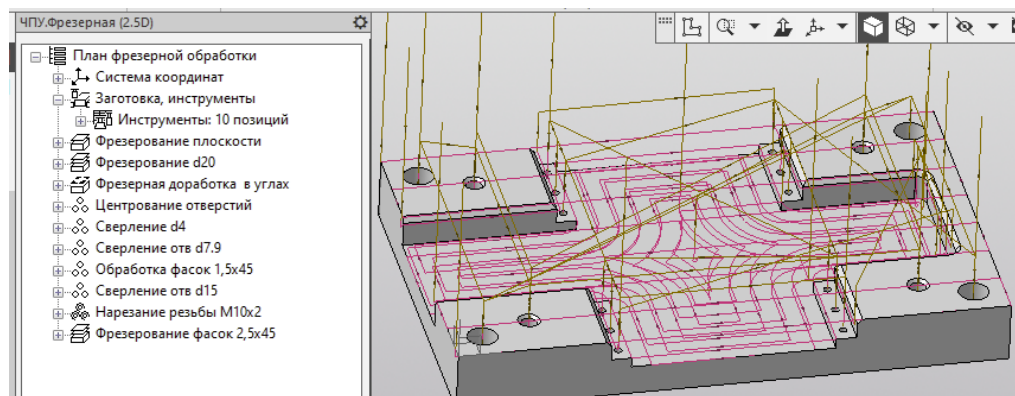


Рис. 1. Пример набора многопроходных, фрезерно-сверлильных и резбонарезных стратегий

Приложение обладает большим набором многопроходных, сверлильных и резбонарезных стратегий. Поддерживается создание следующих видов обработки (рис. 1):

- многопроходная – наружное фрезерование, растачивание;
- контур – контурное фрезерование (как правило, черновое и чистовое);
- сверление – одно- и многопроходное сверление, центрование, обработка отверстий осевым инструментом;
- нарезание резьбы резцом – многопроходное нарезание резьбы резцом (цилиндрических, конических, торцевых поверхностей);
- нарезание резьбы метчиком – нарезание резьбы плашкой или метчиком.

Особенности приложения:

– использование параметризованных моделей инструментов и станочных приспособлений. В базовый комплект поставки входит набор готовых трехмерных моделей инструментов и приспособлений. При этом есть возможность создания пользователем собственных моделей;

– использование скриптового языка программирования Python для редактирования и разработки постпроцессоров;

– возможность включения в управляющую программу станочных циклов систем ЧПУ.

#### Л и т е р а т у р а

1. Руководство программиста (УЧПУ NC-110, NC-201, NC-201M, NC-202, NC-210, NC-220, NC-230). – Режим доступа: [www.bsystem.ru](http://www.bsystem.ru).
2. Старовойтов, Н. А. Технология обработки на станках с числовым программным управлением : учеб.-метод. комплекс / Н. А. Старовойтов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – Режим доступа: [elib.gstu.by](http://elib.gstu.by).
3. Старовойтов, Н. А. Разработка управляющих программ для токарных станков с ЧПУ: практикум / Н. А. Старовойтов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 112 с.
4. Старовойтов, Н. А. Программирование на языке высокого уровня GTL при разработке управляющих программ для сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ : практикум / Н. А. Старовойтов, Е. Э. Дмитриченко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 52 с.
5. САМ-приложение CNC Millx64 к графическому редактору «Компас 3Dv19». – Режим доступа: <https://kompas.ru>.

## BEARING REMAINING USEFUL LIFE PREDICTION BASED ON NAP-HSMM

Shuai Wang

*Inner Mongolia University of Science and Technology, China*

Supervisor Chao Zhang

*The prediction of remaining useful life (RUL) is the most challenge task in the area of reliability and safety of rolling bearing. Nuisance attribute projection (NAP) is used in this paper to eliminate the impact of operating conditions in vibration signals, as the inevitable errors in the manufacturing, installation, or operation of the bearings. Due to the limitation of hidden Markov model (HMM), an HSMM with aging factor is designed to solve problem of RUL prediction. Time-domain and other features are extracted from vibration signals and then transformed by NAP projection so can be used to train HSMM model. When the health state is determined by HSMM, state remaining duration estimation is used to help calculation of RUL. In order to test the prediction ability of the model, PHM 2012 challenge data are used, the result showed that the HSMM with NAP has made a great improvement than ones without.*

**Keywords:** remaining useful life, nuisance attribute projection, hidden Semi-Markov Model.

Rolling bearings are one of the most important components in rotating machinery, which failure could cause dramatic damage to industrial production or military machinery. The key of rolling bearing life prediction is to extract proper state characteristics [1]. However, it is difficult to extract effective signal features because vibration signals are affected by noise and abnormal values. In this paper a method integrates NAP and HSMM is introduced.

NAP is a technology used in face recognition and image recognition [2], and it can also identify bearing state degradation in rolling bearing fault diagnosis [3].

In  $N$ -dimensional feature space,  $n$  samples can be represented as an  $N \times n$  order data matrix  $F = [f_1, f_2, \dots, f_n]$ , and the NAP transformation matrix  $F'$  is calculated as follows:

$$F' = PF; \quad (1)$$

$$P = E - \sum_{i=1}^d w_i w_i^T, \quad (2)$$

where  $P$  is  $N \times N$  order matrix,  $E$  for  $N \times N$  unit matrix,  $i$  represents the base vector of the  $i$ th eigenvector of NAP,  $w_i$  represents the  $i$ th eigenvector of the NAP, and parameter  $d$  represents the number of base vectors obtained from the original eigenvector space. The parameter  $d$  can be determined by actual operating conditions and sampling points [4].

Hidden Markov model has rigorous data structure and can offer reliable computing performance. An HMM model can be noted as  $\lambda = (N, M, \pi, A, B)$ , the parameters are number of states, the number of possible observations corresponding to each state, initial probability distribution vector, state transition probability matrix, observed probability matrix, respectively [5].

In normal HMM, the probability that the equipment will stay in a certain state for a certain period of time is  $P_i(d) = a_{ii}^{d-1}(1 - a_{ii})$ . This probability fit geometric distribution, which is not obeyed in most practical applications. Hidden Semi-Markov Model (HSMM) which considers the explicit distribution of the state residence probability is proposed to overcome this disadvantage. The probability value  $p_i(d)$  is used to describe the state dwell time [6].

Hidden states of HSMM represents different levels of health states and failure state of equipment. When model parameters are known, the average duration of each health state can be calculated based on the state duration distribution. So, the RUL of the equipment at a current moment can be evaluated based on the average duration of the state, the health status of the current equipment and the model parameters. Dong proposed a life prediction method based on HSMM.  $D(h_i)$  is the duration time when the equipment is in health state  $i$ , then the whole life cycle of the equipment is:

$$Useful\ Life = \sum_{i=1}^N D(h_i). \quad (3)$$

But when equipment is in the process of degradation, the RUL of equipment in the current state should gradually decrease over time. To solve this problem, Peng [8] incorporates the effects of aging factors into HSMM-based life prediction. Based on that, the state transition probability decreases over time. The remaining time of the equipment in the state  $h_i$  after time  $I$  is obtained by equation:

$$D(h_i^I) = D(h_i) \left[ \frac{1 - \left( \prod_{n=0}^{I-1} a_{ij}^n \right)}{1 - a_{ij}^n} \right], \quad (4)$$

where the  $a_{ij}^n$  is the state transition probability considering the aging factor after time  $I$  at state  $h_i$ . Therefore, the RUL of the equipment after time  $I$  at state  $h_i$  is:

$$RUL^I = D(h_i^I) + \sum_{j=i+1}^{N-1} D(h_j). \quad (5)$$



The main steps of a HSMM based life prediction method considering aging factors are as follows (fig. 1).

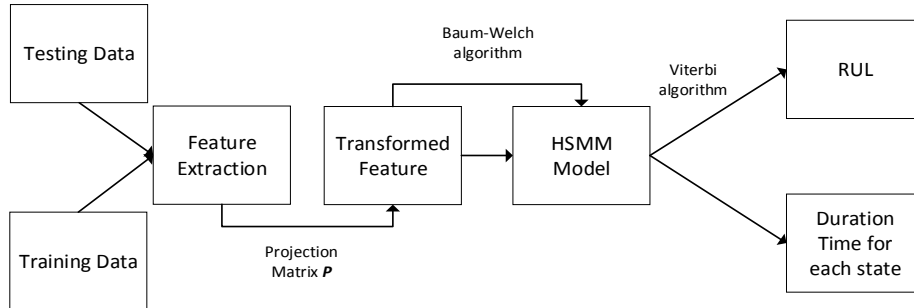


Fig. 1. RUL procedures of method based on NAP-HSMM

The run to failure dataset of bearings published by the PHM 2012 prognostic challenge is used in this paper. The data was produced by the PRONOSTIA platform, which has been designed for testing and validating bearing fault detection, diagnostic and prognostic purposes. Three different working conditions by changing the spindle speed and load values has been conducted.

Under Condition 1, a total of 7 groups of test bearing life data were collected. The types and operating conditions of the 7 groups of bearings are the same, but their life cycles vary, and their failure modes also have their own characteristics.

Only the data of condition 1 is used in this paper, 350 sets of data before and 150 sets of data after the health state turning points were intercepted to train the model. Intercepted segment mainly includes a health state and a failure state, so the number of hidden states for HSMM is set to 2.

During feature extraction, 17 dimensional features including time-domain, frequency-domain, and time-frequency domain are used. Then multiple sets of bearing features are transformed based on NAP in order to eliminate nuisance attribute information caused by operating conditions.

First 6 sets of data in condition 1 are used for training NAP-HSMM model. After projecting the features from intercepted data of the bearing 1\_7, the RUL can be calculated, and failure is predicted at 2214'th sets of files, as shown in fig. 2.

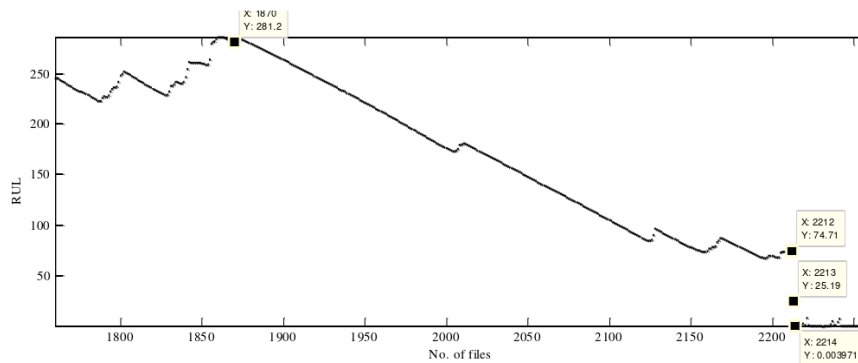


Fig. 2. Predicted RUL of Bearing1\_7 with NAP

As comparison, original features of bearing 1\_7 without NAP transformation have been put into the model. With everything else unchanged, the prediction of RUL of is shown in fig. 3. The difference in the prediction results during the initial period of time is not significant. However, when the bearing approaches the failure state, the prediction of RUL without using NAP has significant fluctuations over a period of time, which are significantly inconsistent with the actual situation.

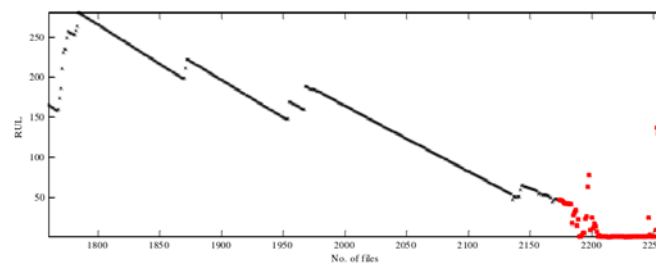


Fig. 3. Predicted RUL of Bearing1\_7 without NAP

Therefore, the prediction ability of the RUL model trained by unprojected features is weaker. The results validate the importance of the algorithm based on NAP in HSMM RUL prediction methods. Since the model presented in the paper concerns at this time only on two-state HSMM, the health state will be considered to be divided into more segmentation in the future work.

#### References

1. Jardine, A. K. S. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance / A. K. S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic // *Mechanical Systems & Signal Processing*. – 2006. – Vol. 20, Iss. 7. – P. 1483–1510.
2. Removing Illumination Artifacts From Face Images Using The Nuisance Attribute Projection; proceedings of the Acoustics Speech and Signal / V. Struc [et al.] // *Processing (ICASSP), IEEE International Conference*, on Feb., 2010.
3. An intelligent performance degradation assessment method for bearings / H. Jiang [et al.] // *Journal of Vibration and Control*. – 2016. <https://doi.org/10.1177/1077546315624996>
4. Huang, W. Rolling bearing fault diagnosis and performance degradation assessment under variable operation conditions based on nuisance attribute projection / W. Huang, J. Cheng, Y. Yang // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – P. 165–188.
5. Rabiner L R. A tutorial on hidden Markov models and selected application in speech recognition. *Proc. of the IEEE*. – 1989. – Vol. 77, Iss. 2. – P. 257–286.
6. Russell, M. J. Explicit modeling of state occupancy in hidden Markov models for automatic speech recognition / M. J. Russell, R. K. Moore. – *Proc. Of ICASSP'85, Tampa, FL, 1985*. – P. 5–8.
7. Dong, M. Equipment health diagnosis and prognosis using hidden semi-Markov models / M. Dong, D. He, P. Banerjee // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*/ – 2006. – Vol. 30, Iss. 7–8. – P. 738–749.
8. 彭颖. 基于退化隐式半马尔科夫模型的设备健康预测及系统性维护策略研究 [D]; 上海交通大学, 2011.
9. IEEE P. H. M. Data challenge. – Mode of access: <https://www.femto-st.fr/f/d/IEEEP.H.M.2012-Challenge-Details.pdf>.

**LOW CYCLIC FATIGUE OF HG70-STEEL MINING DUMP TRUCK  
FRAME UNDER LOW-TEMPERATURE: CHABOCHE MODEL  
AND FINITE ELEMENT ANALYSIS**

**Z. Y. Qu**

*School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University  
of Science and Technology, China*

Supervisors: X. F. Guo, B. Yuan

*This paper investigates the low cyclic fatigue behavior of a heavy-duty mining dump truck frame manufactured of HG70-steel under low-temperature conditions. The Chaboche cyclic plastic constitutive model is adopted to characterize the viscoplastic properties of the steel. A finite element model of the frame is subsequently implemented to investigate its structural strength and low cycle performance, integrating the intrinsic stress-strain hysteresis loop. The study reveals the softening stages of HG70-steel under low-temperature low cycle fatigue testing conditions, and investigates the stress concentration regions and maximum displacements in the structured frame. The coded in-house program can be used to assess the low cycle fatigue behavior of steels and components, providing valuable insights into the design and safety analysis of heavy-duty mining dump trucks.*

**Keywords:** HG70-steel, Low cycle fatigue, unified viscoplasticity constitutive model.

The mining dump truck frame is a vital load-bearing component that undergoes fatigue damage due to the cyclic loads of its various components and the loads it carries. Exposure to low temperatures, such as  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  can accelerate this process [1]. Hence, investigating the low-temperature fatigue behavior of HG70-steel, the primary material used in the frame, under cyclic alternating loads is necessary. In recent years, significant advancements have been made in the development of viscoplasticity modeling frameworks, and the Chaboche Unified Viscoplastic Model has shown the best predictive capability among them [2]. Previous studies have used this model to accurately predict the deformation behavior of different steel alloys, including 9Cr steel and 42CrMo4 tempered low-alloy steel [3, 4]. However, most of these studies focused on material behavior at room temperature and lacked low-temperature fatigue data. Furthermore, while finite element analysis and optimization of dump truck frames are crucial for their design and safety, they rely on the correct material intrinsic structure relationship. Therefore, this study aims to obtain the Chaboche unified viscoplastic material parameters based on low-temperature low-cycle fatigue data of HG70-steel in the frame. It also validates the model's predictive capability for alloy steel under low-temperature and low-cycle fatigue, providing an effective means for finite element analysis of dump truck frames.

First, the Chaboche unified viscoplastic modelling progress is described. For the flow rate and yield rule of steels, creep (viscous) and plastic strains in terms of inelastic strain rates are expressed as

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{f^n}{Z} \operatorname{sgn}(\sigma - \chi), \quad \operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0, \\ 0 & x = 0, \\ -1 & x < 0; \end{cases} \quad \langle x \rangle = \begin{cases} x & x \geq 0, \\ 0 & x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

The Mises yield criterion is used in this model and the specific yield function is  $f = (\sigma - \chi) - R - k$ . Furthermore, for the isotropic hardening model controlling the expansion or contraction of the yield surface, the evolution of the associated resistance

stress is  $\dot{R} = b(Q - R)\dot{p}$ . Next, to describe the translation of the yield surface in the stress space, a nonlinear motion hardening rule is used, that is,  $\chi = \sum_{i=1}^2 \chi_i$  and  $\dot{\chi}_i = C_i(a_i \dot{\varepsilon} - \chi_i \dot{p})$ . In addition, the model predicting the strain hardening and cyclic hardening/softening of engineering materials can be generated by using the viscous stress  $\sigma_v = Zp^{1/n}$ . Finally, the total stress can be expressed as

$$\sigma = \chi + (R + k + \sigma_v) \text{sgn}(\sigma - \chi) = E(\varepsilon - \varepsilon_p). \quad (2)$$

Second, fatigue tests were conducted on the MTS810 machine under the strain variation of  $\pm 0.7\%$ , and the stress-strain hysteresis loop data were recorded by Instron TMF software. By using the above-mentioned theoretical formulae and the low-temperature low cycle fatigue data of HG70-steel, the material constants can be identified, and the predictions of stress-strain hysteresis loops are presented in fig. 1. It is seen that the developed mechanical model is of high accuracy and validity.

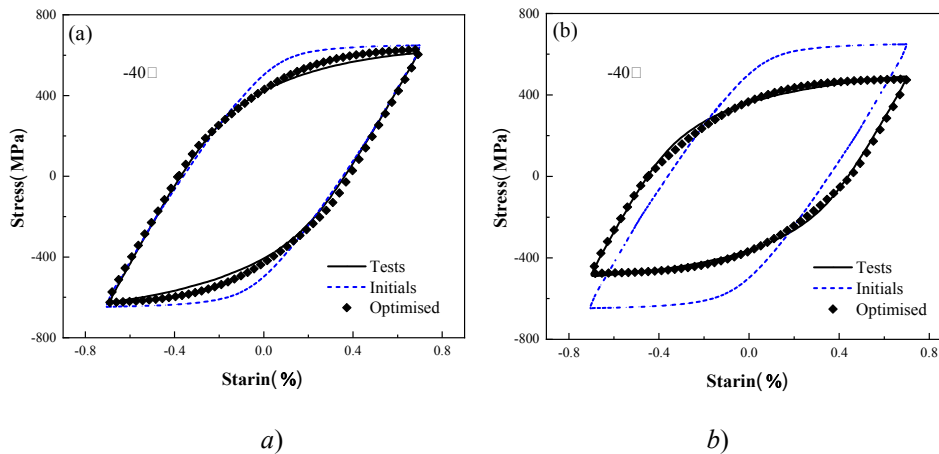


Fig. 1. Cyclic stress-strain curves obtained from experimental assessment and numerical simulation:  
*a* – Initial stage; *b* – Steady state stage

Third, the Chaboche Unified Viscoplastic Model is implemented in the Fortran language using the user subroutine interface provided by the ABAQUS finite element software. The material constants obtained through optimization are incorporated into the model to define the material properties of the frame. A finite element analysis of the frame is then conducted using time series load spectra under cyclic loading conditions, and color legends with the same scale are used to facilitate comparisons of frame changes with the number of loading cycles. fig. 2, *a-d* illustrate the displacements of the frame as the dynamic load factor increases. The results indicate that frame displacements occur primarily around the torsion barrel and its surrounding rear longitudinal beam and bumper, with the majority of deformation concentrated in the former. This corresponds to the actual damage location of the frame as reported by the company and confirms that the simulation using the model can accurately predict the fracture location, thus providing convincing results.

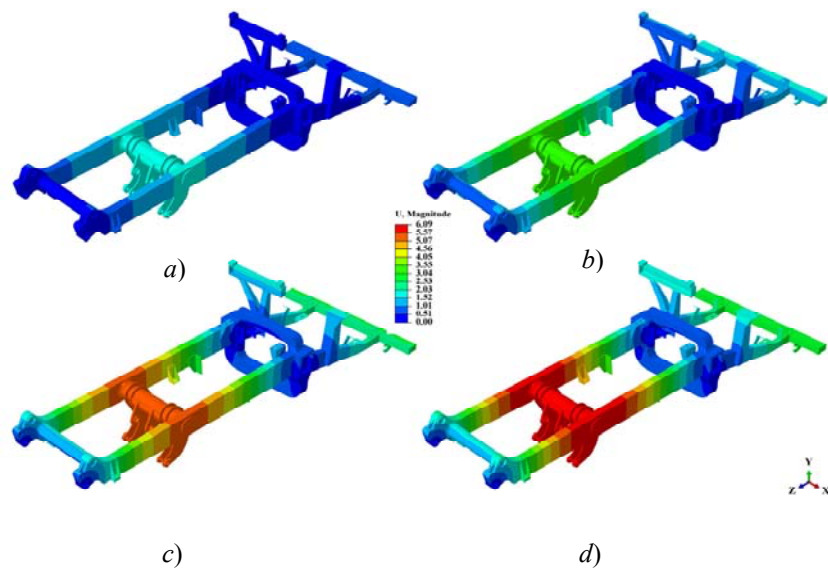


Fig. 2. Effective displacement contour maps of the frame at different time points in the third cycles

#### References

1. Mechanical properties of normal strength mild steel and high strength steel S690 in low temperature relevant to Arctic environment / J.-B. Yan [et al.] // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 61. – P. 150–159.
2. Chaboche, J. L. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions / J. L. Chaboche, P. Kanouté, F. Azzouz // *International Journal of Plasticity*. – 2012. – Vol. 35. – P. 44–66.
3. Study on Ramberg-Osgood and Chaboche models for 42CrMo4 steel and some approximations / R. Basan [et al.] // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2017. – Vol. 136. – P. 65–74.
4. Predicting damage and failure under low cycle fatigue in a 9Cr steel / F. Biglari [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2012. – N 12, Vol. 35. – P. 1079–1087.

## СЕКЦИЯ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

---

### ТЕРМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ОКСИДА ИТТРИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ЕВРОПИЕМ И ВИСМУТОМ

О. В. Давыдова, Н. Е. Дробышевская, М. Н. Харков

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

Научный руководитель Е. Н. Подденежный

*Изучено влияние легирования висмутом на характеристики порошков активированного европием оксида иттрия, полученного методом термохимического синтеза (горения). Установлено, что размеры частиц  $Y_2O_3 : Vi, Eu$  находятся в пределах от 62 до 253 нм в зависимости от вида горючего. Показано, что интенсивность люминесценции полученных материалов с добавлением висмута при возбуждении на длине волны  $\lambda = 393$  нм, выше на 15–20 %, чем без добавки.*

**Ключевые слова:** оксид иттрия, ультрадисперсные порошки, активирование, ионы европия, добавка висмута, термохимический метод.

Оксидные люминофоры в последнее десятилетие привлекают повышенное внимание ученых и разработчиков оптических и оптоэлектронных приборов различных классов и назначений. Они применяются в качестве элементов подсветки ЖК-дисплеев, в составе твердотельных источников освещения – светодиодных ламп и светильников, в конструкциях плоских автоэмиссионных экранов (Field Emission Display – FED), экранах цветного телевидения высокого разрешения, для маркировки и контроля товаров и продуктов [1].

Применение люминесцентных материалов на основе ультрадисперсных частиц оксида иттрия  $Y_2O_3$ , легированного ионами лантаноидов, в частности, европием, открывает новые возможности в создании эффективных устройств в приборостроении, фотоэлектронике, оптике [2].

Известно [3], что солегирование  $Y_2O_3 : Eu^{3+}$  ионами висмута повышает интенсивность люминесценции, однако методики получения таких композиционных материалов и влияние добавки висмута на физико-химические и структурные характеристики авторами не приводятся.

Целью настоящей работы является изучение влияния солегирования висмутом на характеристики субмикронных порошков оксида иттрия, активированных европием, полученных методом термохимического синтеза (горения) с использованием азотсодержащих органических соединений в качестве восстановителей.

Для получения люминесцентных субмикронных порошков на основе легированного европием оксида иттрия применяли метод термохимического синтеза (горения) солей  $Y(NO_3)_3$  и  $Eu(NO_3)_3$  с использованием карбамида или смеси карбамид–гексаметилентетрамин (ГМТА) в качестве горючих (восстановителей). Для синтеза солегированного висмутом оксида иттрия  $Y_2O_3 : Eu^{3+}, Vi^{3+}$  в раствор вводили дополнительно азотнокислый висмут в количестве, соответствующем содержанию в люминофоре, равном 0,05 ат. %. Процесс осуществляли при температуре поджига

смеси 350 °С и температуре прокаливания 650 °С (1 час) в муфельной печи в условиях слабо-окислительной среды. В результате получали порошки с удельной поверхностью  $S_{уд} = 7,7-12,8 \text{ м}^2/\text{г}$  (метод абсорбции аргона в жидком азоте).

После синтеза агрегированных порошков, полученных в смеси восстановителей (карбамид и ГМТА), проводили их размол в агатовой ступке и далее – прокаливание на воздухе при температурах 900–1200 °С. Средний размер агрегатов в зависимости от состава находился в пределах 50–500 мкм, а диаметр первичных частиц, определяемый методом Шеррера [4] – от 62 до 253 нм (см. таблицу).

**Удельная поверхность агрегатов и условный диаметр частиц оксида иттрия с европием и оксида иттрия с висмутом и европием, формируемых методом горения**

Температура термической обработки, °С	$\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$		$\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$	
	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	$d_{\text{ср}}$ , нм	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	$d_{\text{ср}}$ , нм
650	7,7	102	12,6	62
900	8,0	98	12,8	61
1100	5,7	136	3,9	201
1200	4,1	191	3,1	253

На рис. 1 приведены зависимости условного диаметра частиц  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$  от температуры прокаливания, полученных при использовании смеси восстановителей. С повышением температуры прокаливания в обоих случаях размеры частиц растут, а введение нитрата висмута в систему при повышении температуры прокаливания от 900 до 1200 °С приводит к полуторному росту частиц  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$  по сравнению с  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ , что связано, скорее всего, с большей поверхностной активностью висмут-содержащих частиц.

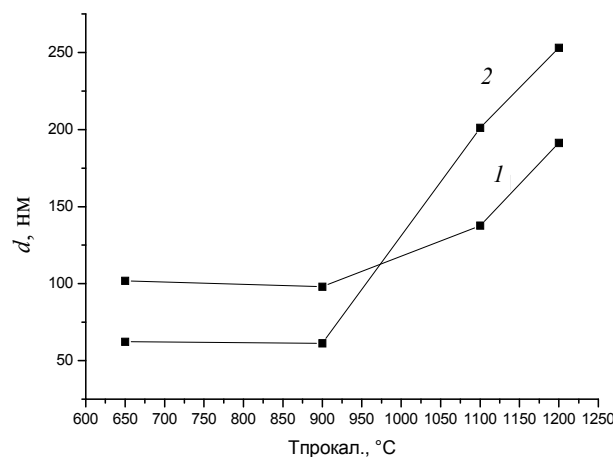


Рис. 1. Условный диаметр частиц в зависимости от температуры прокаливания при синтезе  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$  (1) и  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Bi}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$  (2)

С использованием метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) установлено, что с использованием сложного горючего в результате реакции формируются рыхлые порошки с большим количеством пустот, легко диспергируемые вручную в ступке или в шаровой мельнице (рис. 2).

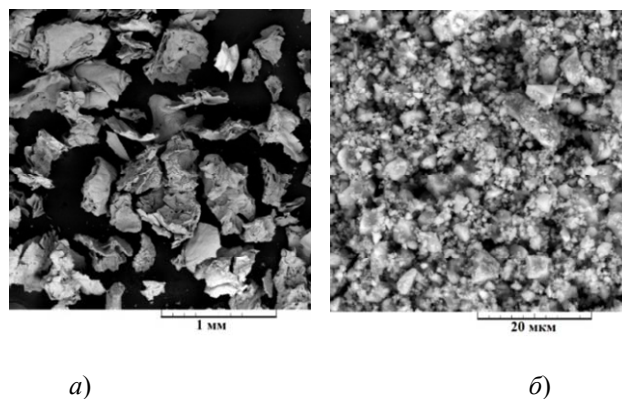


Рис. 2. СЭМ-изображение порошка  $Y_2O_3 : Eu^{3+}, Bi^{3+}$ , полученного горением в карбамиде и ГМТА после синтеза и прокаливания при  $650\text{ }^{\circ}C$  (а) и размолотый в ступке (б)

Установлено, что при возбуждении порошков на длине волны  $395,5\text{ нм}$  (фиолетовое излучение) спектр фотолюминесценции  $Y_2O_3 : Eu^{3+}$  демонстрирует узкую полосу с центром на  $612\text{ нм}$  (красная область), а введение ионов  $Bi$  в структуру в качестве соактиватора ведет к увеличению интенсивности люминесценции на  $15\text{--}20\%$ , при этом расположение линий в спектре не изменяется.

Рентгенофазовый анализ показал наличие в обоих порошках ( $Y_2O_3 : Eu^{3+}$  и  $Y_2O_3 : Bi^{3+}, Eu^{3+}$ , прокаленных при  $T = 650\text{ }^{\circ}C$ ), кристаллической монофазы оксида иттрия в соответствии с данными каталога JCPDS–1996. Других фаз в составе полученных образцов не обнаружено, что связано с малой концентрацией ионов европия и висмута в структуре.

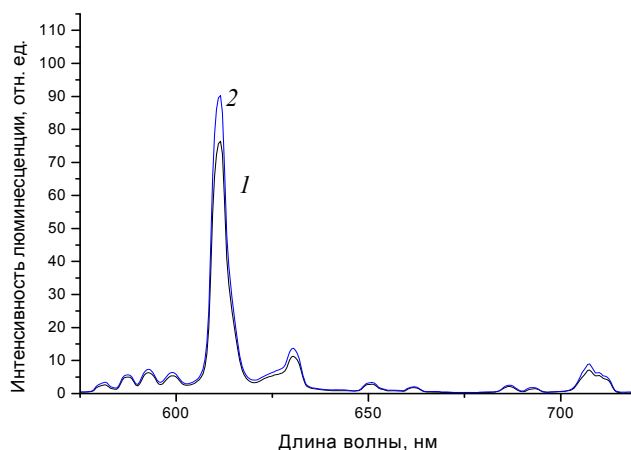


Рис. 3. Спектры люминесценции порошков  $Y_2O_3 : Eu^{3+}$  (1) и  $Y_2O_3 : Bi^{3+}, Eu^{3+}$  (2) в зависимости от наличия в решетке оксида ионов висмута при температуре  $650\text{ }^{\circ}C$



В результате обобщения вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Изучен метод получения субмикронных порошков оксида иттрия, активированных европием и солегированных висмутом, в термохимическом процессе с использованием в качестве горючего смеси карбамида и ГМТА.

2. Процесс осуществляли при температуре поджига смеси 350 °С и температуре прокаливания 650 °С (1 час) в муфельной печи в условиях слабо-окислительной среды. В результате получали порошки с удельной поверхностью  $S_{уд} = 7,7-12,8 \text{ м}^2/\text{г}$  и диаметром первичных частиц от 62 до 253 нм.

3. Прокаливание порошков после размола при температурах 900–1200 °С вызывает некоторый рост частиц  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ , а введение нитрата висмута в систему приводит к полуторному увеличению их размеров, что связано с большей поверхностной энергией висмут-содержащих частиц.

4. Установлено, что при возбуждении порошков на длине волны 395,5 нм (фиолетовое излучение) спектр фотолюминесценции  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$  демонстрирует узкую полосу с центром на 612 нм (красная область), а введение ионов Вi в структуру в качестве соактиватора ведет к увеличению интенсивности люминесценции на 15–20 %.

#### Литература

1. Hitz, Breck. Yb :  $\text{Y}_2\text{O}_3$  Ceramic Laser Generates 4.2 W / Breck Hitz // Optics Letters. – 2004. – N 6. – P. 1212–1214.
2. Mouzon, J. Synthesis of Yb :  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanoparticles and fabrication of transparent polycrystalline yttria ceramics / J. Mouzon. – Luleå : Luleå tekniska universitet, 2005. – 126 p.
3. Luminescent properties of  $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}$  synthesized by sol-gel processing / J. Zhang [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 121, N 2/3. – P. 265–268.
4. Штольц, А. К. Рентгеновский анализ микронапряжений и размера областей когерентного рассеяния в поликристаллических материалах / А. К. Штольц, А. И. Медведев, Л. В. Курбатов. – Екатеринбург, 2005. – Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/729/28729/files/ustu336.pdf>. – Дата доступа: 07.08.20.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА

Е. В. Кузнецова

*Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Республика Беларусь*

Научный руководитель Е. В. Овчинников

*Изучены технологические особенности формирования нанодисперсных алмазов детонационного синтеза; показаны этапы извлечения алмаза из шихты; выделены наиболее эффективные способы синтеза нанодисперсных алмазов; отражены факторы, оказывающие влияние параметров синтеза на выход и качество детонационных наноалмазов (ДНА) и алмазной шихты после взрыва; представлены возможные варианты подрыва заряда для получения ДНА.*

**Ключевые слова:** нанотехнологии, углеродные наноматериалы, ультрадисперсные алмазы, алмазосодержащая шихта, синтез.

В настоящее время одним из динамично развивающихся направлений являются углеродные наноматериалы и связанные с ними нанотехнологии. Нанотехнологии в современном мире носят межотраслевой характер, поскольку проникают практически во все сферы деятельности: медицину, биотехнологии, машиностроение, энергетику, электронику и др.

Несмотря на многообразие углеродных наноструктурированных материалов различной формы (фуллерены, нанотрубки, графен, луковичный углерод, наноалмаз и др.), в Республике Беларусь пока только производство наноалмаза детонационного синтеза достигло уровня промышленных масштабов.

Примечательным примером реализации принципов нанотехнологий на практике может являться разработка детонационного синтеза наноразмерных алмазов и их применение для получения материалов и покрытий различного функционального назначения с улучшенными эксплуатационными свойствами [1–4].

Цель настоящей работы состояла в изучении особенностей формирования нанодисперсных алмазов детонационного синтеза.

Под наноалмазами детонационного синтеза или ультрадисперсными алмазами понимают как собственно продукт детонации углеродсодержащих взрывчатых веществ (УДАГ) – алмазосодержащую шихту, так и получаемые из нее после химической обработки очищенные алмазы (УДА).

Алмазосодержащая шихта (АШ, УДАГ) представляет собой композиционный материал, каждая частица которого состоит из сверхтвердого и инертного алмазного ядра (носителя основных алмазных свойств наноалмаза), покрытого оболочкой из графита, аморфного и луковичного углерода, а также из различных функциональных групп, способных активно участвовать в различных химических реакциях.

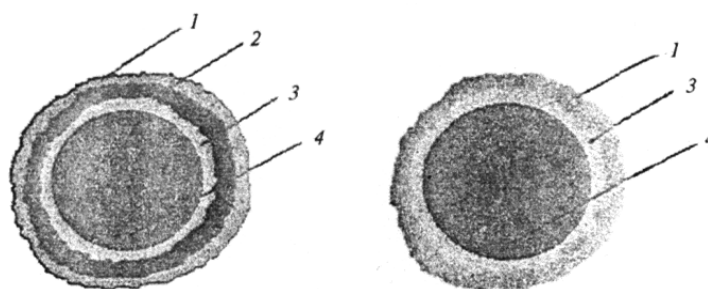


Рис. 1. Структура частицы УДА до (а) и после (б) очистки [5]:  
1 – адсорбированные газы и радикалы; 2 – графит;  
3 – луковичеподобный графит; 4 – алмазное ядро

Полного превращения углерода в алмазную форму при синтезе алмаза не происходит, и в результате образуется шихта в виде смеси алмаза с неалмазными формами углерода (НФУ). Вследствие этого можно отметить, что важной составляющей технологии получения алмаза является извлечение алмаза из шихты синтеза и очистка алмаза от различных примесей.

Извлечение алмаза из шихты осуществляется с помощью химического выделения и обычно состоит из трех этапов, представленных на рис. 2.

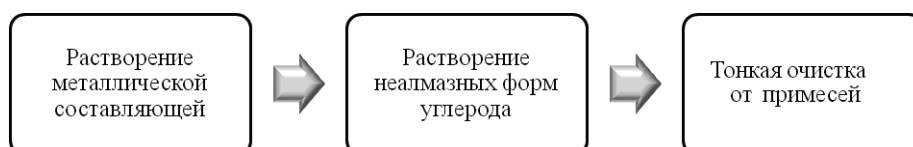


Рис. 2. Схема извлечения алмаза из шихты

В работе [6] выделены основные факторы, отражающие влияние параметров синтеза на выход и качество детонационных наноалмазов (ДНА) и алмазной шихты после взрыва. К ним относят: состав компонентов заряда и его удельная мощность; кислородный баланс (КБ); плотность и габаритные размеры заряда; состав и теплоемкость газовой среды во взрывной камере (ВК); соотношение массы заряда и объема камеры; влияние добавок в заряд взрывчатого вещества (ВВ).

Согласно [7] существуют три варианта подрыва заряда для получения ДНА, представленных на рис. 3.

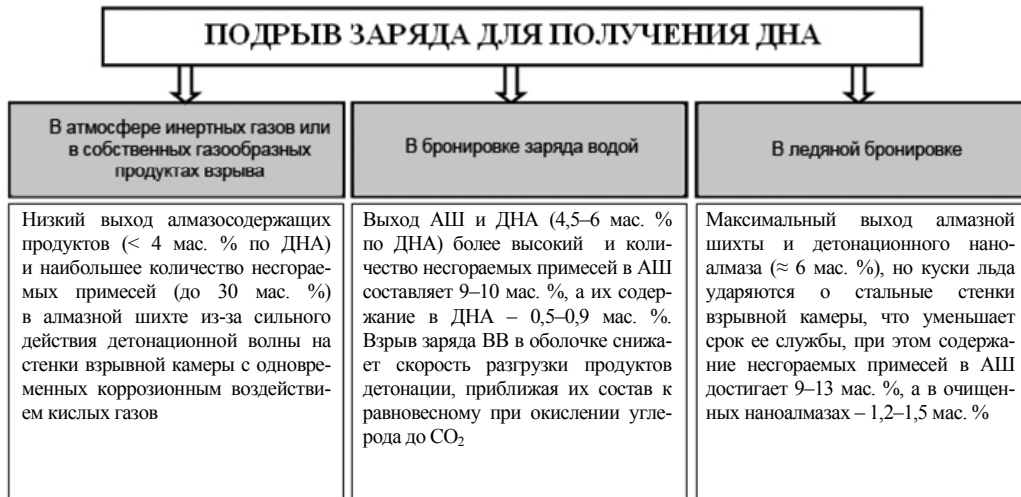


Рис. 3. Варианты подрыва заряда [7]

По сведениям опубликованных данных, для синтеза наноалмазов используется широкий спектр способов, схем и реакционных систем. Наиболее распространенными и эффективными являются следующие способы:

1. Ударное высокоскоростное воздействие на систему металл–графит (сажа) в литом (чугун) или порошкообразном состоянии с применением различных схем нагружения.

2. Детонационный способ воздействия на графит (сажу), находящихся в смеси со взрывчатым веществом.

3. Получение алмаза при детонации ВВ с отрицательным кислородным балансом (т. е. с меньшим, чем стехиометрическое, содержанием кислорода) в неокислительной среде.

Наноалмазы детонационного синтеза (УДА) являются мощными перспективными структурообразующими компонентами для различных композиционных материалов и покрытий нового поколения, эффективной технологической средой для суперфинишной обработки, основой для селективных адсорбентов и катализаторов и др.

Предприятиям и изготовителям Республики Беларусь, которые хотят быть конкурентоспособными, важно вести поиск в наномасштабе, что, в свою очередь, требует наличия соответствующего оборудования и специально обученного персонала, способных реализовать и развивать накопленный научно-технический потенциал.

#### Литература

1. Структурные особенности алмазных нанокристаллов / В. А. Лиопо [и др.] // Прогрессив. технологии и системы машиностроения. – 2017. – Т. 56, № 1. – С. 73–83.

2. Скаскевич, А. А. Структура и технология малонаполненных машиностроительных материалов на основе конструкционных термопластов, модифицированных углеродными нанокластерами : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Скаскевич. – Минск, 2000. – 18 с.
3. Нанокпозиционные функционализированные полимерные материалы / Е. В. Овчинников [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – № 2 (69). – С. 63–70.
4. Триботехнические характеристики композиционных материалов, модифицированных функционализированными углеродными частицами / Е. В. Овчинников [и др.] // Фундамент. проблемы радиоэлектр. приборостроения. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 375–379.
5. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А. Витязь [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.
6. Долматов, В. Ю. Современное состояние проблемы: детонационные наноалмазы – промышленное получение и применение / В. Ю. Долматов, Н. М. Лапчук, С. Д. Писаревский // Наноструктурные материалы: технологии, свойства, применение : сб. науч. ст. – Минск : Беларус. навука, 2017. – С. 96–108.
7. Новые аспекты в теории и практике детонационного синтеза, свойствах и применении наноалмазов / В. Ю. Долматов [и др.] // Успехи химии. – 2020. – Т. 89, № 12. – С. 1428–1462.

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ

Ю. И. Попкова

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

А. Я. Григорьев

*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого  
НАН Беларуси*

*Представлены результаты стендовых коррозионных испытаний сталей насосно-компрессорных труб в реальных скважинных средах нефтяных месторождений РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». Оценивалась коррозионная стойкость среднеуглеродистых сталей марок 32Г1А N80 (Q)APISpec 5CT, 37Г2Ф Е ГОСТ 633, низколегированных сталей марок 30X L80 (1)APISpec 5CT, 32ХГ Р110 APISpec 5CT, 25ХГБ К72 ГОСТ 31446, 30ХГМА-1 С90APISpec 5CT. Обнаружено, что среднеуглеродистая трубная сталь в горячекатаном состоянии с крупнозернистой структурой подвержена более интенсивным локальным повреждениям в сравнении с аналогичной сталью после закалки с высоким отпуском, имеющей мелкозернистую структуру. Анализ данных состава и микроструктуры исследованных материалов свидетельствует, что в заданных условиях основными факторами, снижающими коррозионную стойкость исследованных материалов, является содержание марганца более 1 мас. %, разнотернистость и наличие металлографической структуры вид мантиетта. Полученные результаты могут быть использованы при выборе материалов насосно-компрессорных труб, эксплуатируемых в условиях нефтяных месторождений Республики Беларусь.*

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

С учетом больших глубин залегания продуктивных пластов в условиях добывающих скважин нефтяных месторождений Беларуси промышленно применяются насосно-компрессорные трубы (НКТ) группы прочности N80 (Q)APISpec 5CT.

В большинстве случаев при изготовлении труб группы прочности N80 (Q) API Spec 5CT (или E ГОСТ 633) применяется высококачественная среднеуглеродистая марганцовистая сталь марки 32Г1А [1–3]. Требуемые прочностные характеристики НКТ достигаются термообработкой стали – закалкой и последующим отпускком.

К среднеуглеродистым и низколегированным трубным сталям НКТ группы прочности N80 (Q) API Spec 5CT, P110 API Spec 5CT, E ГОСТ 633, K72 ГОСТ 31446 предъявляются требования только в отношении содержания серы и фосфора, другие элементы не нормируются. Для групп прочности N80 (Q) API Spec 5CT, P110 API Spec 5CT, K72 ГОСТ 31446 их содержание не должно превышать 0,030 % каждого (здесь и далее в мас. %), для группы прочности E ГОСТ 633 – 0,045 % каждого. Для НКТ групп прочности L80 (1) API Spec 5CT и C90 API Spec 5CT устанавливаются требования по максимальному содержанию углерода – 0,43 и 0,35 %, марганца – 1,9 и 1,2 %, никеля – 0,25 и 0,99 %, фосфора – 0,03 и 0,02 %, серы 0,03 и 0,01 % соответственно. Для L80(1) API Spec 5CT дополнительно устанавливаются требования по максимальному содержанию меди – 0,35 % и кремния – 0,45 %, для C90 API Spec 5CT – по содержанию молибдена 0,25–0,85 %, по максимальному содержанию хрома – 1,5 %.

В отношении микроструктуры действующими нормативными документами предусмотрено единственное требование о необходимости получения мелкого зерна без указания допустимого размера (балла). Заводы-производители позиционируют выпускаемые трубные стали НКТ, легированные хромом на уровне 1 %, как трубные стали с повышенной коррозионной стойкостью. Однако результаты стендовых испытаний показали, что не все трубные стали, легированные хромом на уровне 1 %, проявляют повышенную коррозионную стойкость в одинаковых эксплуатационных условиях [3].

Цель работы – определение внутренних факторов (элементного состава и структуры), влияющих на коррозионную стойкость трубных сталей и выявление закономерностей коррозионной деградации НКТ в условиях углекислотной коррозии на нефтяных месторождениях Беларуси.

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

Испытания проводились в реальных скважинных средах, представляющих собой крепкие рассолы хлоридно-кальциевого типа, содержащие растворенный углекислый газ: рН 5,9–6,2, минерализация 215–225 г/л, содержание растворенного углекислого газа 25–30 мг/л при отсутствии сероводорода. Давление рабочей среды составляло 15 МПа, температура +70 °С, скорость потока 0,3 и 0,6 м/с, что соответствует условиям эксплуатации добывающих скважин месторождений Беларуси, осложненных коррозией. Стендовые испытания проводились по методике, разработанной для условий нефтяных месторождений Беларуси [4]. Исследования элементного состава, микроструктуры и морфологии поверхности ОСК проводились в соответствии со стандартными методиками в ГНУ «Институт порошковой металлургии имени О. В. Романа».

**Объекты исследований:** трубные стали, применяемые при изготовлении НКТ – среднеуглеродистые марганцовистые стали марок 32Г1А N80 (Q) API Spec 5CT, 37Г2Ф E ГОСТ 633, низколегированные стали марок 32ХГ P110 API Spec 5CT,

30X L80 (1) API Spec 5CT, 25ХГБ К72 ГОСТ 31446, 30ХГМА-1 С90 APISpec 5CT. В качестве базы сравнения выбрана промышленно применяемая среднеуглеродистая марганцовистая сталь марки 32Г1А группы прочности N80 (Q) API Spec 5CT.

**Результаты и обсуждение.** Проведенные исследования позволили выявить ключевые характеристики, которые могут оказывать влияние на коррозионную стойкость трубных сталей НКТ.

Содержание марганца в сталях марок 30X L80 (1) APISpec 5CT, 32ХГ P110 APISpec 5CT не превышает примесного значения 0,80 %, при котором он не оказывает существенного влияния на коррозионную стойкость [5, 6]. В сталях марок 25ХГБ К72 ГОСТ 31446, 32Г1А N80 (Q)APISpec 5CT, 30ХГМА-1 С90APISpec 5CT, 37Г2Ф ЕГОСТ 633 содержание марганца составляет 0,95, 1,10, 1,15, 1,55 % соответственно. Содержание марганца более 1 % в среднеуглеродистых сталях снижает их коррозионную стойкость, так как марганец обладает большей активностью в сравнении с железом, что приводит к образованию окислов и сульфидов марганца. Продукты коррозии, содержащие оксиды и сульфиды марганца, разрыхляются и отслаиваются от поверхности металла, из-за разницы параметров кристаллических решеток, что приводит к интенсификации процессов проникновения коррозионно-агрессивных компонентов к металлу [2, 7]. Однозначные данные о степени влияния повышенного содержания марганца в трубных сталях НКТ, легированных хромом на уровне 1 %, в условиях углекислотной коррозии отсутствуют.

Выявлены существенные отличия протекания коррозионных процессов в зависимости от микроструктуры. Все трубные стали, кроме стали марок 37Г2Ф Е ГОСТ 633 и 25ХГБ К72 ГОСТ 31446, после закалки с высоким отпускком имеют мелкозернистую структуру (10 балл по ГОСТ 5639) «феррит + сорбит». Стали марки 30ХГМА-1 С90 APISpec 5CT после аналогичной термообработки характеризуются микроструктурой «феррит + сорбит + бейнит». Трубная сталь марки 37Г2Ф Е ГОСТ 633 находится в горячекатаном состоянии и ее микроструктура – «перлит + феррит по границам зерен». Для стали 25ХГБ К72 ГОСТ 31446 выявлена разнородная микроструктура «феррит + сорбит». Присутствие структуры вид маншкетта свидетельствует о нарушении технологии ее термообработки. Анализ литературных данных показывает отсутствие единой точки зрения о влиянии термообработки, микроструктуры и величины действительного зерна на скорость коррозии [8–11].

После стендовых испытаний определялись скорость коррозии испытанных материалов гравиметрическим методом, глубина локальных коррозионных повреждений. Расчетным методом определена скорость локальной коррозии (показатель скорости распространения коррозии в глубину). На основании полученных данных о коррозионной деградации трубных сталей в условиях, моделирующих скважинные нефтяных месторождений Беларуси, установлены следующие закономерности:

– повышенную коррозионную стойкость проявляют трубные стали, содержащие хром на уровне 1 %. При содержании марганца до 0,8 % локальные коррозионные повреждения не наблюдались, скорость общей коррозии была в 1,7–2,6 раза меньше по сравнению с аналогичной сталью с содержанием марганца более 1 мас. % Данный факт согласуется с известными данными, свидетельствующими, что хромо-содержащие стали могут эффективно подавлять локальную коррозию за счет появления в продуктах коррозии аморфного соединения  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ , образующего плотный защитный слой [4–6];

– содержание марганца более 1 % в трубных сталях, легированных хромом на уровне 1 %, приводит к снижению коррозионной стойкости. Наблюдается локальная

коррозия, сопоставимая по скорости со среднеуглеродистой марганцовистой сталью. Полученные результаты свидетельствуют, что при таком содержании оксиды и сульфиды марганца не позволяют формироваться плотному защитному слою  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ;

– крупнозернистая микроструктура «перлит + феррит» среднеуглеродистой марганцовистой стали приводит к появлению значительных коррозионных разрушений в виде «бороздок» вдоль направления проката. Скорость локальных повреждений возрастает в 1,5 раза по сравнению со сталью, имеющей равномерную мелкозернистую структуру «феррит + сорбит» (10 балл по ГОСТ 5639);

– разнородная структура и наличие структуры вид маншкетта в трубных сталях, легированных хромом на уровне 1 %, приводят к интенсивным коррозионным разрушениям в виде «бороздок» вдоль направления проката, скорость локальных повреждений соответствует аналогичному показателю среднеуглеродистой марганцовистой стали, при этом наблюдается повышение скорости общей коррозии в 1,2–1,3 раза в сравнении с аналогичной сталью, имеющей равномерную мелкозернистую структуру. Подобная структура является недопустимой, так как кроме ухудшения прочностных характеристик насосно-компрессорных труб приводит к снижению их коррозионной стойкости.

Таким образом, можно сделать заключение, что основными внутренними факторами, снижающими коррозионную стойкость исследуемых низколегированных трубных сталей, является содержание марганца более 1 %, разнородная структура и наличие структуры вид маншкетта. Следует также отметить, что среднеуглеродистая трубная сталь в горячекатаном состоянии, имеющая крупнозернистую структуру, подвержена более интенсивным локальным повреждениям в сравнении с аналогичной сталью после закалки с высоким отпускком, имеющей мелкозернистую структуру.

**Практическая значимость.** На основании полученных результатов разработаны требования к металлургическим характеристикам низколегированной стали для условий высокой коррозионной агрессивности скважинной продукции добывающих скважин нефтяных месторождений Беларуси.

#### Л и т е р а т у р а

1. Фрейдлин, М. О. Проблема выбора стали для насосно-компрессорных труб, эксплуатируемых в углекислотных средах / М. О. Фрейдлин, С. А. Шадымухомедов / Коррозия «Территории нефтегаз». – 2011. – № 1 (18). – С. 28–34.
2. Валекжанин, И. В. Результаты эксплуатации насосно-компрессорных труб из стали марки 32Г1А в условиях углекислотной коррозии / И. В. Валекжанин, В. Э. Ткачева // Инженер. практика. – 2022. – № 2. – С. 4–12.
3. Результаты стендовых испытаний трубных сталей насосно-компрессорных труб с различным содержанием хрома, моделирующих условия эксплуатации добывающих скважин РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» / Ю. И. Попкова [и др.] // Нефтяник Полесья. – 2022. – № 1 (41). – С. 112–119.
4. Методика проведения испытаний на установке для моделирования и изучения коррозионных процессов в скважинных условиях «АА-Конкор» / БелНИПИнефть. – Гомель, 2021. – 33 с.
5. Воробьева, Г. Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств / Г. Я. Воробьева. – М. : Химия, 1975. – 816 с.
6. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – М. : Металлургия, 1983. – 359 с.
7. Иоффе, А. В. Особенности коррозионного разрушения нефтегазопроводных труб в условиях эксплуатации Коми и Западной Сибири / А. В. Иоффе, В. А. Ревякин, С. А. Князькин // Вектор науки ТГУ : сб. науч. ст. / Самар. инженер.-технол. центр. – Самара, 2010. – С. 50–54.

8. Коррозионное разрушение металла НКТ и промысловых трубопроводов в условиях эксплуатации и при лабораторных испытаниях / С. С. Петров [и др.] // Инженер. практика. – 2020. – № 5/6. – С. 32–46.
9. Завьялов, В. В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений / В. В. Завьялов. – М. : ВНИИОЭНГ, 2005. – 332 с.
10. Kermani, B. Depiction of metallurgical parameters as governing CO<sub>2</sub> corrosion / B. Kermani // Mechanism of CO<sub>2</sub> corrosion. – Houston : NACE International, 2017. – P. 205–226.
11. Dugstad, A. Effect of steel microstructure on corrosion rate and protective iron carbonate film formation / A. Dugstad, H. Hemmer, M. Seiersten // Mechanism of CO<sub>2</sub> corrosion. – Houston : NACE International, 2017. – P. 126–135.

## ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПОКРЫТИЯ. СИНТЕЗ И СВОЙСТВА

Н. Е. Демиденко

*Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Республика Беларусь*

Научный руководитель В. В. Васькевич

*В работе с использованием золь-гель метода разработаны режимы нанесения и установлены температурно-временные интервалы получения гидрофильных покрытий на основе соединений кремния, титана и циркония. Проведены исследования топографии поверхности пленок методом атомно-силовой микроскопии. С помощью метода сидячей капли проведены исследования краевого угла смачивания полученных гидрофильных пленок.*

**Ключевые слова:** покрытия, золь-гель, механическая прочность, метод сидячей капли.

Тонкие пленки с гидрофильными свойствами в последнее время приобрели исключительное значение в самых разнообразных областях их применения как современной науки и техники, так и в быту [1]. Наибольший интерес представляют гидрофильные материалы с самоочищающимися и защитными свойствами. Такие покрытия используются для предохранения поверхности стекол зданий, транспорта от загрязнения, а также для предотвращения запотевания внутренних стекол зданий, сухопутного, воздушного и водного транспорта, зеркал.

Существует два основных метода получения покрытий: вакуумное осаждение из газовой фазы и химическое осаждение из растворов. Вакуумная технология имеет ряд недостатков, основными из которых являются дорогостоящее оборудование и большие энергозатраты. В последние годы метод химического осаждения из растворов стал широко использоваться в современной микроэлектронике, что обусловлено возможностью создания материалов сложного химического состава и структуры, получение которых методом газофазного осаждения затруднено или невозможно. В связи с этим метод химического осаждения из растворов представляется наиболее выгодным для получения покрытий.

Одним из прогрессивных методов получения гидрофильных покрытий является золь-гель метод, позволяющий синтезировать различные виды материалов при невысоких температурах. Этот метод обладает такими преимуществами, как простота используемого оборудования, экономичность, экологичность, гибкость технологии [2].

В ходе проведения исследований была подготовлена серия покрытий на основе соединений титана, циркония и кремния.

В качестве основных компонент пленкообразующих растворов использовали следующие металлоорганические соединения: тетраэтилортосиликат (ТЭОС), три-



этокси(октил)силан, пропоксид титана, этоксид титана и пропоксида циркония. В качестве растворителя использовали изопропиловый спирт. Для стабилизации растворов использовали азотную кислоту. Для созревания растворов их выдерживали при температуре окружающей среды ( $22 \pm 2$ ) °С в течение 2–3 дней. После созревания полученные пленкообразующие растворы наносили на подложки из стекла.

Для получения пленок требуемой толщины и хорошей однородности установлена корреляция между параметрами коллоидного раствора и скоростью вращения центрифуги. Установлено, что для получения покрытий толщиной  $\approx 500$  нм скорость вращений центрифуги составляет 1500 об/мин.

После нанесения все покрытия подвергали термообработке в два этапа: на первом этапе сушили при 200 °С в течение 20 минут для полного удаления физически адсорбированной воды и остатков органического растворителя; на втором этапе отжигали при температуре от 300 до 400 °С в течение 60 минут для окончательного формирования оксида.

Механическая прочность полученных тонких золь-гель пленок, нанесенных на стекло, может быть охарактеризована сопротивляемостью к истиранию. При этом пленка постепенно стирается, утончается и, наконец, снимается совсем. Если адгезия незначительная и плотность небольшая, то пленка снимается при малейшем прикосновении истирающего материала. По результатам исследования механических свойств установлено, что полученные покрытия обладают высокой механической стойкостью ( $> 5000$  циклов).

Методом атомно-силовой микроскопии была исследована топография поверхности полученных пленок (рис. 1).

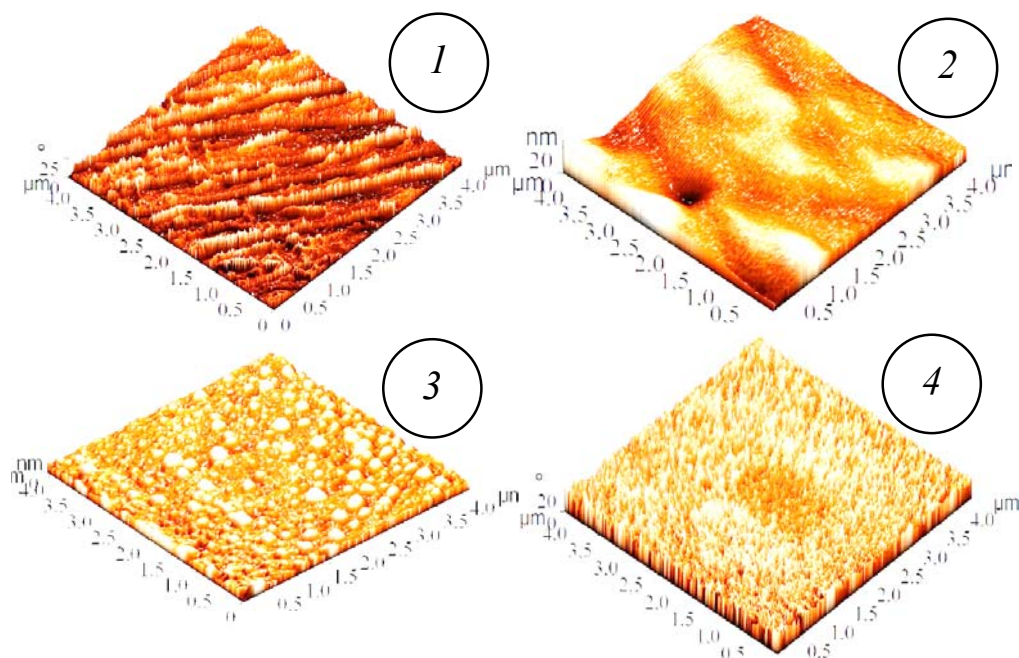


Рис. 1. Топография поверхности полученных покрытий:  
1 – на основе пропоксида циркония; 2 – на основе ТЭОСа;  
3 – на основе триэтокси(октил)силана; 4 – на основе этоксида титана

Результаты исследования топографии поверхности указывают на наличие глобул в покрытиях на основе триэтокси(октил)силана размером 700–800 нм, а высотой 60–80 нм. На поверхности образцов на основе соединений циркония образуются упорядоченные игольчатые структуры высотой 25–30 мкм.

На поверхности образцов на основе соединений этиоксида титана нет ярко выраженных изменений. Данные покрытия отличаются гладкостью. В образцах на основе пропоксида титана встречаются поры диаметром 6 нм в интервалах 400–500 нм.

Методом сидячей капли проведены исследования краевого угла смачивания полученных покрытий. С помощью дозатора на образцы наносили капли глицерина и воды по 0,5 мкл. Затем рассматривали капли под увеличительными микроскопами и фотографировали их в окуляре. Результаты исследования представлены в таблице.

**Расчет краевого угла смачивания для капель воды**

Номер образца	Основа золь	Рассчитанный угол $\theta$ для воды, градус	Рассчитанный угол $\theta$ для глицерина, градус
1	Без покрытия	63,7	76,4
2	ТЭОС	50,0	73,3
3	Этоксид титана	46,1	55,7
4	Пропоксид титана	34,1	46,4
5	Пропоксид циркония	31,9	43,3
6	Триэтокси(октил)силан + ТЭОС	43,2	59,5

По результатам исследования можно сделать вывод, что оптимальными гидрофильными свойствами (наименьшим углом смачивания) обладают покрытия на основе пропоксида циркония, прошедшие термообработку при температуре 300 °С в течение 60 минут.

В процессе проведенной работы была подготовлена серия образцов гидрофильных покрытий, определены оптимальные режимы нанесения и термообработки получаемых гидрофильных покрытий. Покрытия обладают высокой механической стойкостью (> 5000 циклов). Результаты исследования топографии поверхности методом АСМ указывают на наличие глобул, пор и игольчатых структур в полученных покрытиях.

Результаты исследования гидрофильных свойств показывают, что покрытия на основе пропоксида циркония имеют наименьший краевой угол смачивания ( $\approx 32^\circ$ ). Покрытия на основе кремния не обладают должными гидрофильными свойствами, но их краевой угол меньше краевого угла капли находящейся на стекле без покрытия.

#### Литература

1. Золь-гель технологии в микро- и нанoeлектронике. – Режим доступа: <https://docplayer.com/210683701-Zol-gel-tehnologii-v-mikro-i-nanoelektronike.html>. – Дата доступа: 16.05.2022.
2. Синтез и исследование силикатных золь-гель-покрытий для микро- и нанoeлектронике. – Режим доступа: <https://docplayer.com/28910342-Sintez-i-issledovanie-silikatnyh-zol-gel-pokrytiy-dlya-mikro-i-nanoelektroniki.html>. – Дата доступа: 16.05.2022.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПО ТОЛЩИНЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ДИСИЛИЦИДА ТИТАНА

Н. Е. Демиденко

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины», Республика Беларусь*

Научный руководитель А. Н. Петлицкий

*Данная статья посвящена исследованию формирования дисилицида титана с использованием БТО и распределению элементного и фазового состава по толщине токопроводящих пленок на его основе. Установлено, что на первом этапе термообработки преобладает диффузия титана в кремний, что приводит к формированию двух фаз силицидов, богатых металлом. Однако при длительной термообработке основным диффундирующим материалом становится кремний, что связано с быстрым переходом фазы  $Ti_5Si_3$  в фазу  $TiSi$  и невозможностью ее зафиксировать экспериментально. Результаты исследования могут быть полезными для разработки новых методов синтеза и улучшения свойств токопроводящих пленок на основе дисилицида титана.*

**Ключевые слова:** токопроводящая пленка, дисилицид титана, фазовый состав, рассеяние.

Известно, что при определенных температурах происходит реакция между титаном и кремнием, которая приводит к формированию дисилицида титана. Однако также возможна реакция между титаном и двуокисью кремния, в результате которой образуется двуокись титана и обогащенная металлом фаза силицида титана  $Ti_5Si_3$  за счет выделения кремния. Эта реакция происходит благодаря тому, что теплота образования окислов титана выше, чем у двуокиси кремния, что приводит к восстановлению двуокиси кремния титаном. Известно из литературы, что реакция начинается при температурах выше  $750\text{ }^\circ\text{C}$  и при толщине двуокиси кремния в 200 нм.

Для определения максимальной температуры, при которой дисилицид титана не начинает взаимодействовать с двуокисью кремния, был проведен контроль толщины титана до и после напыления при различных температурах (от  $650$  до  $800\text{ }^\circ\text{C}$ ), а также удаление непрореагировавшей двуокиси кремния с поверхности. Уменьшение толщины двуокиси кремния свидетельствовало о начале взаимодействия с титаном. По результатам исследования было установлено, что процесс начинается при температуре  $730\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует ранее полученным данным. На основании этого максимальной температурой для формирования дисилицида титана была выбрана температура  $720\text{ }^\circ\text{C}$ . В дальнейшем будут представлены только результаты исследования взаимодействия титана с кремнием при БТО.

Исследование спектров обратного резерфордовского рассеяния ионов гелия (рис. 1) позволило выявить, что при обработке материала с температурами выше  $620\text{ }^\circ\text{C}$  происходит диффузионное перемешивание кремния и титана. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что это приводит к образованию в металлической пленке силицидов, содержащих много металла, таких как  $Ti_5Si_3$  и  $TiSi$ . Такое поведение реакции соответствует общему правилу формирования силицидов, согласно которому при низких температурах обработки первыми образуются силициды, богатые металлом. При определенных кинетических условиях образование богатого металлом силицида продолжается до тех пор, пока не закончится металл. Затем начинается формирование следующей фазы, более богатой кремнием. Обычно такие закономерности наблюдаются при традиционной длительной термообработке,

которая обеспечивает последовательный переход от богатого металлом силицида к силициду, обогащенному кремнием. Однако при использовании БТО основным диффундирующим элементом является титан, а не кремний, как при длительной термообработке.

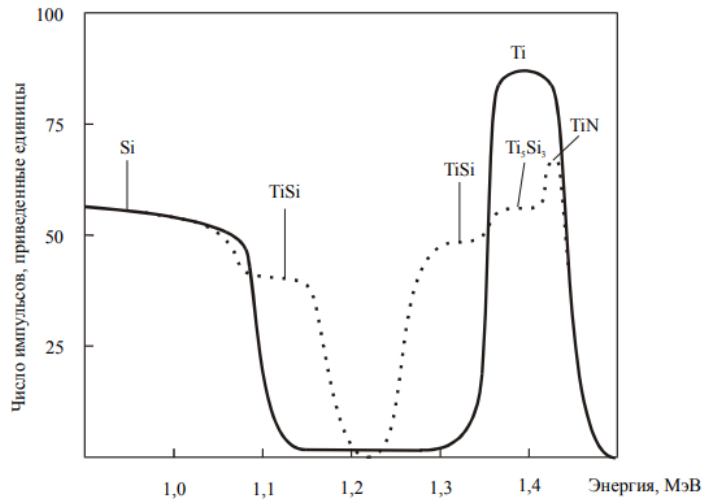


Рис. 1. Спектры обратного рассеяния ионов  $4\text{He}$  с энергией 2 МэВ для пленки титана (50 нм) на кремнии до (сплошная линия) и после (пунктирная линия) БТО в атмосфере азота при температуре  $620\text{ }^\circ\text{C}$  и длительности импульса 5 с

Это связано с тем, что при диффузионном синтезе дисилицида титана с применением БТО время термообработки сопоставимо со временем, необходимым для полного взаимодействия пленки титана с кремнием, и исчезает понятие ограниченного источника диффузии.

Это означает, что совместное присутствие двух фаз силицидов в пленке практически невозможно. В отличие от этого, при БТО, в пленке металла образуются сразу две фазы силицида, обогащенные металлом. Это указывает, что на первом этапе термообработки преобладает диффузия титана в кремний, что приводит к формированию двух фаз силицидов, богатых металлом. Однако при длительной термообработке основным диффундирующим материалом становится кремний, что связано с быстрым переходом фазы  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  в фазу  $\text{TiSi}$  и невозможностью ее зафиксировать экспериментально. Этот факт привел к утверждению, что кремний является основным диффундирующим элементом на этом этапе, хотя на самом деле на первом этапе формирования дисилицида титана основным диффундирующим элементом является титан. Это подтверждается спектрами обратного резерфордского рассеяния ионов гелия, которые показывают, что на первом этапе идет в основном диффузия титана в кремний. В случае диффузионного синтеза дисилицида титана с применением БТО время термообработки может быть сопоставимо со временем, необходимым для полного взаимодействия пленки титана с кремнием, что приводит к нарушению основного правила силицидообразования и изменению основного диффундирующего элемента.

При повышении температуры обработки БТО до  $720\text{ }^\circ\text{C}$  исчезает дифракционный пик, соответствующий  $\text{TiSi}$ , и остаются только пики, отвечающие дисилициду титана ( $\text{TiSi}_2$ ) с гранецентрированной структурой, как видно на рентгенограммах.

Дальнейшее повышение температуры обработки не вызывает фазовых превращений в системе, что свидетельствует о достижении равновесного состояния дисилицида титана-кремний в исследуемом диапазоне режимов термообработки для формирования дисилицида титана с гранецентрированной структурой.

Длительность термообработки практически не влияет на последовательность и температурные границы возникновения силицидных фаз. Стоит отметить, что в отличие от ранее опубликованных данных, которые указывали на наличие растворенного кислорода в пленке дисилицида титана, мы обнаружили фазу  $TiO_2$  и  $TiO$  на начальном этапе формирования силицида ( $T = 620\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ ). Однако на последней стадии формирования дисилицида титана ( $T = 720\text{ }^\circ\text{C}$ ) эти фазы исчезают, вероятно, из-за восстановления окислов при высоких температурах и вытеснения кислорода расплавленной фазой  $TiO_2$ .

Исследование процесса формирования силицида титана показало, что при повышении температуры обработки до  $720\text{ }^\circ\text{C}$  исчезает дифракционный пик, соответствующий  $TiSi$ , и остаются только пики, отвечающие дисилициду титана ( $TiSi_2$ ) с гранецентрированной структурой. Дальнейшее повышение температуры не вызывает фазовых превращений, что говорит о достижении равновесного состояния дисилицида титана-кремний в исследуемом диапазоне термообработки.

Однако было обнаружено, что на начальном этапе формирования силицида ( $T = 620\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ ) присутствуют фазы  $TiO_2$  и  $TiO$ , которые исчезают на последней стадии формирования дисилицида титана ( $T = 720\text{ }^\circ\text{C}$ ), возможно, из-за восстановления окислов при высоких температурах.

Длительность термообработки не оказывает существенного влияния на последовательность и температурные границы возникновения силицидных фаз. Оценка энергии активации процесса синтеза силицида титана показала, что на первом, низкотемпературном этапе идет в основном диффузия титана в кремний. Учитывая уменьшение толщины пленки титана и расход кремния при образовании силицида, были проведены расчеты с использованием выражений, описывающих зависимости коэффициента диффузии и глубины диффузии от температуры и времени:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

$$h = 2(Dt)^{\frac{1}{2}},$$

где  $D_0$  – константа диффузии,  $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $E_a$  – энергия активации, эВ;  $T$  – температура диффузии,  $^\circ\text{C}$ ;  $k$  – постоянная Больцмана,  $\text{Эв}/^\circ\text{C}$ ;  $t$  – время диффузии, с.

Проведенные расчеты показали, что энергия активации процесса диффузии титана в кремний составляет 1,3 эВ при длительной термообработке и 0,93 эВ при использовании БТО. Этот факт указывает на наличие стимулирующих факторов, которые снижают энергию активации при формировании дисилицида титана с использованием БТО. Такими факторами могут быть, например, разрыв связей кремний-кремний и электронное возбуждение в кремнии под воздействием фотонного потока. Стоит отметить, что полученное значение энергии активации процесса диффузии титана в кремний при длительной термообработке оказалось меньше, чем значение, указанное в литературе (1,5 эВ). Это может быть связано с различными условиями формирования пленки титана и подготовки поверхности кремния перед его напылением, которые существенно влияют на величину энергии активации процесса диффузии.

Для изучения процесса формирования дисилицида титана с использованием БТО была проведена электронная Оже-спектроскопия. Результаты исследования показали, что при термообработке происходит перераспределение атомов титана, кремния, кислорода и углерода. Диффузия атомов кислорода и углерода происходит по границам зерен в объеме пленки, что приводит к формированию силицида титана на границе раздела кремний-титан. С увеличением температуры и времени термообработки наблюдается увеличение толщины диффузионно-перемешанной области. После этого происходит преобладающая диффузия кремния, при которой происходит оттеснение кислорода и углерода растущим слоем к поверхности. Это сопровождается уменьшением общего количества углерода и кислорода в структуре за счет испарения. На первом этапе термообработки большая часть титана превращается в различные фазы силицида.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКООГНЕУПОРНЫХ ПРИМЕСЕЙ В КВАРЦЕВЫХ ПЕСКАХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

В. А. Соловьева

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

Научный руководитель И. Н. Прусенко

*Представлены результаты исследований влияния минералогического состава формовочных кварцевых песков на эксплуатационные свойства литейных стержней. Установлена существенная зависимость прочности, газотворности литейного стержня от процентного содержания балластных легкоплавких примесей в огнеупорном наполнителе.*

**Ключевые слова:** литейные стержни, Nobake процесс, легкоплавкие примеси.

Наибольшее распространение в литейном производстве в качестве огнеупорной основы для формовочных и стержневых смесей получил кварцевый песок. Он не обладает наилучшей твердостью или стойкостью к истиранию, не является и самым химически инертным материалом, но его свойств достаточно для производства отливок [1], с высокими показателями качества.

Высокое содержание в огнеупорном наполнителе массовой доли основного породобразующего имеет очень важное значение. Чем выше массовая доля диоксида кремния в кварцевом песке, тем меньше в нем количество примесей и загрязнений, что, в свою очередь, повышает вероятность получения отливок без наличия дефектов.

Минералогический состав кварцевых песков представлен наряду с кварцем рядом примесных (вредных) минералов, основными из которых являются полевые шпаты (ортоклазы  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ , альбиты  $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ , анортиты  $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ), слюды (мусковиты  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ , биотиты  $K_2O \cdot 6(Mg,Fe)O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ ), оксиды и гидраты оксидов железа (гематиты  $Fe_2O_3$ , магнитный железняк  $FeO \cdot Fe_2O_3$ , ильмениты  $FeO \cdot TiO_2$ ), карбонаты (кальциты, магнезиты, доломиты, сидериты и др.), глинистые минералы (каолиниты, монтмориллониты, гидрослюды).

Данные примеси содержатся в некоторых песках в значительных количествах (до 15 %), что приводит к значительному снижению прочностных характеристик, газопроницаемости литейных стержней и, как следствие, нарушению размерной геометрической точности внутренних поверхностей отливок. Из-за более низкой, чем

у кварца, температуры плавления и взаимодействия с оксидами расплавленного металла эти примеси вызывают образование пригара на отливках [2]. Кроме этого, разлагаясь при значительно более низких температурах, чем температура заливаемого металла, они выделяют углекислый газ, что может привести к образованию газовых раковин.

Наличие загрязнений песков легкоплавкими неорганическими и органическими веществами было определено в исследовании, которое включало изменение массы песка при прокаливании в печи при температуре выше температуры деструкции данных примесей. Согласно ГОСТ 29234.13–91 исследовались навески массой 1 г при выдержке в индукционной-вакуумной печи InduthermVC650V с применением тугоплавкого сердечника в течение 60 минут при температуре 1000 °С. Навеска взвешивалась после полного охлаждения и далее повторно прокаливалась в течение 10 минут. Исследование продолжалось до соблюдения постоянства массы навесок.

Основное количество легкоплавких примесей, которые обычно присутствуют в том или ином количестве на поверхности формовочных песков, разлагается при температурах до 750–950 °С. Для исследования динамики изменений потерь массы песка при прокаливании, по мере повышения температуры прокалки, проводили серию экспериментов для четырех марок песков (1К<sub>2</sub>О<sub>3</sub>03, 1К<sub>2</sub>О<sub>2</sub>025, 1К<sub>1</sub>О<sub>2</sub>02, 3К<sub>4</sub>О<sub>3</sub>03) в пределах 800–1200 °С. Результаты испытаний приведены на рис. 1.

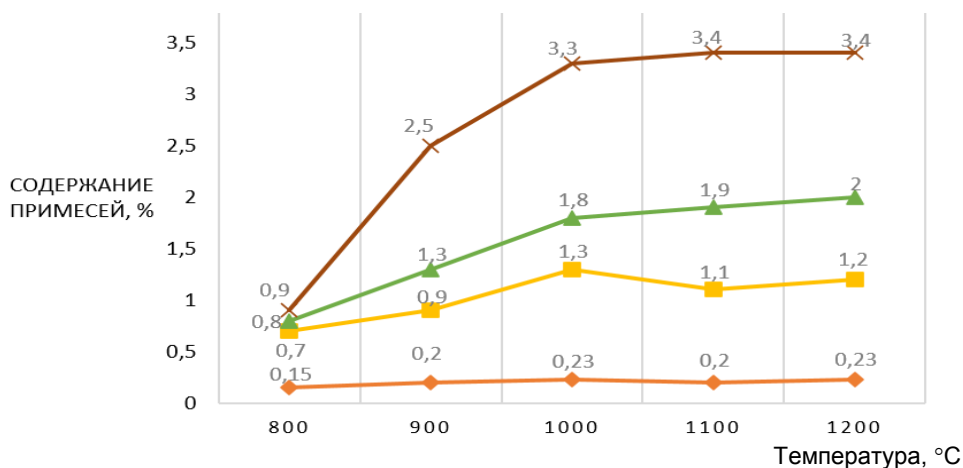


Рис. 1. Наличие загрязнений в исследуемых марках песков:

— 1К<sub>1</sub>О<sub>2</sub>02; — 1К<sub>2</sub>О<sub>3</sub>03; — 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>025; — 3К<sub>4</sub>О<sub>3</sub>03

Для марок песков 1К<sub>2</sub>О<sub>3</sub>03, 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>025, 1К<sub>1</sub>О<sub>2</sub>02 отмечен слабый рост потерь массы песка при прокаливании с увеличением температуры, в том числе в рамках, обычно задаваемых при проведении исследования температурах (1000 °С). Наличие примесей в песке на уровне 2–3 % вполне приемлемо при заливке цветных сплавов и чугуна. Для сталей желательнее поддерживать не более 2 %, во избежание науглероживания поверхностного слоя отливок.

Для песка марки 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>025 было зарегистрировано увеличение содержания примесей, нестабильных при температурах от 1100 до 1200 °С. Для других песков в этом интервале температур прироста потери массы песка при прокаливании не было обнаружено. Песок марки 3К<sub>4</sub>О<sub>3</sub>03 имеет повышенное содержание примесей, которое составляет более 3 %, что предположительно окажет негативное влияние на прочностные и газопроводящие свойства литейного стержня.

Оценку влияния содержания легкоплавких примесей и глины в зерновой основе песка на эксплуатационные характеристики литейных стержней производили для типовой рецептуры смеси по «Nobake» процессу, содержащей 100 % кварцевого песка, 1,2 % связующего вещества и 0,8 % отвердителя. Для каждой исследуемой марки огнеупорного наполнителя было изготовлено три образца из исходного и три образца из дополнительно очищенного песка. Формовочный песок очищали прокаливанием и отмучиванием по стандартной методике. Результаты исследования представлены в таблице (время отверждения 24 часа).

**Влияние наличия примесей на эксплуатационные характеристики литейных стержней, изготовленных по технологии Nobake**

Марка песка	Исследуемый показатель	Образцы с использованием исходного огнеупорного наполнителя				Образцы с использованием предварительно очищенного огнеупорного наполнителя			
		1	2	3	Среднее	1	2	3	Среднее
1K <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 03	Прочность, Н/см <sup>2</sup>	422	435	427	428	518	523	520	520,3
	Газопроницаемость, ед.	255	253	255	254,3	256	255	257	256
	Газотворность, см <sup>3</sup> /г	9	8	8	8,3	8	8	8	8
1K <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 025	Прочность, Н/см <sup>2</sup>	452	450	455	452,3	540	535	537	537,3
	Газопроницаемость, ед.	254	255	257	255,3	255	255	257	255,7
	Газотворность, см <sup>3</sup> /г	8	8	9	8,3	8	8	8	8
1K <sub>1</sub> O <sub>2</sub> 02	Прочность, Н/см <sup>2</sup>	483	490	488	487	579	584	590	584,3
	Газопроницаемость, ед.	247	245	248	246,7	248	247	247	247,3
	Газотворность, см <sup>3</sup> /г	9	9	8	8,6	8	8	9	8,3
3K <sub>4</sub> O <sub>3</sub> 03	Прочность, Н/см <sup>2</sup>	363	360	358	360,3	472	472	470	471,3
	Газопроницаемость, ед.	236	236	240	237,3	238	237	240	238,3
	Газотворность, см <sup>3</sup> /г	12	11	12	11,6	10	9	10	9,6

В результате проведенного исследования видно, что наибольшие показатели прочности на разрыв отмечены у песков 1K<sub>2</sub>O<sub>3</sub>03, 1K<sub>2</sub>O<sub>2</sub>025, 1K<sub>1</sub>O<sub>2</sub>02. В случае применения исходного песка марки 3K<sub>4</sub>O<sub>3</sub>03 в составе стержневой смеси средний показатель прочности составил 360,3 Н/см<sup>2</sup>, а после прокаливания и отмучивания наполнителя данный показатель увеличился до 471,3Н/см<sup>2</sup>, что составляет 30 % от исходного значения. Следует отметить, что данная марка песка имеет наибольшее содержание глинистой составляющей и наличие примесей в исследуемой группе.

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

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



Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что практически все входящие в состав стержневых песков минералы (кроме кварца) ухудшают их качество как наполнителей формовочных и стержневых смесей, поэтому для изготовления стержней необходимо использовать кварцевые пески с минимальным содержанием примесей.

#### Литература

1. Жуковский, С. С. Прочность литейной формы / С. С. Жуковский. – М. : Машиностроение, 1989 – 288 с.
2. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства. В 2 ч. Ч. 2. Технология изготовления отливок в разовых формах / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андрианов. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. – 406 с. : ил. – (Высш. образование).

## RECOGNITION AND ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE PARAMETERS OF POROUS ANODIC FILMS USING IMAGEJ

Marwan F. S. H. AL-Kamali

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

O. A. Kovaleva, N. V. Lushpa, I. A. Vrublevsky

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

*The most important parameters that characterize the microstructure of the films and determine the possibility of their use as porous templates are the pore diameter, porosity, and ordering of the porous structure. Therefore, to increase the efficiency of the use of porous anodic alumina films, it is important to investigate the effect of the formation modes on the microstructure. The aim of this work was to choose and optimize a model for processing experimental data obtained by scanning electron microscopy in the ImageJ to determine the parameters of the microstructure of porous films. The work shows the result of SEM image analysis and obtains plots of pore diameter distribution by size and determines the diameter of the main pores.*

**Keywords:** porous film, anodic alumina, pore diameter, SEM images, ImageJ, Gaussian fitting.

Electrochemical oxidation of aluminum in acid electrolytes is a relatively simple and efficient way to obtain oxide structures with the possibility of controlling the porous structure. In this case an anodic oxide film with a regular porous structure is formed, the pore channels of which are oriented perpendicular to the plane of the aluminum substrate. In the process of anodic oxidation such parameters as pore diameter, pore spacing, barrier layer thickness and thickness of the obtained porous film can be varied by changing the anodization modes.

The most important parameters that characterize the microstructure of the films and determine the possibility of their use as porous templates are the pore diameter, porosity, and ordering of the porous structure. The above parameters largely influence the degree of filling of porous templates when depositing metal nanoparticles in them to obtain composite films with different properties.

Therefore, to increase the efficiency of porous anodic alumina films, it is important to study the effect of the formation modes on the microstructure of the films. As a rule, the structure of anodic films is considered taking into account the generally accepted ideal model, where its morphology is an array of hexagonal ordered cells. Numerous studies have shown that the distance between pore centers is proportional to the anodization voltage. The coefficient that relates the distance between pore centers and anodization voltage varies in the range of 2.4 to 2.6 nm/V, depending on the selected anodizing electrolyte [1, 2].

In practice, to determine the distance between the pore centers, scanning electron microscopy (SEM) data are used, which, after processing microphotographs, allow to obtain

the distribution of distances between the pore centers [3–5]. In this work, ImageJ was chosen to process SEM images. This program is a powerful tool for image processing and analysis and has all the necessary tools to determine the microstructure parameters of porous anodic alumina films.

The aim of this work was to choose and optimize a model for processing experimental data obtained by scanning electron microscopy in the ImageJ to determine the microstructure parameters of porous films.

The main task of SEM image analysis of the porous film surface was to plot the distribution of microstructure parameters to visualize the analysis process and the subsequent statistical processing of the results to determine the diameter of the main pores.

Pore diameter distribution and the main pore diameter were determined from the SEM images using ImageJ. To calculate the pore principal diameter, we used Gaussian function approximation of the pore distribution curves. In this case, we used the assumption that the resulting pore distribution included both small-diameter pores and main pores - pores with a larger diameter. Of practical value is only information about the main pores, which get further development deep into the aluminum, and the data for the initial pores, which quickly stop their growth, make it difficult to carry out the analysis. Therefore, some of the pores with small diameter were not considered in the approximation. The implementation of this approach consisted in leaving only one smaller value after the maximum on the pore diameter distribution curve. In this case, the maximum on the Gauss curve corresponded to the main pore diameter ( $d_{\text{pore}}$ ) for porous aluminum oxide films.

Images of the surface with nanoscale pores for SEM image analysis in ImageJ were taken at a magnification of 50,000 (Fig. 1, *a*).

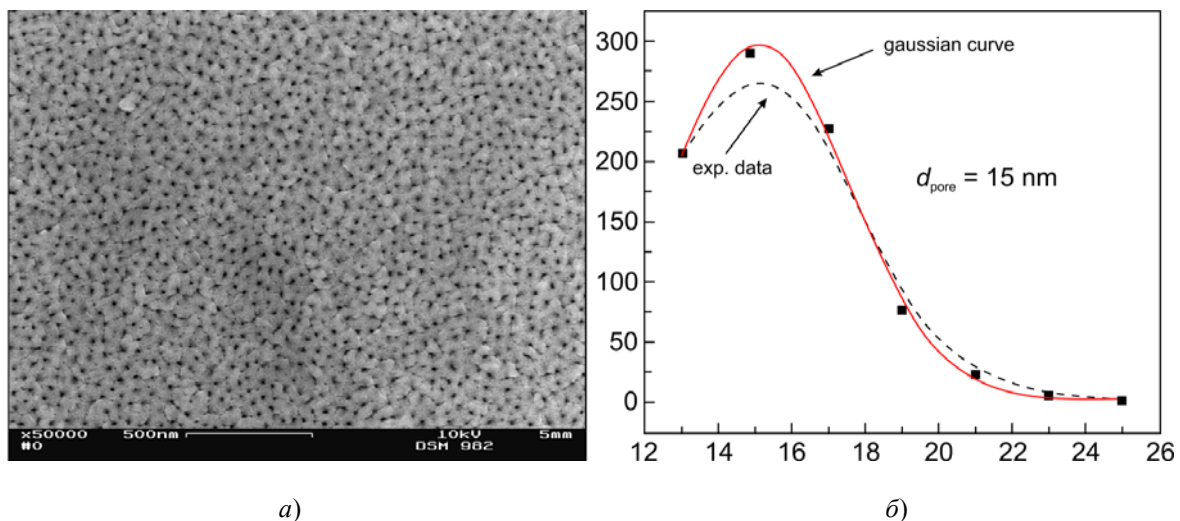


Fig. 1. EM image of the surface of the nanoporous alumina film formed in oxalic acid on a  $\text{SiO}_2$ -Si substrate (*a*), and pore diameter distribution (*b*)

The number of pores used for processing at the maximum of the curve was about 250. As can be seen from Figure 1, *b*, approximation of the analysis results with the Gaussian curve allowed us to calculate the diameter of the main pores, which was equal to  $d_{\text{pore}} = 15 \text{ nm}$ .

The results obtained for the pore diameter of the anodic alumina film agree well with the literature data, which allows us to conclude that the model used for processing experimental data in the ImageJ for analyzing the microstructure of anodic alumina films.

Литература

1. Effect of anodic oxygen evolution on cell morphology of sulfuric acid anodic alumina films / K. Chernyakova [et al.] // Journal of Solid State Electrochemistry. – 2021. – Vol. 25. – P. 1453–1460.
2. Effect of Joule Heating on Formation of Porous Structure of Thin Oxalic Acid Anodic Alumina Films / K. Chernyakova [et al.] // Journal of The Electrochemical Society. – 2018. – Vol. 165, N 7. – P. E289.
3. Features of the porous morphology of anodic alumina films at the initial stage of disordered growth / K. Chernyakova [et al.] // Electrochemistry Communications. – 2022. – Vol. 143. – P. 107391.
4. Investigation of the features of the porous morphology of anodic alumina films at the initial stage of anodization / K. V. Chernyakova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2086. – P. 1–4.
5. Morphology investigation of nanoporous anodic alumina films with image analysis / N. V. Lushpa [et al.] // Materials Physics and Mechanics. – 2019. – № 41. – P. 74–77.

## БЫТОВЫЕ ПОЛИМЕРЫ: ПОЛЬЗА И ВРЕД

Н. Г. Малашков

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

Научный руководитель С. Н. Бобрышева

*Бытовые полимеры, такие как пластиковые упаковки, одежда, посуда и другие изделия играют важную роль в нашей повседневной жизни, обеспечивая удобство и функциональность. Однако их использование также сопряжено с рядом вопросов, таких как загрязнение окружающей среды пластиковыми отходами, выбросы парниковых газов при производстве полимеров, их неэффективное использование и трудности в переработке. В данной статье рассматриваются преимущества и недостатки бытовых полимеров, а также исследуются возможности улучшения их устойчивости и более эффективного использования. Рассматриваются также альтернативные материалы, такие как биополимеры и наноматериалы как более экологически устойчивые альтернативы традиционным пластикам. В заключение подчеркивается важность более ответственного и устойчивого подхода к использованию бытовых полимеров, включая сокращение их использования, улучшение методов переработки и разработку более экологически устойчивых альтернатив.*

**Ключевые слова:** бытовые полимеры, пластиковые отходы, методы переработки, экологически устойчивые альтернативы.

Полимеры – это длинные молекулы, состоящие из повторяющихся мономерных единиц, их можно найти практически везде в нашей повседневной жизни. Полимеры нашли широкое применение в производстве различных изделий и продуктов, таких как пластиковая упаковка, строительные материалы, автомобильные детали, медицинские изделия и др. Они стали неотъемлемой частью нашей культуры и образа жизни, обеспечивая удобство, экономичность и прочность во многих аспектах нашей повседневной деятельности.

Однако вместе с пользой использование бытовых полимеров также имеет свои негативные аспекты. Они могут оказывать влияние на окружающую среду и здоровье человека, вызывая различные проблемы, такие как загрязнение окружающей среды, истощение природных ресурсов и возможные воздействия на здоровье людей. В данной научной статье будет проведен анализ пользы и вреда бытовых полимеров с учетом их влияния на здоровье окружающей среды и здоровье человека.

Одним из главных преимуществ использования бытовых полимеров является их прочность и легкость. Полимеры обладают высокой механической прочностью,

что делает их идеальными для использования в производстве различных изделий, таких как пластиковая упаковка, автомобильные детали, бытовая техника и др. Благодаря легкому весу полимерных материалов, они также способствуют снижению веса и увеличению энергоэффективности транспортных средств, что может сократить выбросы парниковых газов и снизить потребление природных ресурсов.

Еще одним преимуществом бытовых полимеров является их удобство в использовании. Полимеры легко поддаются формованию, что позволяет создавать из них изделия различных форм и размеров. Они также обладают хорошими барьерными свойствами, что делает их эффективными для упаковки пищевых продуктов, предотвращая загрязнение и сохраняя свежесть продуктов. Кроме того, бытовые полимеры обладают химической стабильностью, что делает их долговечными и устойчивыми к воздействию внешних факторов, таких как влага, ультрафиолетовое излучение и температурные колебания.

Еще одним аспектом пользы бытовых полимеров является их экономичность. Производство полимерных материалов обычно требует меньше энергии и воды по сравнению с другими материалами, такими как металлы или стекло. Они также могут быть переработаны и использованы повторно, что способствует сокращению отходов и снижению нагрузки на свалки. Бытовые полимеры также могут быть экономически выгодными в производстве многих товаров, так как они дешевле в производстве по сравнению с другими материалами, что может снижать стоимость конечных продуктов.

Однако вместе с пользой использование бытовых полимеров также может иметь потенциальные вредные последствия.

Один из основных аспектов вреда бытовых полимеров связан с их долгосрочным воздействием на окружающую среду. Полимеры обладают высокой стойкостью к разложению, что может приводить к накоплению пластиковых отходов в окружающей среде, таких как моря, океаны, леса и другие экосистемы. Это может вызывать проблемы загрязнения водных и сухопутных ресурсов, угрожая животному миру и морским организмам, а также нарушая экологическую устойчивость экосистем.

Еще одним потенциальным вредом бытовых полимеров является их влияние на здоровье человека. Некоторые полимеры могут содержать вредные химические вещества, такие как фталаты, бисфенол-А (BPA) и другие, которые могут переходить в пищевые продукты или воздух, что может вызывать риск отравления или других заболеваний у людей. Кроме того, неконтролируемое сжигание пластиковых отходов может приводить к выделению вредных веществ в атмосферу, загрязняя воздух и повышая риск заболеваний дыхательной системы у людей.

Еще одним аспектом вреда бытовых полимеров является их потенциальное воздействие на климат. Производство полимерных материалов требует энергии, часто производимой из нефтепродуктов, и выбросы парниковых газов в процессе производства могут способствовать глобальному потеплению и изменению климата. Кроме того, большой объем пластиковых отходов, которые накапливаются в окружающей среде, также может приводить к загрязнению водных ресурсов и нарушению экосистем, что, в свою очередь, может влиять на климатические процессы.

Бытовые полимеры имеют множество преимуществ, таких как прочность, легкость, удобство в использовании и экономичность. Однако они также имеют некоторые недостатки, включая потенциальный вред для окружающей среды, здоровья человека и климата. Накопление пластиковых отходов в природе может вызывать загрязнение водных и сухопутных ресурсов, угрожая биоразнообразию и экосистемам. Вредные химические вещества, содержащиеся в неконтролируемых полимер-

ных материалах, могут вызывать риск отравления или заболеваний у людей. Кроме того, производство и утилизация пластика может иметь отрицательное влияние на климат, вызывая выбросы парниковых газов и изменение климатических процессов.

Для снижения вреда от бытовых полимеров и повышения их устойчивости, необходимо применять подходы устойчивого производства, использования и утилизации полимерных материалов. Это может включать снижение потребления пластиковых изделий, повышение рециклинга и переработки пластиковых отходов, использование экологически безопасных альтернативных материалов, а также развитие более эффективных методов производства и утилизации полимеров.

Дополнительные исследования и мониторинг необходимы для оценки потенциальных рисков и воздействия бытовых полимеров на окружающую среду, здоровье человека и климат, а также разработки новых решений и технологий для минимизации негативных последствий. Кроме того, важно осуществлять образовательные программы, направленные на повышение осведомленности и экологической ответственности среди населения и бизнеса.

В заключение бытовые полимеры имеют множество полезных свойств, однако они также могут приносить вред окружающей среде, здоровью человека и климату. Для достижения устойчивого развития и минимизации негативных последствий использования полимерных материалов необходимо применять комплексный подход, включающий устойчивое производство, использование, утилизацию и образование населения. Дальнейшие исследования и разработки в данной области будут способствовать более эффективному использованию полимеров, снижению их отрицательного воздействия на окружающую среду и обеспечению устойчивого развития.

#### Л и т е р а т у р а

1. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastic ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
2. Andrady, A. L. (2015). Microplastics in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 92(1–2), 170–179.
3. Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166.
4. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126.
5. Ellen MacArthur Foundation (2016). *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics*. Report. Retrieved from: [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/NPEC-Hybrid\\_English\\_22-11-17\\_Digital.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/NPEC-Hybrid_English_22-11-17_Digital.pdf).
6. United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). *Single-use Plastics: A roadmap for sustainability*. Report. Retrieved from: <https://www.unenvironment.org/resources/report/single-use-plastics-roadmap-sustainability>.
7. European Commission (2020). *A European strategy for plastics in a circular economy*. Report. Retrieved from: <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy.pdf>.
8. World Health Organization (WHO) (2019). *Chemicals of public health concern. Microplastics in drinking-water*. Report. Retrieved from: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/microplastics-in-drinking-water/en/](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/microplastics-in-drinking-water/en/).
9. Hahladakis, J. N., Iacovidou, E., & Velis, C. A. (2018). Circular economy: closing the loop on plastics waste. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1306–1316.
10. Roy, P. K., Titus, S., Surendran, D., & Shukla, S. P. (2019). Plastics to fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 460–473.
11. Azevedo, L. F., & Carvalho, L. F. (2018). Eco-friendly alternatives to conventional plastics: Biopolymers and nano-based materials. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(35), 34907–34918.

## ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕЩЕСТВА ОТ ВИДА ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

У. В. Ключко

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

Научный руководитель П. С. Шаповалов

*Решено уравнение у теплопроводности и получено распределение температуры при круговом гауссовом пучке и кольцевыми гауссовыми пучками. Найдены более оптимальные формы пучков при резке и наплавке вещества.*

**Ключевые слова:** круговой лазерный пучок, нагрев лазером, распределение температуры при лазерном нагреве.

В промышленном производстве лазерные пучки находят применение для разных производственных операций [1]. Лазеры применяются в технологических процессах, которые более эффективны, чем классические методы, и когда невозможно использовать другие процессы. Использование лазера зачастую упрощает производственный процесс и дает большую производительность.

Для оптимального использования лазеров необходимо знать распределение температуры в веществе, в поперечном сечении лазерного пучка. Особенно это важно, если лазеры используются для резки материалов, для локального плавления и наплавки. При нагреве лазерным излучением вещества распределение температурного поля в материале зависит от формы используемого лазерного пучка. Знание температурного поля в веществе позволяет выбрать наиболее эффективные и оптимальные способы обработки материалов.

В качестве исходного уравнения для нахождения распределения температуры в веществе, при нагреве мощным лазерным световым пучком, используем неоднородное эллиптическое уравнение теплопроводности [2]. Так как применяемый лазерный пучок обладает круговой симметрией, то при расчете температуры запишем уравнение теплопроводности в полярной системе координат, которое в этом случае примет вид:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = -\frac{1}{\lambda} I, \quad (1)$$

где  $T$  – искомая функция распределения температуры в веществе;  $\lambda$  – теплопроводность вещества;  $I$  – интенсивность лазерного светового пучка;  $r$  – радиус в полярной системе координаты.

Рассмотрим лазерный пучок с круговой симметрией, следовательно, и тепловой источник, получаемый при поглощении света веществом, обладает круговой симметрией. Зависимость интенсивности используемого лазерного пучка от поперечной координаты  $r$  запишем в виде круговой гауссовой функции:

$$I = (C_0 + C_1 \cdot r^2) \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right). \quad (2)$$

Здесь  $w$  – поперечный радиус пучка. Если  $C_0 \neq 0, C_1 = 0$ , мы имеем гауссово распределение поля, если  $C_0 = 0, C_1 \neq 0$ , то в этом случае кольцевое гауссово распределение температуры.

С учетом стоящей задачи граничные условия для решения уравнения (1) запишем в следующем виде:

$$T(r = b) = 0; \tag{3a}$$

$$\frac{dT(r = 0)}{dr} = 0. \tag{3б}$$

Из граничного условия (3а) следует, что нагреваемая энергия в виде тепла сконцентрирована в диапазоне  $r \in [0, b]$ . Второе граничное уравнение (3б) – следствие осевой симметрии используемых лазерных тепловых источников для нагрева вещества.

Тогда обыкновенное дифференциальное уравнение (1) запишется в следующем виде:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{1}{\lambda} (C_0 + C_1 \cdot r) \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right). \tag{4}$$

После первого интегрирования дифференциального уравнения (1), при учете граничного условия (3б), получим следующее уравнение:

$$\frac{dT}{dr} = C_0 \frac{w^2}{4\lambda} r e^{-\frac{2r^2}{w^2}} + C_1 \frac{w^4}{8\lambda} r^3 e^{-\frac{2r^2}{w^2}}. \tag{5}$$

Интегрируя повторно с учетом граничного условия (3а), получим решение через специальные эллиптические функции:

$$T = -\frac{\lambda w^2}{8} \left( C_0 - C_1 \frac{w^2}{2} \right) \left[ \left( Ei\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) - Ei\left(\frac{2b^2}{w^2}\right) - 2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) \right) \right]. \tag{6}$$

При численном расчете решений (5), (6) использовались как круговые, так и кольцевые гауссовы пучки (рис. 1).

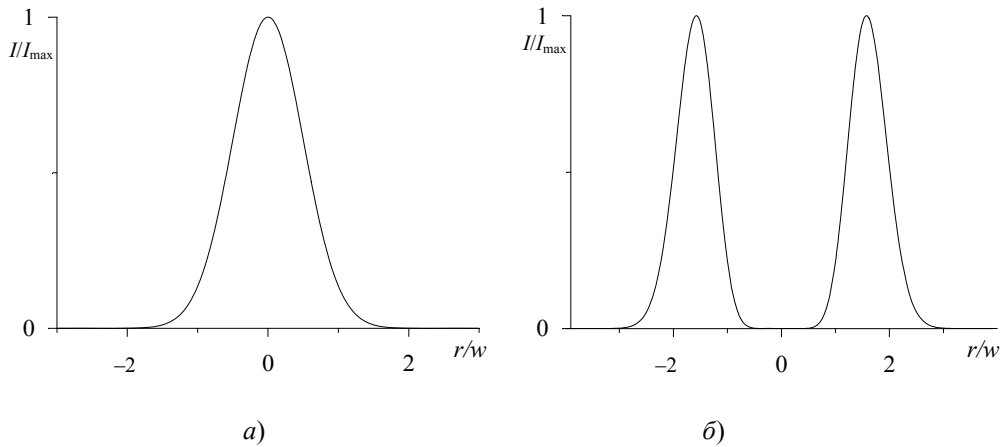


Рис. 1. Зависимость поперечного распределения интенсивности излучения при использовании кругового (а)  $C_0 \neq 0, C_1 = 0$  и кольцевого гауссова пучка (б)  $C_0 = 0, C_1 \neq 0$

Качественное распределение температурного поля при использовании круговых и кольцевых пучков на поверхности вещества имеет вид, представленный на рис. 2.

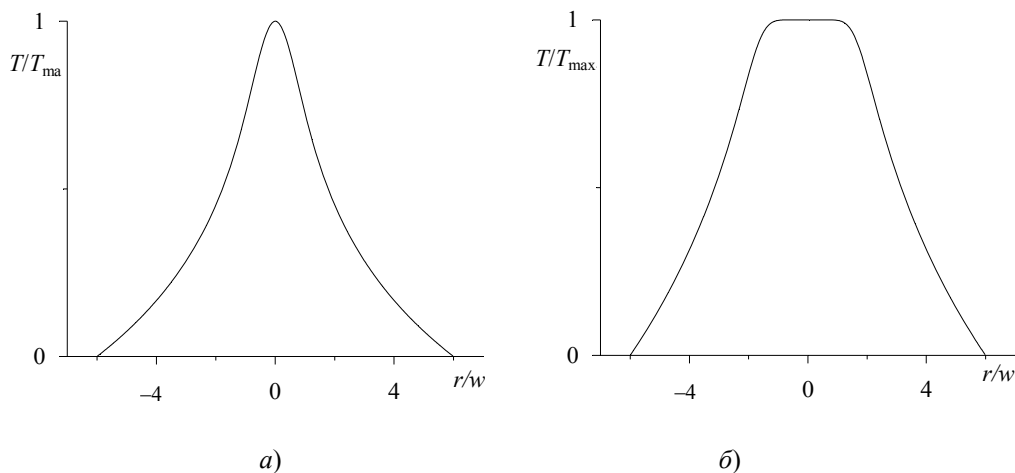


Рис. 2. Форма температурного поля на поверхности вещества при нагреве круговым гауссовым пучком (а)  $C_0 \neq 0$ ,  $C_1 = 0$ ,  $b = 6r/w$ , кольцевым гауссовым пучком (б)  $C_0 = 0$ ,  $C_1 \neq 0$ ,  $b = 6r/w$  при одинаковой мощности пучков

Из полученных результатов следует, что использование кругового пучка приводит к более узкому отверстию в материале, а при использовании кольцевого гауссова пучка приводит к более равномерному и более широкому распределению температурного поля. Использование круговых гауссовых пучков предпочтительно для резки материалов и лазерным сверлении. Использование кольцевых гауссовых пучков предпочтительно для равномерного нагрева и плавления (наплавки) вещества.

#### Литература

1. Веденов, А. А. Физические процессы при лазерной обработке материалов / А. А. Веденов, Г. Г. Гладуш. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 211 с.
2. Мисуров, А. И. Технология лазерной наплавки / А. И. Мисуров, Б. М. Федоров. – М. : Изд-во МГТУ, 2004. – 288 с.

### СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНОЙ ФИКСАЦИИ ПОЗВОНОЧНИКА)

А. А. Кашперов

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

Научный руководитель Ж. В. Кадолич

*Поставлены и решены задачи по прогнозированию данных, позволяющих оценить потребность в транспедикулярных винтах (структурные элементы конструкции для транспедикулярной фиксации позвоночника) в масштабах Республики Беларусь на 2022–2023 гг. Полученные результаты позволяют обосновать экономическую целесообразность производства навигационных шаблонов – устройств, использование которых в медицинской практике повышает процент успеха операции на позвоночнике.*

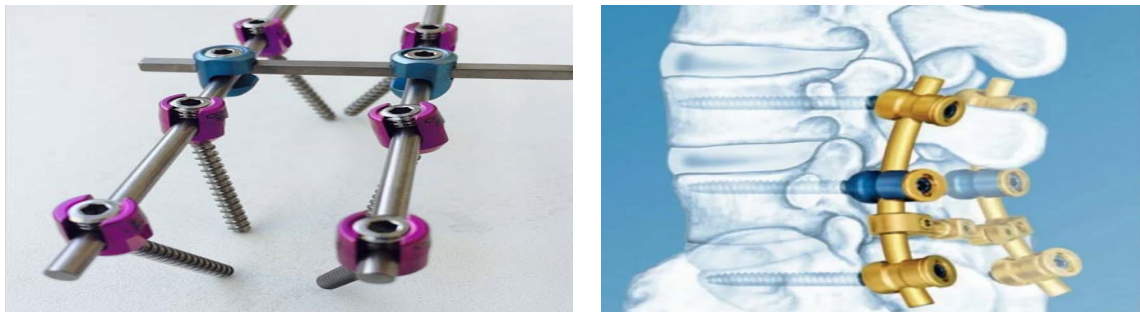


**Ключевые слова:** транспедикулярный винт, транспедикулярная конструкция, навигационный шаблон, прогнозирование.

Позвоночник – основная часть осевого скелета человека, которая при определенных чрезмерных нагрузках, ударах, травмах или генетических отклонениях может «выйти из строя». Вывихи, переломы, дегенеративно-дистрофические процессы, врожденные и приобретенные дефекты, включая сколиотическую деформацию, неудачные операции на позвоночнике – все эти факторы отрицательно сказываются на качестве жизни, здоровье и двигательных возможностях человека. Стабилизирующие металлоконструкции, созданные в результате симбиоза специалистов технического и медицинского профилей, помогают устранить перечисленные выше проблемы.

Согласно данным работ [1, 2], транспедикулярная фиксация позвоночника – операция, при которой позвонки фиксируются и стабилизируются при помощи специальных имплантов – транспедикулярных винтов (рис. 1). В каждом позвонке есть точка ввода такого винта. С помощью специальных инструментов винты вкручиваются в эту точку, определяя анатомически правильное расположение позвоночника.

Следует отметить, что транспедикулярные винты являются частью сборной конструкции, называемой транспедикулярной, в состав которой входят также гайки и репонирующие штанги.



а)

б)

Рис. 1. Транспедикулярные винты (а) в составе сборной конструкции (б), установленной в ходе медицинского вмешательства

Успех операции по установке транспедикулярных конструкций (ТПК) зависит от множества факторов. Один из них – это использование дорогостоящего (млн долл. США) интерпретационного КТ-томографа с навигационной станцией. В настоящее время такой томограф в нашей стране имеется в арсенале только двух республиканских больниц (в г. Минск и Гомеле). Проведение операций без данного оборудования затруднительно – их успех даже при незначительных патологиях позвоночника и небольших повреждениях анатомических структур невысок (около 67 %). В случае значительных повреждений позвоночника хирургу требуется делать большой разрез, что увеличивает продолжительность последующей реабилитации больного. Даже после таких манипуляций хирург может не определить, куда устанавливать транспедикулярный винт, что значительно снижает процент успеха операции. Во избежание этого в медицинской практике нейрохирургов многих стран (Израиль, Германия, Испания и др.) применяются навигационные шаблоны – устройство, которое направляет инструмент хирурга «точно в цель». Создание подобных шаблонов

в Республике Беларусь – социально важная задача [2, 3], одним из этапов в решении которой является экономическое обоснование потребности в ТПК.

Анализируя цифровой материал по установке элементов ТПК в Гомельской областной клинической больнице и Минском НПЦ хирургии, трансплантологии и гематологии (табл. 1), можно сделать вывод, что прогнозирование потребности в их количестве проще вести по годовому объему установленных транспедикулярных винтов, поскольку именно в разрезе этих данных в учреждениях здравоохранения ведется статистический анализ.

Для построения краткосрочных прогнозов эффективными являются методы экспоненциального сглаживания с учетом линейного тренда [4]. Выбор тренда с учетом данных табл. 1 показал, что наибольшее значение присуще полиномиальному тренду (рис. 2).

Таблица 1

**Исходные данные для определения потребности  
в транспедикулярных винтах в Республике Беларусь**

Учреждения здравоохранения	Годовая потребность, шт.			
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Гомельская областная клиническая больница	1000	980	1100	1050
Минский НПЦ хирургии, трансплантологии и гематологии	1520	1450	1500	1510
<i>Всего</i>	2520	2430	2600	2560

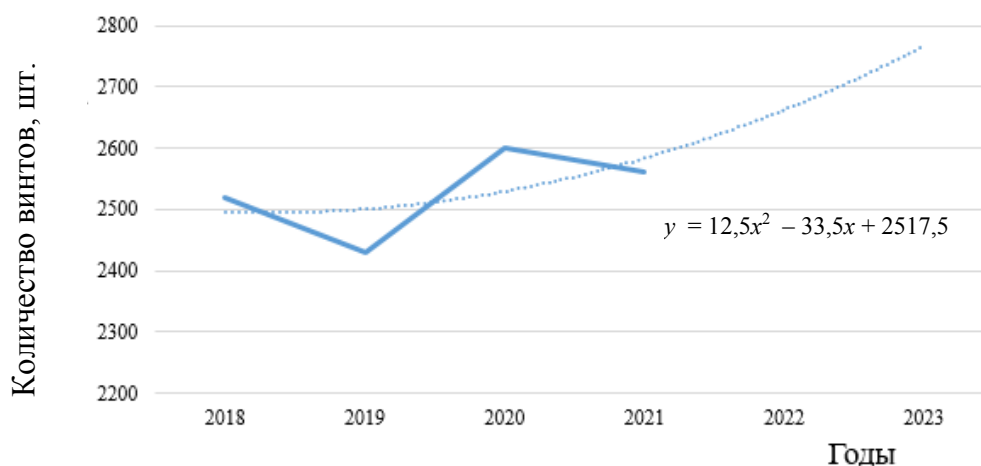


Рис. 2. Полиномиальный прогноз с использованием линии тренда:  
 — фактическое количество установленных винтов, шт.;  
 ..... – полиномиальный прогноз количества установленных винтов, шт.

Для прогнозирования количества транспедикулярных винтов воспользуемся приведенной на рис. 2 формулой (итоговое значение выбрано с учетом максимального значения коэффициента аппроксимации). Следовательно, прогноз потребности на 2022 г. составит 2662, на 2023 – 2766 шт.

В качестве показателя устойчивости тенденции изменения показателя «потребность в транспедикулярных винтах» используем коэффициент корреляции рангов Ч. Спирмэна [5]:

$$r_{Cn} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n^3 - n},$$

где  $n$  – число уровней;  $\Delta_i$  – разность рангов уровней и номеров временного периода.

Согласно данным табл. 2, коэффициент корреляции Ч. Спирмэна равен  $r_{Cn} = 0,886$ . Следовательно, тенденция увеличения анализируемого показателя высокоустойчива (корреляция между показателями статистически значима).

Таблица 2

**Расчет коэффициента корреляции Ч. Спирмэна для оценки данных в разрезе показателя «потребность в транспедикулярных винтах»**

Год	Годовая потребность (уровень), шт.	Ранг потребности (ранг уровней), $p_i$	Номер временного периода, $p_n$	$p_i - p_n = \Delta_i$	$\Delta_i^2$
2018	2520	2	1	1	1
2019	2430	1	2	-1	1
2020	2600	4	3	1	1
2021	2560	3	4	-1	1
2022	2662	5	5	0	0
2023	2766	6	6	0	0
<i>Итого</i>	–	–	–	–	4

Таким образом, можно сделать вывод о том, что потребность в транспедикулярных винтах в Республике Беларусь растет. Плохая экология, наследственность, травматичность и некоторые другие неблагоприятные факторы способствуют тому, что кривая роста количества операций ТПК в целом стремительно растет вверх и, как следствие, потребность в навигационных шаблонах также возрастает.

**Литература**

1. Транспедикулярная фиксация позвоночника. – Режим доступа: <https://spinelife.ru/transpedikulyarnaya-fiksaciya-pozvonochnika/>. – Дата доступа: 01.04.2023.
2. Особенности трехмерного моделирования анатомических структур человека для повышения эффективности оперативного лечения в ортопедии и нейрохирургии / Е. В. Ковалев [и др.] // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 22–23 апр. 2021 г. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – Ч. 1. – С. 125–127.
3. Опыт разработки материалов и изделий медицинского и технического назначения с использованием аддитивных технологий / В. В. Дубровский [и др.] // Полимер. материалы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 2. – С. 78–85.
4. Статистика : учеб. для бакалавров / И. И. Елисеева [и др.] ; под ред. И. И. Елисеевой. – М. : Юрайт, 2011. – 565 с.
5. Гусаров, В. М. Теория статистики : учеб. пособие / В. М. Гусаров. – М. : ЮНИТИ, 2004. – 463 с.

## ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

А. Р. Каготько

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

Научный руководитель Е. Н. Демиденко

Рассмотрена возможность и проведены исследования по увеличению срока службы выпускного клапана дизельного двигателя Д-243S2, используемого предприятием ОАО «МТЗ» на выпускаемой продукции, в частности на тракторе модели МТЗ 82.1/БЕЛАРУС 82.1 (4x4). Для увеличения срока службы клапана был выбран материал и произведено напыление на поверхность запорного конуса. В качестве материала использовали проволоку марки МЧ ГОСТ, ТУ 48-19-203–85 диаметром 2 мм. Метод распыления проволоки – плазменный, с независимой дугой. Изучены свойства покрытия и его структура.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, жаростойкое покрытие, износостойкое покрытие, плазменное напыление цветных металлов.

Проволоки с высоким содержанием молибдена (более 99,9 %) обладают высокой температурой плавления и крайне низким коэффициентом теплового расширения. Коррозионная стойкость в 3 раза выше стойкости нержавеющей стали. При работе клапана в тяжелых условиях ДВС было предположено, что подобное покрытие за счет своих физических и химических свойств может увеличить ресурс работы данной детали.

Целью данной работы является определение целесообразности применения проволоки марки МЧ, как износостойкого, жаростойкого, тонкого покрытия на поверхности запорного конуса выпускного клапана.

**Материалы, методики, оборудование.** В работе использовалось следующее оборудование:

- 1) покрытие, полученное методом плазменного напыления из проволоки марки МЧ;
- 2) оборудование плазменного напыления SX-80, плазматрон SG-100;
- 3) машина трения ИМ-58.

Таблица 1

## Химический состав сплава выпускного клапана

Материал	C	Mn	Si	Ni	Cr	Fe	S	P	Mo	W
Содержание компонентов, мас. %										
45X14H14B2M	0,4–0,5	До 0,7	До 0,8	13–15	13–15	64,75–69,8	До 0,02	До 0,035	0,25–0,4	2,0–2,8

Таблица 2

## Проволока марки МЧ ГОСТ, ТУ 48-19-203–85

## Химический состав, %

Fe	Al	Ni	Si	Mg+Ca	Mo
0.010	0,003	0,005	0,012	0,005	Основа

Для нанесения покрытия указанным методом клапан был предварительно очищен от нагара, измерена геометрия запорного конуса и величина биения клапана с последующей механической обработкой. Восстанавливаемые поверхности перед нанесением покрытия были обезжирены. Поверхность клапана под покрытие подвергали обработке чугунной колотой дробью, в соответствии с ГОСТ 28844–90 для повышения адгезии между покрытием и основой.

*Параметры обработки:*

1. Давление сжатого воздуха не менее 0,5–0,6 МПа.
2. Расход сжатого воздуха не менее 1,5 м<sup>3</sup>/мин.
3. Размер дроби: 70 % размером 1,0 мм и 30 % размером 1,8 мм.

*Режимы напыления:*

1. Напряжение дуги – 30 В.
2. Сила тока дуги – 750 А.
3. Дистанция напыления 0,09–0,1 м.
4. Расход плазмообразующего газа (аргон) 38–42 л/мин.
5. Толщина покрытия 150–200 мкр.

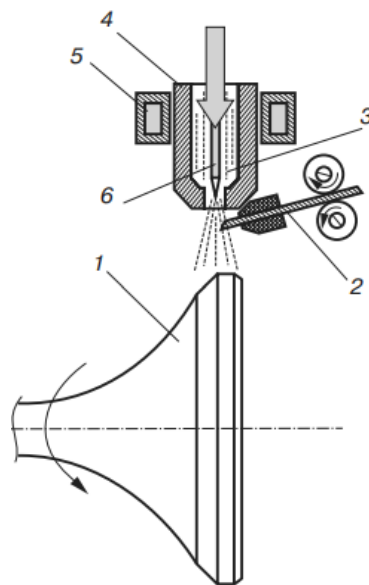


Рис. 1. Схема напыления пояска запорного конуса клапана:  
 1 – клапан; 2 – подача проволоки; 3 – подача газа;  
 4 – анод; 5 – система охлаждения; 6 – катод

*Результаты напыленных покрытий:*

- пористость: 11 %;
- плотность: 8,29–9,2;
- микротвердость: 4080–4510 МПа;
- линейный износ менее 1 мкм на одно торможение при удельной мощности торможения 245 Дж X см<sup>-1</sup> X см<sup>-2</sup>;
- коэффициент трения: 0,36 (испытания на машине трения ИМ-58 и дисках двустороннего трения диаметром 120 мм; ответная пара – керамика типа МКВ-50) [1].

При восстановлении поверхности детали методом плазменного напыления температура факела достигает 10000 °С. Удельная мощность плазменного факела составляет 32–35 кВт, скорость вращения детали – не менее 520 об/мин. Частицы расплавленного материала, с высокой скоростью направленные на поверхность клапана, позволили сформировать покрытие толщиной 0,7–1 мм. Расход газа (аргон) в про-

цессе напыления составил 40 л/мин. Температура детали в процессе напыления не превышала 210 °С. Проплавление поверхности основного металла клапана составило 10–50 мкм, различимы поры и очаги шлака. Глубина перехода металла подложки в покрытие – не более 30 мкм.

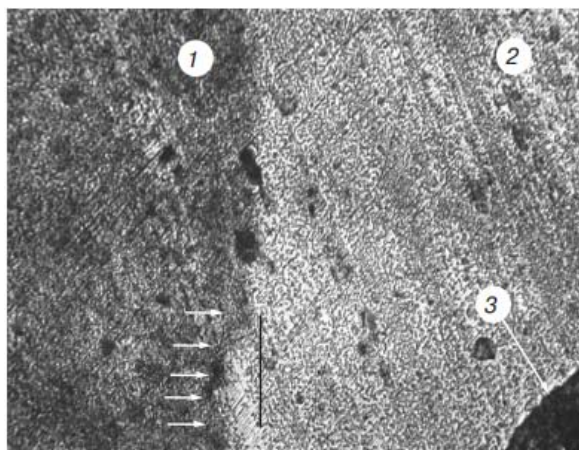


Рис. 2. Область плазменного напыления на поверхности выпускного клапана:  
1 – основной металл; 2 – напыленный слой;  
3 – пора и шлаковые включения

Анализ полученных результатов показывает перспективность применения вышеуказанного метода упрочнения поверхности выпускного клапана при условии их дальнейших исследований и совершенствовании.

#### Л и т е р а т у р а

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов [и др.]. – К. : Наукова думка, 1983. – 568 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КОНЦОВ РАСКАТОВ ПО ДИСТАНЦИИ ПРОКАТКИ В ЛИНИИ КАТАНКИ СТАНА 370/150

Л. А. Соколовская

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Проведены исследования изменения микроструктуры непрерывнолитых заготовок из шарикоподшипниковой стали ШХ-15 в зависимости от степени деформации по дистанции линии катанки стана 370/150.*

**Ключевые слова:** горячая прокатка, микроструктура, непрерывнолитая заготовка, катанка, шарикоподшипниковая сталь.

Цель работы – провести анализ изменения микроструктуры раската и непрерывнолитой заготовки из шарикоподшипниковой стали ШХ-15 для определения влияния степени обжатия на структурные изменения.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- изучение и анализ микроструктуры непрерывнолитых заготовок;
- изучение и анализ микроструктуры раскатов по дистанции прокатки в линии катанки;
- анализ результатов и формулирование выводов.

Объект исследования: технологический процесс прокатки круглого профиля Ø 18,5 мм из стали ШХ15 в линии катанки стана 370/150 ОАО «Белорусский металлургический завод».

Методика исследования:

- 1) отбор проб непрерывнолитых прямоугольных заготовок 250 × 300 мм и анализ их микроструктуры;
- 2) отбор проб после первой промежуточной группы клетей (клеть № 13) Ø 55 мм и после второй промежуточной группы клетей (клеть № 19), овал 30 × 25 мм и анализ их микроструктуры;
- 3) отбор пробы готового проката круглого профиля Ø 18,5 мм и анализ его микроструктуры;
- 4) сравнительный анализ микроструктуры и определение зависимости ее изменения от степени обжатия.

Катанка диаметром 18,5 мм прокатывается в линии катанки из непрерывнолитой заготовки 250 × 300 или 140 × 140 мм согласно универсальной схеме калибровке [1]. С загрузочных решеток НЛЗ нагреваются в методической печи до температуры 1100 °С и прокатываются во всех группах клетей. В конце линии осуществляется двухстадийное охлаждение, позволяющее получить требуемую микроструктуру [2].

Согласно калибровке для указанного профиля были определены деформационные показатели по контрольным точкам (табл. 1).

Таблица 1

**Деформационные показатели прокатки круглого профиля Ø 18,5 по контрольным точкам**

Сечение заготовки, раскатов и проката, мм	Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Вытяжка между контрольными точками $\lambda^1$	Суммарная вытяжка по дистанции $\lambda$
250 × 300	75000	0	0
Ø 55	2376	31,57	31,57
30 × 25	785,9	3,02	95,43
Ø 18,5	276,4	2,84	271,35

На первом этапе был выполнен анализ микроструктуры (рис. 1) образцов непрерывнолитой заготовки 250 × 300 из каждого из четырех ручьев машины непрерывной разливки. Методика и результаты исследования подробно описаны в работах [3, 4].

Микроструктура образцов блюмов представляет собой крупнозернистую перлитную смесь с выделением цементита II и характерна для литого изделия из заэвтектоидных сталей с содержанием углерода около 1 %. После закалки микрошлифов избыточные карбиды четко выражены на фоне мартенситной матрицы. В разных зонах НЛЗ концентрация избыточных карбидов различна – максимальное количество карбидов сконцентрировано в осевой зоне заготовки в виде как отдельных глобулей,

так и грубой сетки по границам зерна литой заготовки (рис. 1, а, б). В середине малого и большого радиусов имеет место выделение единичных частиц карбидов (рис. 1, в, г).

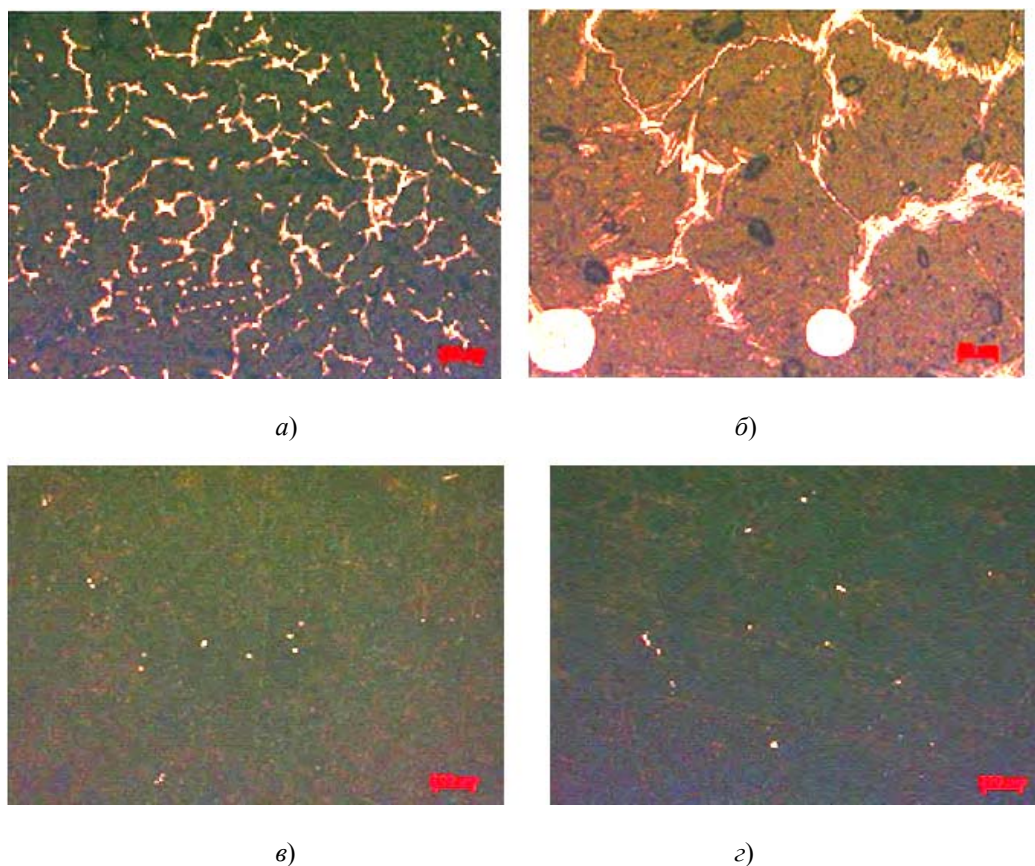


Рис. 1. Микроструктура образца НЛЗ 250 × 300:  
а, б – избыточные карбиды в виде глобулей и грубой сетки по границам зерна в осевой зоне НЛЗ; в, г – единичные частицы карбидов в зоне середины малого и большого радиусов НЛЗ

Далее заготовки после гомогенизирующего отжига, описанного в работе [5], были прокатаны согласно штатной калибровки. Был выполнен анализ микроструктуры раскатов и конечного профиля. Величина карбидной сегрегации по шкалам CN5/CZ6/CZ7 стандарта SEP 1520 [6] представлена в табл. 2.

Таблица 2

Карбидная сегрегация по шкалам CN5/CZ6/CZ7 стандарта SEP 1520

Сечение заготовки, раскатов и проката, мм	Карбидная сегрегация, баллы		
	CN5	CZ6	CZ7
250 × 300	Выше максимума	Выше максимума	Выше максимума
Ø 55	5,4	6,6	7,4
30 × 25	5,3	6,3	7,2
Ø 18,5	5,1	6,1	7,0



После анализа исследования было установлено, что с увеличением суммарной вытяжки снижаются ликвационные проявления: чем меньше профиль поперечного сечения, тем ниже карбидная сегрегация.

Установлен фактор и определена степень его влияния на снижение карбидной неоднородности – суммарная вытяжка при прокатке. С уменьшением профиля (с увеличением суммарной вытяжки) наблюдается снижение балла карбидной сетки и ликвации. Данный факт объясняется дроблением аустенитного зерна с увеличением длины раската, утончением зоны ликвации в центре и дроблением ее на отдельные элементы.

#### Литература

1. Астапенко, И. В. Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката / И. В. Астапенко, С. А. Савченко // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / 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.
2. Астапенко, И. В. Оборудование прокатных цехов : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)», направления 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалобработка (металлургия)», специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов давлением» дневной и заочной форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 47 с.
3. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. 2021. – № 77 (7). – С. 804–810. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-7-804-810>
4. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / В. С. Путеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 65–73. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-65-73>
5. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / С. А. Савченко, В. И. Возная, И. В. Астапенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2. – С. 52–61.
6. SEP 1520:98. Микроскопическое исследование структуры карбида, содержащегося в стали, методом последовательности диаграмм / Изд. 3-е. – Изд-во Немец. ин-та стандартизации, 1998. – 5 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТРЕХНИТОЧНОЙ РЕЗКИ АРМАТУРЫ № 16 ДЛЯ УСЛОВИЙ КОНЦА ПРОКАТКИ НА СТАНЕ 320

В. М. Полетаев

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Проведены исследования численным моделированием по методу конечных элементов энергосиловых параметров резки арматуры № 16 при трехниточной прокатке в условиях стана 320. Определена математическая зависимость для расчета усилия реза.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, энергосиловой анализ, усилие реза, прокатка, слиттинг-процесс.

Целью работы является разработка методики расчета резки арматуры № 16 класса А500 при трехниточной прокатке для условий делительных ножниц холодильника стана 320.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- 1) исследование параметров резки в условиях действующего технологического процесса по данным телеметрии стана 320;
- 2) аналитическое определение усилия реза по методу приведенной полосы;
- 3) построение адекватных численных моделей процесса с помощью компьютерных вычислений на основе математических зависимостей реальной упругой и пластической деформации металлов;
- 4) формирование выводов и разработка методики.

В условиях стана 320 ОАО «Белорусский металлургический завод» прокатка арматурных профилей № 8-20 осуществляется по «слиттинг-процессу» в несколько (2–5) линий получения готового проката. Полученный из непрерывнолитой заготовки квадратного профиля (140 мм) в черновой группе клетей раскат круглого профиля (46 мм) далее обжимается в промежуточной группе на гладких бочках до требуемой ширины и высоты полосы в зависимости от применяемой схемы «слиттинг-процесса». За последним обжатием в калибре «гладкая бочка» выполняется кантовка раската перед контрольным калибром в клетке № 13. Для этого за клетью № 12 и 13 установлены неприводные роликовые кантующие устройства (РКУ) для упругопластического поворота полосы на угол  $90^\circ$ . Далее прокатка проходит в специальных калибрах (клетки № 14, 16, 18), где формируется перемычка. После выхода из клетки № 18 происходит разрыв перемычки в неприводном делительном устройстве. В чистовых калибрах (клетки № 18, 20) окончательно формируется арматурный профиль № 16.

Затем прокат проходит 2-секционную трассу термоупрочнения и поступает на участок холодильника, перед которым установлены кривошипные делительные ножницы, режущие прокат на мерные длины по ширине холодильника [1, 2].

В классическом представлении процесса резки на ножницах выделяют три стадии (рис. 1): вмятие ножей в металл; сдвиг (собственно рез); отрыв (образование заусенца). Основная проблема аналитического расчета по общепринятым методикам максимального усилия реза при прокатке по «слиттинг-процессу» – использование метода приведенной полосы суммарной площади одного сплошного квадратного сечения [3].

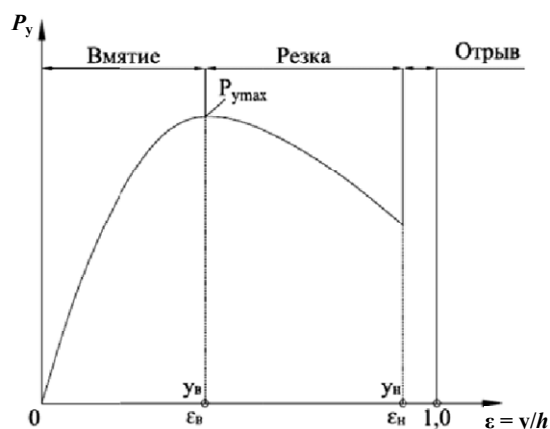


Рис. 1. Изменение усилия реза

Для аналитического расчета усилия резания ( $P_{рез}$ ) по методу приведенной полосы использовали формулу [4] для ножниц с прямыми ножами:

$$P_{рез} = k_1 k_2 k_3 \sigma_B (1 - \varepsilon_B) F_{сеч},$$

где  $k_1$  – коэффициент, равный отношению максимального сопротивления срезу к пределу прочности ( $\tau_{max} / \sigma_B$ )  $\approx 0,65-0,75$ , принимаем  $k_1 = 0,75$ ;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий повышение усилия при притуплении ножей,  $k_2 = 1,1 \div 1,15$ , принимаем  $k_2 = 1,15$ ;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий влияние увеличения зазора между ножами при резании,  $k_3 = 1,1 \div 1,25$ , принимаем  $k_3 = 1,25$ ;  $\sigma_B$  – предел прочности арматуры, Н/мм<sup>2</sup>. Для класса А800  $\sigma_B = 1000-1200$  Н/мм<sup>2</sup>. Так как отсутствуют данные по пределу прочности при температуре резания ( $T_{с/о} = 400-460$  °С), принимаем: а)  $\sigma_B = 1000$  Н/мм<sup>2</sup>; б)  $\sigma_B = 1200$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\varepsilon_B$  – коэффициент вмятия,  $\varepsilon_B = 0,2$  (холодное резание, сталь 20),  $\varepsilon_B = 0,30 \div 0,35$  (горячее резание, сталь 20), принимаем среднее  $\varepsilon_B = 0,25$ ;  $F_{сеч}$  – номинальная приведенная площадь поперечного сечения трех стержней.

Номинальная площадь поперечного сечения тройки стержней, подаваемой под ножи, согласно таблице калибровки для арматуры № 16 × 3:  $F_{сеч} = 204 \times 3 = 612$  мм<sup>2</sup>.

Расчетное усилие резания составит:

а) при  $\sigma_B = 1000$  Н/мм<sup>2</sup>

$$P_{рез} = 0,75 \cdot 1,15 \cdot 1,25 \cdot 1000 (1 - 0,25) 612 = 564,577 \text{ кН (94 \% от макс.)} < [600 \text{ кН}];$$

б) при  $\sigma_B = 1200$  Н/мм<sup>2</sup>

$$P_{рез} = 0,75 \cdot 1,15 \cdot 1,25 \cdot 1200 (1 - 0,25) 612 = 677,492 \text{ кН (113 \% от макс.)} > [600 \text{ кН}],$$

где [600 кН] – максимальное усилие резания делительных ножниц.

Согласно результатам расчета использование делительных ножниц холодильника с максимальным усилием резания 600 кН при прокатке в три нитки арматуры № 16 класса 800 может привести к их поломке. Однако по данным телеметрии стана по нагрузке на привод ножниц крутящий момент используется только на 60 %.

Опираясь на результаты работы [5], в которой на базе разработанной математической модели энергосиловых параметров процесса поперечной резки на мерные длины можно сделать вывод, что распределение усилия реза, в зависимости от хода ножей и температурно-деформационных параметров, имеет сложный характер и степень уточнения результатов, полученных по методикам традиционных расчетов может достигать 50 %.

На втором этапе исследования была построена численная модель в программном пакете Qform и выполнен расчет по методу конечных элементов по определению усилия реза для полос 3х № 16 (рис. 2).

Полученные значения по усилию реза соответствуют симметричной нагрузке ножей. Полное усилие соответствует удвоенному значению.

Анализ результатов моделирования показал, что при резе сплошного сечения время и работа реза почти в 2 раза больше.

Величина глубины вмятия  $\varepsilon_v = 0,41-0,45$ , что существенно больше теоретических значений ( $\varepsilon_v = 0,2-0,35$ ).

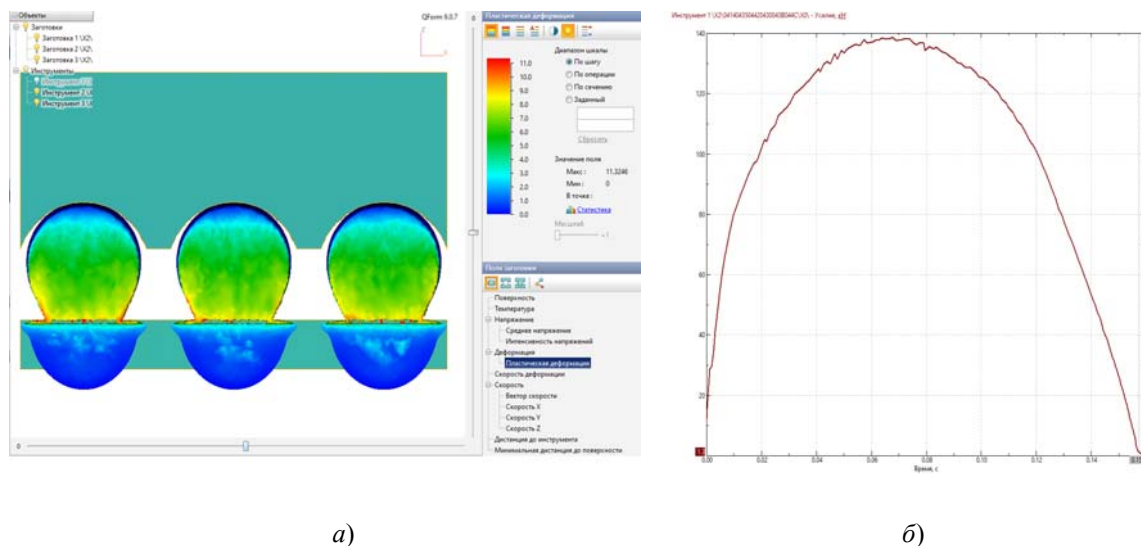


Рис. 2. Результаты численного эксперимента:  
а – диаграмма сдвиговых деформаций; б – график изменения  
усилия реза в зависимости от глубины внедрения ножей

После обработки результатов численного моделирования в программном пакете математической статистики было проведена линия тренда изменения усилия реза, рассчитано ее уравнение и определена степень достоверности расчета ( $R^2 = 0,9851$ ).

Для определения усилия реза полосы в три линии ( $P_{рез}$ ) для ножниц с прямыми ножами в соответствии с действующими технологическими параметрами процесса, кН:

$$P_{рез} = 2[-38004\varepsilon_v^2 + 5446,2\varepsilon_v + 89,308],$$

где  $\varepsilon_v = 0,41$  – глубина вмятия для прокатки арматуры № 16×3 класса А800.

*Результаты исследования:* 1) изучены условия и параметры работы делительных ножниц на стане 320; 2) разработана численная модель процесса резки в делительных ножницах JW-KSR 1540 стана 320 по действующей технологии для трехниточной резки; 3) выполнен аналитический расчет по типовой методике усилия реза для арматуры № 16×3 класса А800; 4) определена математическая зависимость для определения усилия резки, установлен коэффициенты глубины вмятия  $\varepsilon_v$ .

#### Литература

1. Барановский, Д. С. Конструктивные решения контроля ширины полосы для горячей прокатки по «слиттинг-процессу» / Д. С. Барановский, И. В. Астапенко // Беларусь в современном мире : материалы XIV Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 13–14 мая 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 250–253.

2. Барановский, Д. С. Совершенствование прокатки по «слигтинг-процессу» в контрольном калибре стана 320 ОАО «БМЗ» / Д. С. Барановский, И. В. Астапенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 93–97.
3. Астапенко, И. В. Оборудование прокатных цехов : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалообработка (по направлениям)», направления 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалообработка (металлургия)», специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 47 с.
4. Королев, А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королев. – М. : Metallurgia, 1985. – 375 с.
5. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка. В 6 т. Т. 1. Основы теории калибровки. Калибровка блюмов и заготовки, кругов и шестигранников, квадратной стали, проволоки и арматуры : справочник / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под ред. Б. М. Илюковича. – Дніпропетровськ : ДніпроВАЛ, 2002. – 506 с.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И РЕЖИМА ДВУХСТАДИЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ОСВОЕНИИ ПРОИЗВОДСТВА АРМАТУРЫ № 6 КЛАССА А500

А. А. Кучков, Г. А. Слепнев

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Проведены исследования по оптимизации химического состава и режима двухстадийного охлаждения в процессе освоения производства бунтовой арматурной катанки № 6 на стане 370/150.*

**Ключевые слова:** горячая прокатка, бунтовая арматура, двухстадийное охлаждение, химический состав, катанка.

Цель работы – провести анализ технологического процесса двухстадийного охлаждения катанки в условиях СПЦ-2 для его совершенствования на второй стадии воздушного охлаждения на рольганге конструкции Стельмора с целью получения требуемой микроструктуры проката.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- определение и корректировка оптимального химсостава НЛЗ;
- определение оптимального режима двухстадийного охлаждения для получения требуемых механических свойств;
- анализ результатов и формулирование выводов и предложений производству.

Объектом исследования в работе является технологический процесс горячей прокатки арматуры № 6 класса А500С конфигурации формы 2ф (рис. 1) по ГОСТ 34028–2016 [1] в условиях линии катанки стана 370/150 ОАО «Белорусский металлургический завод».

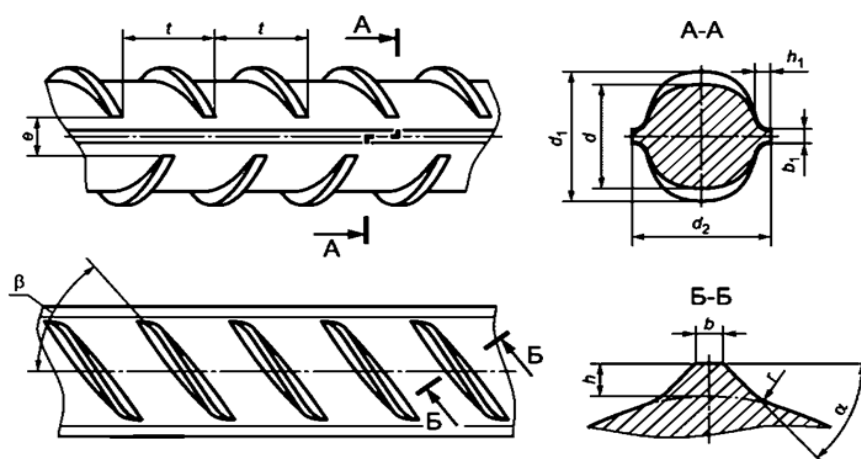


Рис. 1. Конфигурации периодического профиля формы 2ф арматуры № 6 по ГОСТ 34028–2016

Согласно современным тенденциям по увеличению выпуска инновационной продукции, повышению доходности от производимой продукции, а также выход на новые рынки сбыта, на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» была рассмотрена и опробована технологическая возможность производства арматуры периодического профиля номинального диаметра 6,0 мм класса А500С в бухтах по требованиям ГОСТ 34028–2016 на стане 370/150. Прокатано в общем объеме 3260 кг.

Производство на стане 370/150 СПЦ-2 арматуры периодического профиля № 6 осуществлялось согласно требованиям штатной технологической инструкции по утвержденной таблице калибровки [2, 3]. Под прокатку использовалась исходная заготовка сечением 140 × 140 мм, а также блюм сечением 250 × 300 мм. При прокатке опытной партии использовался химический состав непрерывнолитых заготовок для производства арматуры № 8 класса А500С, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Массовая доля элементов в химическом базовом составе, %

ТД	Марка, класс	Номер арматуры	Диапазон	С	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N	С <sub>экв</sub>
ГОСТ 34028	А500С	6	Минимум	–	–	–	–	–	Не регламентируется		–	–	0,28 (№ 6)
			Максимум	0,22 (0,24)	0,90 (0,95)	1,60 (1,70)	0,050 (0,055)	0,050 (0,055)	–	–	0,50 (0,55)	0,012 (0,013)	0,50 (0,52)
Рекомендуемые пределы			Минимум	0,18	0,25	1,00	–	–	–	–	–	–	0,42
			Цель	0,20	–	1,10	–	–	–	–	–	–	–
			Максимум	0,22	0,45	1,20	0,030	0,035	0,29	0,29	0,30	0,012	0,50

Примечание.  $C_{\text{экв}} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$ .

В ходе эстафетной прокатки заготовок (8 штук) базового химического состава был опробован режим двухстадийного охлаждения (табл. 2), который позволил получить определенные механические свойства (табл. 3).

Таблица 2

## Режимы двухстадийного охлаждения

Класс	Номер профиля	Скорость прокатки, м/с	Температура после гидросбива, °С	Температура подката и круга, °С		Вентиляторы		Скорость секторов рольганга		Положение крышек роликового транспорта по номерам
				На входе в 10-клетевой блок BGV	В зоне виткообразователя	Номер рабочих вентиляторов	Мощность включения, %	«Мастер» скорость, м/с	Номер сектора/%	
A500C	6	46÷55	1020÷1060	900÷940	580±20	1÷5	20	0,45÷0,55	2÷14/+2 15÷18/0 19/(-30) 20/+2	1÷32 открыты

Таблица 3

## Механические свойства проката по базовому варианту

Плавка	Предел текучести Re, Н/мм <sup>2</sup>	Предел прочности Rm, Н/мм <sup>2</sup>	Пластичность, Rm/Re
1	504	645	1,28
2	514	650	1,26
3	536	661	1,23
4	501	644	1,29
5	509	646	1,27
6	523	652	1,25
7	511	651	1,27
8	536	658	1,23
Средние значения	516,8	650,9	1,26
Требования ГОСТ 34028	Не менее 500	Не менее 600	Не менее 1,05

Полученные значения по пределу текучести находились на нижнем пределе допускаемых значений и не позволяли считать, что предложенные режимы обеспечат гарантированное производство продукции в рамках требований ГОСТ 34028–2016.

С целью повышения механических свойств арматуры принято решение повысить нижний предел следующих элементов: углерод с 0,18 до 0,19 %; кремний с 0,25 до 0,35 %; марганец с 1,00 до 1,17 % (табл. 4), а также увеличили охлаждение с 20 до 30 % (табл. 5) в соответствии с методикой, изложенной в работе [4].

Таблица 4

## Массовая доля элементов в оптимизированном химическом составе, %

ТД	Марка, класс	Номер арматуры	Диапазон	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N	C <sub>экв</sub>
ГОСТ 34028–2016 (1684)	A500C	6	Минимум	–	–	–	–	–	Не регламентируется	–	–	–	0,28 (№ 6)
			Максимум	0,22 (0,24)	0,90 (0,95)	1,60 (1,70)	0,050 (0,055)	0,050 (0,055)					0,50 (0,55)

Окончание табл. 4

ТД	Марка, класс	Номер арматуры	Диапазон	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N	C <sub>экв</sub>
Рекомендуемые пределы			Минимум	0,19	0,35	1,17	–	–	–	–	–	–	0,43
			Цель	0,215	0,45	1,25	–	–	–	–	–	–	0,49
			Максимум	0,22	0,50	1,30	0,030	0,035	0,29	0,29	0,30	0,012	0,50

Таблица 5

## Режимы двухстадийного охлаждения арматуры периодического профиля

Класс	Номер профиля	Скорость прокатки, м/с	Температура после гидробива, °С	Температура подката и круга, °С		Вентиляторы		Скорость секторов рольганга		Положение крышек роликового транспорта по номерам
				На входе в 10-клетевой блок BGV	В зоне виткообразователя	Номер рабочих вентиляторов	Мощность включения, %	«Мастер» скорость, м/с	Номер сектора/%	
A500C	6	46÷55	1020÷1060	900÷940	580±20	2÷6	30	0,45÷0,55	2÷14/+2 15÷18/0 19/(-30) 20/+2	1÷32 открыты

В период с 26 по 30 сентября 2022 г. была вторая кампания, в которой произведен прокат заготовок (28 штук) с оптимизированными химическим составом и двухстадийным охлаждением. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

## Механические свойства проката по оптимизированному варианту

Плавка	Предел текучести Re, Н/мм <sup>2</sup>	Предел прочности Rm, Н/мм <sup>2</sup>	Пластичность, Rm/Re
Средние значения	568,8	735,1	1,295
Требования ГОСТ 34028	Не менее 500	Не менее 600	Не менее 1,05

Таким образом, анализ механических свойств проката показывает, что оптимизированные режим двухстадийного охлаждения и химический состав заготовок позволяют получать арматуру № 6 класса A500C конфигурации формы 2ф с гарантированным выполнением требований ГОСТ 34028–2016.

## Литература

1. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия : ГОСТ 34028–2016. – Взамен ГОСТ 5781–82, ГОСТ 10884–94 ; введ. приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии 2019–01–01. – М. – 47 с.
2. Васильков, Д. М. Исследование параметров очага деформации полосы при прокатке в валах с ящичными калибрами черновой группы клеток 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, Гомель.



- гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 178–182.
3. Астапенко, И. В. Оборудование прокатных цехов : практикум по выполнению лабораторных работ для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)», направления 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалобработка (металлургия)», специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 47 с.
  4. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / В. С. Путеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 65–73. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-65-73>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВУХСТАДИЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ЛИНИИ КАТАНКИ СТАНА 370/150

Г. А. Слепнев

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

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Проведены исследования изменения температуры проката в зависимости от подачи воздуха вентилятором № 1 рольганга-холодильника линии катанки стана 370/150. Построены диаграммы по контрольным точкам и определены математические зависимости для определения изменения температуры витков катанки в зоне вентилятора № 1.*

**Ключевые слова:** двухстадийное охлаждение, рольганг-холодильник, катанка, горячая прокатка, шарикоподшипниковая сталь.

Цель работы – провести анализ технологического процесса двухстадийного охлаждения катанки в условиях СПЦ-2 для его совершенствования на второй стадии воздушного охлаждения на рольганге конструкции Стельмора с целью получения требуемой микроструктуры проката.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- определение влияния режимов работы вентилятора № 1 на динамику охлаждения;
- определение расчетных зависимостей изменения температуры катанки при разных величинах подачи воздуха вентилятором № 1;
- анализ результатов и формулирование выводов.

Объектом исследования в работе является технологический процесс двухстадийного охлаждения проката Ø 8 мм из стали ШХ15 в линии катанки стана 370/150 ОАО «Белорусский металлургический завод».

Катанка диаметром 8 мм прокатывается в линии катанки из непрерывнолитой заготовки 250 × 300 или 140 × 140 мм согласно универсальной схеме калибровки [1]. С загрузочных решеток НЛЗ нагреваются в методической печи до температуры 1100 °С и прокатываются во всех группах клетей. В конце линии осуществляется двухстадийное охлаждение, позволяющее получить требуемую микроструктуру превращения аустенита [2].

Двухстадийное охлаждение в линии катанки (рис. 1) осуществляется на первой стадии водой в секциях № 1–3 после 10-клетьевого блока и в секциях № 4, 5 после 4-клетьевого чистового блока до температуры 850 °С [3].

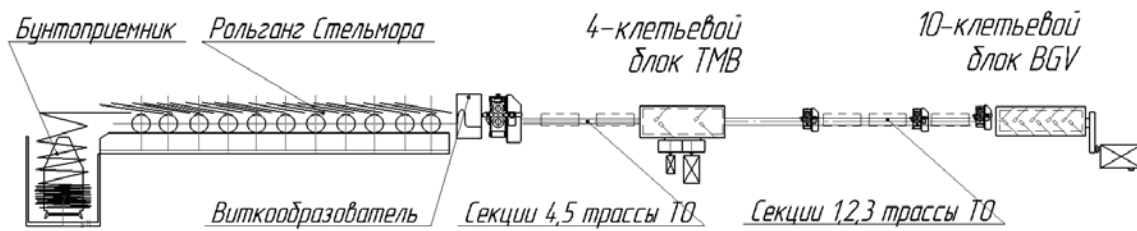


Рис. 1. Схема двухстадийного охлаждения проката в линии катанки стана 370/150

На второй стадии происходит охлаждение воздухом на рольганге Стельмора после формирования витков на виткообразователе. По рольгангу витки катанки движутся с возможностью регулирования скорости, регулирования подачи воздуха от 20 вентиляторов при открытых или закрытых крышках термоэкранов.

Поскольку на первой стадии водяного охлаждения настройки направлены на получение температуры начала распада аустенита на виткообразователе  $800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то основной интерес представляет разработка расчетной методики получения требуемых скоростей охлаждения на Стельморе. Рольганг (рис. 2) имеет длину 120 м и оснащен 20 одинаковыми вентиляторами с возможностью регулирования потока воздуха от 0 до 100 % через 5 % для ускорения охлаждения. Также над каналом рольганга установлены крышки термоэкранов для замедления охлаждения. Посекционно можно менять скорость движения витков через 0,1 м/с.

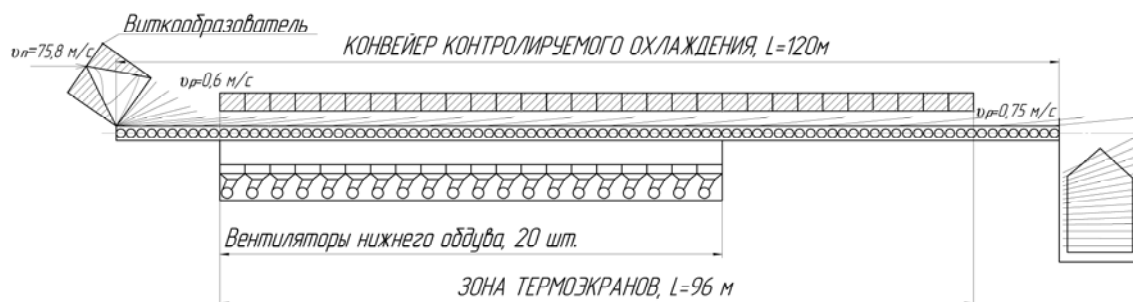


Рис. 2. Схема второй стадии воздушного охлаждения на рольганге конструкции Стельмора

Для получения требуемой микроструктуры производитель оборудования предоставил ориентировочные графики температуры раската по дистанции. Однако настроечных параметров рольганга Стельмора предоставлено не было. Второй проблемой воздушного охлаждения является неравномерность охлаждения по краям и центру витков [4].

На первом этапе исследований нами были проведены натурные эксперименты по определению влияния величины подачи воздуха вентиляторов на охлаждение катанки. Для этого по телеметрии стана и ручным пирометром измерялись температуры центра и краев витков катанки до и после первого вентилятора. Поток воздуха изменялся от 0 до 30 % через 10 %.

Прокатка велась с одного посада заготовок одной и той же плавки с полным интервалом измерений 1 час. Для анализа принимались показатели одного и того же ручного пирометра, с дублированием показаний стационарных пирометров по трем контрольным точкам (см. таблицу):

- т. 1, в зоне укладки витков перед первым вентилятором;
- т. 2, после вентилятора № 1 по центру витка;
- т. 3, после вентилятора № 1 по краю витка.

**Результаты измерений температур витков катанки Ø 8 мм  
в зоне вентилятора № 1 рольганга Стельмора**

№ п/п	Температура в зоне укладки $T_y$ в т. 1, °С	Температура после первого вентилятора, °С		Скорость прокатки $v_{пр}$ , м/с	Скорость рольганга секции № 1 $v_p$ , м/с	Уровень подачи воздуха вентилятором № 1 П, %
		$T_1^н$ в т. 2	$T_1^к$ в т. 3			
1	850	736	778	75,8	0,6	30
2	850	757	795	75,8	0,6	20
3	850	770	818	75,6	0,6	10
4	850	787	837	75,9	0,6	0

Далее по результатам измерений были построены графики изменения температуры и определены линии тренда. Лучшая достоверность линий тренда была получена с линейной зависимостью. Она позволяет рассчитать температуру катанки от исходной в зоне укладки в зависимости от процента мощности вентилятора для края и центра витка. Полученные результаты представлены на рис. 3.

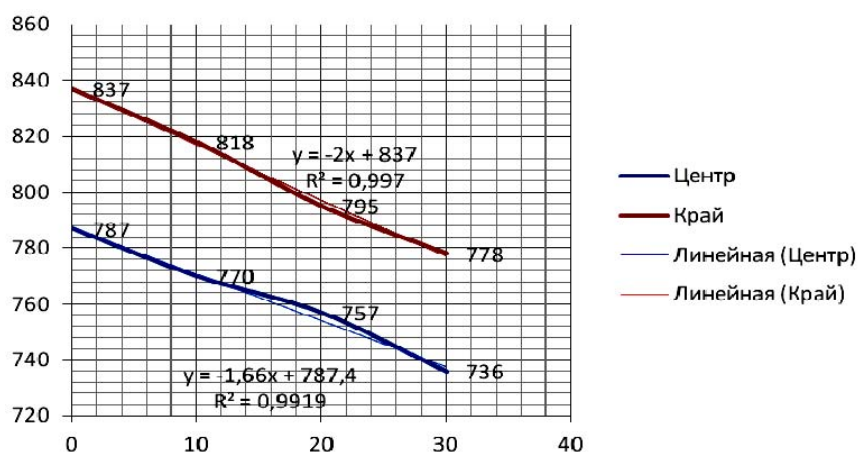


Рис. 3. Графики изменения температуры катанки и ее линии тренда в зависимости от подачи воздуха вентилятором № 1 на рольганге конструкции Стельмора

После обработки данных были выведены следующие формулы для определения температуры витков катанки Ø 8 мм после первого вентилятора в зависимости от подачи воздуха:

– для края витка, °С:

$$T_1^к = T_y - 2\text{ЧП-12};$$

– для центра витка, °С:

$$T_1^н = T_y - 1,66\text{ЧП-62}.$$

Таким образом, полученные зависимости позволяют выполнить расчет режимов подачи воздуха вентиляторами по всей дистанции рольганга в зависимости от требуемой скорости охлаждения катанки или прогнозировать динамику изменения температуры.

*Результаты исследования:* 1) изучен и выполнен анализ особенностей технологического процесса двухстадийного охлаждения катанки в условиях СПЦ-2; 2) изучен и проанализирован процесс воздушного охлаждения второй стадии на рольганге Стельмора; 3) выполнены измерения температур на первом вентиляторе при разных режимах его работы; 4) определена математическая зависимость изменения температуры катанки на вентиляторе № 1 в зависимости от его подачи.

#### Литература

1. Астапенко, И. В. Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката / И. В. Астапенко, С. А. Савченко // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / 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.
2. Астапенко, И. В. Оборудование прокатных цехов : практикум по выполнению лабораторных работ для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)», направления 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалобработка (металлургия)», специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 47 с.
3. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2021. – 77 (7). – С. 804–810. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-7-804-810>
4. Савченко, С. А. Совершенствование технологического процесса горячей прокатки шарикоподшипниковых сталей в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ» УКХ «БМК» / С. А. Савченко, И. В. Астапенко // Беларусь в современном мире : материалы XII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 16–17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 282–285.

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ**

**А. А. Болигатов, Д. А. Лысенко**

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

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

*Выполнен анализ математических зависимостей, предназначенных для использования в расчетной оценке напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при волочении.*

**Ключевые слова:** мегапрочный металлокорд, оптимизация волочения, моделирование процесса волочения.

В основе современной теории обработки материалов давлением лежат методы механики деформируемого твердого тела и теории пластичности. Используя математические закономерности данных теорий, рассмотрим задачу волочения проволоки через волоку (рис. 1). Решение задачи осуществим в цилиндрической системе координат при следующих основных упрощениях:

1) напряженно-деформированное и температурное состояние материала проволоки считаем осесимметричным, для чего будем пренебрегать внешними массовыми силами;

2) материал волоки считаем абсолютно жестким, а материал проволоки – сплошным, несжимаемым и пластичным;

3) считаем, что в процессе пластического деформирования в объеме проволоки действует распределенный источник тепловой энергии, равный 90 % работы пластического деформирования.

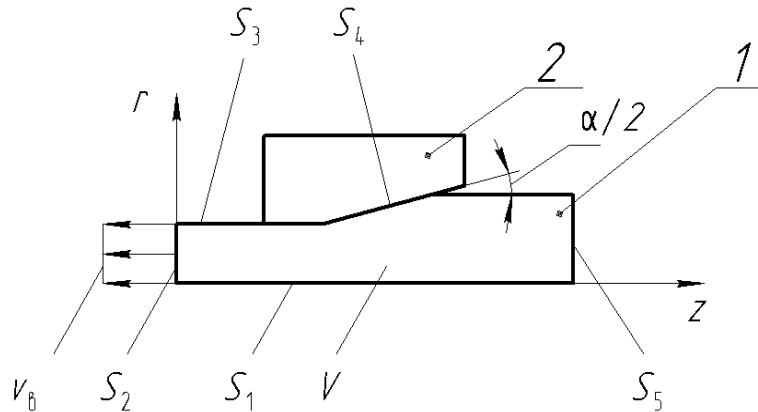


Рис. 1. Схема симметричной части деформации проволоки в волоке:  
1 – проволока; 2 – волока

С учетом принятых допущений установившееся напряженно-деформированное и температурное состояние всех точек сплошной среды, принадлежащих области  $V$  (рис. 1), ограниченной поверхностью  $S$ , будет описываться следующей системой уравнений [1–4]:

– уравнения движения:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = \rho a_r, \quad \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} = \rho a_z;$$

– уравнение несжимаемости:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0;$$

– уравнения связи деформаций и перемещений:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{zr} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right);$$

– уравнения связи скоростей деформаций и скоростей перемещений:

$$\xi_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad \xi_{\theta\theta} = \frac{v_r}{r}, \quad \xi_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad \xi_{zr} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right);$$

– уравнения связи ускорений и скоростей:

$$a_r = v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}, \quad a_z = v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z};$$

– уравнение теории пластичности Мизеса:

$$(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + 6\sigma_{zr}^2 = 2\sigma_s^2,$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\sigma_s$  – сопротивление пластическому деформированию;  $a_i$  – компоненты вектора ускорения;  $\rho$  – плотность;  $v_i$  – компоненты вектора скорости;  $\xi_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций;  $u_i$  – компоненты вектора перемещений;  $t$  – температура;  $c$  – теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Данная система уравнений решается при следующих граничных условиях:

– на поверхности  $S_1$ , совпадающей с осью  $z$ , выполняется условие симметрии:

$$\left. \frac{\partial \vec{v}}{\partial n} \right|_{S_1} = 0, \quad \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_1} = 0;$$

– на поверхности  $S_2$  задана скорость волочения проволоки:

$$v \vec{n} \Big|_{S_2} = v_B;$$

– на свободной поверхности проволоки  $S_3$  отсутствуют внешнее давление и теплообмен с окружающей средой:

$$\sigma \vec{n} \Big|_{S_3} = 0, \quad \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_3} = 0;$$

– на поверхности контакта проволоки и волокна  $S_4$  выполняется условие обтекания волокна материалом проволоки, действуют силы трения Амонтона–Кулона и распределенный источник тепловой энергии, равный 50 % работы сил трения:

$$v \vec{n} \Big|_{S_4} = 0, \quad \vec{\tau} \Big|_{S_4} = f \left| \sigma \vec{n} \Big|_{S_4} \frac{\vec{v} \Big|_{S_4}}{|\vec{v} \Big|_{S_4}} \right|, \quad -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_4} = 0,5 \left| \vec{\tau} \Big|_{S_4} \right| |\vec{v} \Big|_{S_4};$$

– на поверхности  $S_5$  задано распределение температуры:

$$t \Big|_{S_5} = t_0,$$

где  $\vec{v}$  – вектор скорости;  $\vec{n}$  – направление нормали;  $f$  – коэффициент трения;  $\vec{\tau}$  – касательное напряжение;  $t_0$  – температура окружающей проволоку среды;  $v$  – скорость волочения проволоки.

Выполнен анализ математических зависимостей, предназначенных для использования в расчетной оценке напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при волочении.

#### Литература

1. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид. – М. : Metallurgy, 1987. – 352 с.
2. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallurgy, 1987. – 688 с.
3. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов [и др.] ; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
4. Иванов, К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб. : ПИМаш, 2000. – 224 с.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РОСТА АНОМАЛЬНО КРУПНЫХ ЗЕРЕН КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Ю. Д. Черняков, А. Н. Жариков

Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов  
НАН Беларуси», г. Могилев

Научный руководитель А. Н. Жигалов

*Аномально крупные зерна могут быть причиной быстрого выхода из строя твердосплавного инструмента. Предотвращение роста таких зерен является многофакторной задачей, которую можно решить на этапе спекания.*

**Ключевые слова:** ингибиторы роста зерна, твердый сплав.

Известно, что размер карбидного зерна (WC) существенно влияет на физико-механические характеристики твердосплавных металлорежущих инструментов [1]. С уменьшением размера зерна увеличивается твердость (рис. 1).

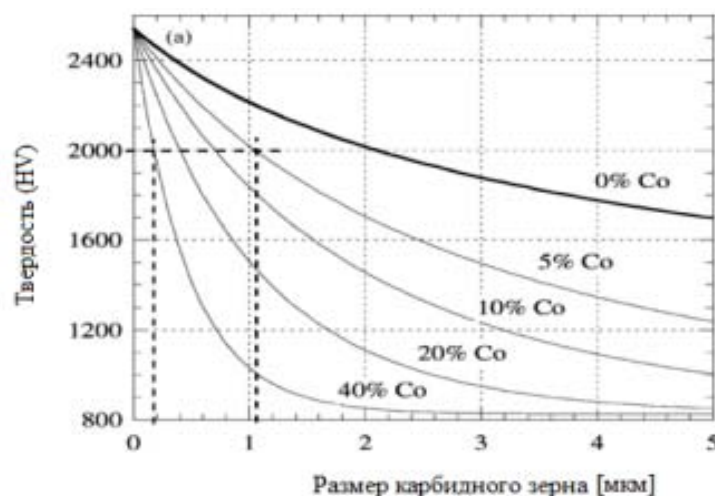


Рис. 1. Зависимость твердости от размера карбидного зерна

Аномально крупные зерна WC (рис. 2) могут быть причиной возникновения и распространения трещин, а также неравномерному износу режущей кромки инструмента за счет выкрашивания крупных частиц карбидов.

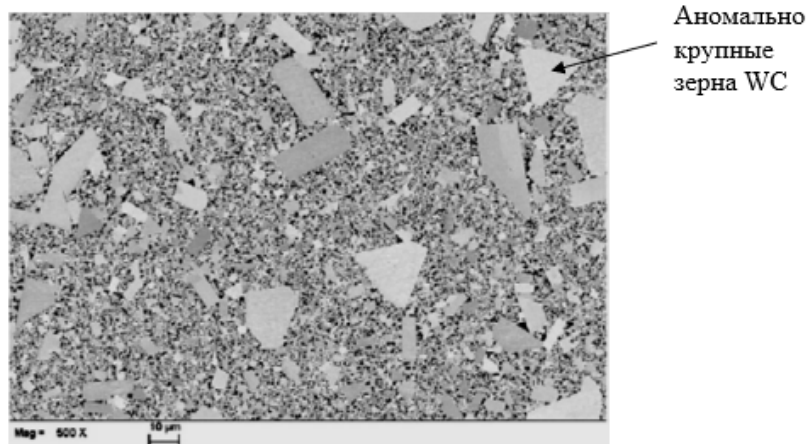


Рис. 2. Аномально крупные зерна WC в микроструктуре твердого сплава

В процессе жидкофазного спекания происходит интенсивный рост зерна WC, например, после вакуумного спекания спрессованных заготовок наблюдается частичный рост зерна WC от 0,5 до 30 мкм. Стоит отметить, что спеканием в жидкой фазе изготавливается около 90 % по объему спеченных твердых сплавов [2].

В работе [3] механизм роста аномально крупного зерна WC разделяют на две стадии. Первая – процесс роста зерна обусловлен диффузией карбидных зерен и зависит от скорости диффузии. Вторая – процесс роста зерна зависит от перекристаллизации через жидкую фазу (растворение мелких частиц WC в жидкой фазе и осаждение на более крупных частицах).

В работе [4] рост аномально крупных зерен WC связывают с наличием некоторого количества крупных зерен в исходном порошке.

Таким образом, одной из важнейших задач при производстве твердосплавных металлорежущих инструментов, является контроль размера роста зерна WC. Особое внимание следует уделить предотвращению образования аномально крупных зерен WC, размер которых в три и более раз выше среднего.

Существуют различные пути решения данной проблемы, непосредственно связанные с контролем роста карбидного зерна. Так, в процессе жидкофазного спекания используют ингибиторы роста зерна, среди которых наиболее распространенными являются карбиды переходных металлов: карбид ванадия (VC), карбид хрома ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), карбид тантала (TaC), и др. [5]. Стоит также учитывать, что суммарное содержание ингибиторов роста зерна обычно меньше их предела растворимости в связующей фазе, что позволяет избежать выделения избыточных карбидных фаз, негативно влияющих на механические свойства твердых сплавов.

В работе [5] рассмотрен механизм воздействия VC на предотвращение роста аномально крупного зерна WC. Авторами отмечалось, что VC осаждается на границе раздела WC/Co (рис. 3), что препятствует перекристаллизации WC через жидкую фазу.



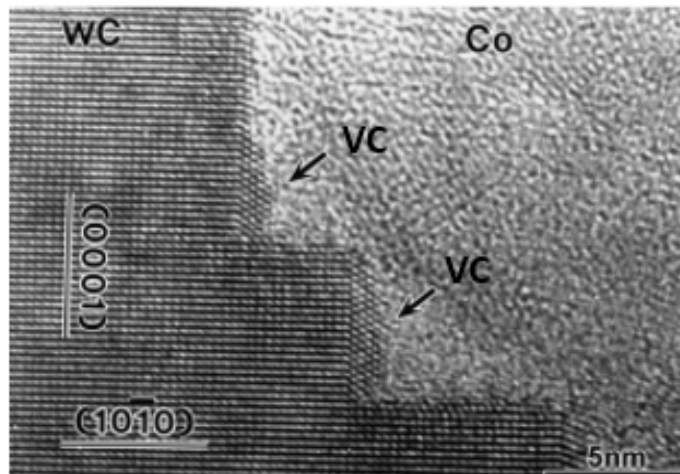


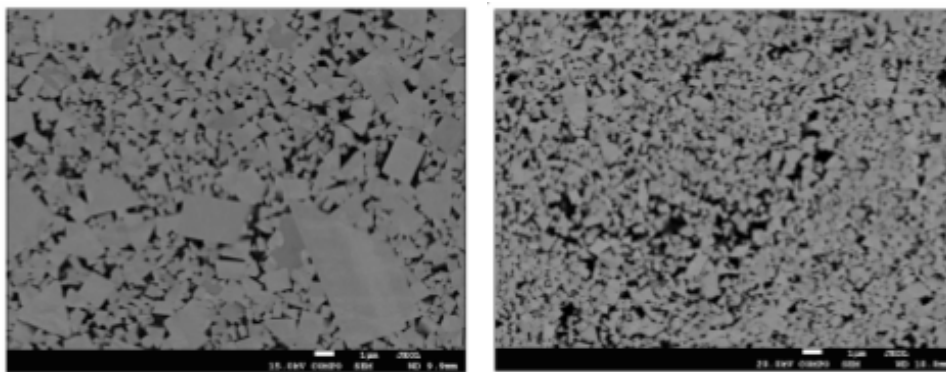
Рис. 3. Микроструктура твердого сплава легированного VC

В работе [6] показано, что добавление 1 % VC в сплаве ВК6 уменьшает и стабилизирует рост зерна, что, в свою очередь, повышает износостойкость (на 33–50 %) и твердость изделий (не более чем на 3 %).

Зарубежный опыт показывает, что карбид тантала (TaC) является практически единственным ингибитором роста карбидного зерна, вводимым в состав твердых сплавов, работающих в условиях высоких ударных нагрузок, поскольку его добавки практически не влияют на прочностные характеристики твердых сплавов [7].

Однако вопрос о механизме воздействия TaC на рост зерна до конца не изучен и до настоящего времени остается дискуссионным.

В работе [8] использовались нанопорошки WC. Идея заключалась в том, что наноразмерные частицы WC в исходном порошке полностью растворяются и тем самым препятствуют растворению основных зерен WC. Соответственно, увеличивается количество зародышей кристаллизации и уменьшается их средний размер (рис. 4).



а)

б)

Рис. 4. Структура твердого сплава с применением наноразмерных порошков WC в сплаве ВК10ХОМ:  
а – без использования наноразмерных порошков WC;  
б – с использованием наноразмерных порошков WC

Исходя из этого можно сделать вывод, что достигнуть повышенного уровня механических и эксплуатационных свойств твердых сплавов возможно посредством оптимизации структуры, за счет вариации таких параметров, как размер исходного порошка, размер карбидных зерен, а также применение ингибиторов роста зерна, чем в настоящее время и занимается лаборатория металлургии твердых сплавов ИТМ НАН Беларуси.

#### Литература

1. Жигалов, А.Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А. Н. Жигалов. – Минск, 2021.
2. PenriceTW. Alternative binders for hard metals. Carbide Tool J 1988; 20(4):12–5.
3. Sona Kim, Jong-Ku Park иDokyol Lee. Effect of grain motion on the coarsening of WC grains in the carbon-saturated liquid matrix during liquid phase sintering of WC-Co alloys // Scripta Materialia. – 1998. – Vol. 38, N 10. – P. 1563–1569.
4. Определение причины возникновения дефектов микроструктуры твердосплавных изделий / А. А. Жадяев [и др.] // Современ. материалы, техника и технология. – 2020. – № 6 (33). – С. 21–28.
5. Yamamotoa, T. High resolution transmission electron microscopy study in VC-doped WC-Co compound / T. Yamamotoa, Y. Ikuharaa, T. Sakumab // Science and Technology of Advanced Materials. – 2000. – Vol. 1. – P. 97–104.
6. Панов, В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них : учеб. пособие для вузов / В. С. Панов, А. М. Чувилин. – М. : МИССИС, 2001. – 428 с.
7. Solubilities of grain-growth inhibitors in WC-Co-based cemented carbides: Thermodynamic calculations compared to experimental data / Y. Peng [et al.] // Int. JournalofRefractoryMetalsandHardMaterials. – 2016. – Vol. 61. – P. 121–127.
8. Влияние добавки наноразмерного карбида вольфрама на структуру и свойства спеченного твердого сплава вк10хом / Е. М. Федоров [и др.] // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. – 2013. – № 3 (178). – С. 156–162.

## МЕТОДЫ ФОРМОВАНИЯ СМЕСЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

А. Н. Жариков, Ю. Д. Черняков

*Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев*

Научный руководитель А. Н. Жигалов

*Приведены основные методы формования твердосплавных смесей, отражены их особенности и описана применимость данных методов. Также предложена концепция нового метода.*

**Ключевые слова:** твердый сплав, твердосплавная смесь, металлокерамика, формование, прессование.

Твердый сплав – это материал, обладающий такими свойствами, как высокая твердость, износостойкость, коррозионная и теплостойкость, а также высокий предел прочности при сжатии. Твердый сплав относится к композиционным материалам, в связи с чем его можно описать как матрицу с тугоплавкими ячейками в виде зерен карбида (чаще карбида вольфрама или титана), которые соединены легкоплавким связующим металлом (чаще кобальтом или никелем) [1].

Целью данной работы является представление обзора как по существующим методам формования смесей в процессе изготовления твердосплавных изделий, так

и по методу, разрабатываемому в данное время в Институте технологии металлов НАН Беларуси.

Твердосплавные изделия изготавливают по технологическим процессам порошковой металлургии, включающим в себя такой важный этап как формование твердосплавных смесей. Основными методами формования данных смесей являются [2]:

1. Прессование в жесткой пресс-форме представляет собой процесс формования твердосплавной смеси посредством движения верхнего либо верхнего и нижнего пуансонов навстречу друг другу вдоль рабочего объема матрицы, который заполнен твердосплавной смесью. Результатом данного процесса является компактированная твердосплавная заготовка (прессовка), готовая для последующего этапа создания твердосплавного изделия – спекания. Данный метод является самым распространенным при производстве лезвийного твердосплавного инструмента, но имеет некоторые ограничения по применению: производить прессовки некоторых форм не представляется возможным, прессовки с соотношением длины к диаметру более 4-х можно производить только для изделий, от которых не требуется высокие значения прочностных характеристик и не предъявляются высокие требования по допуску формы и размеров.

2. Последовательно-циклическое прессование, в сущности, представляет собой тот же процесс, что и процесс описанный выше. Отличительной особенностью является то, что компактированную заготовку получают не сразу во всем объеме, а за некоторое количество циклов (постепенное досыпание и прессование порций некоторого объема твердосплавной смеси). Количество циклов зависит от требуемой высоты заготовки. Данный метод наиболее применим для производства твердосплавных стержней с соотношением длины к диаметру большим, чем 4/1.

3. Горячее прессование представляет собой такой метод формования, при котором сжатие твердосплавной смеси происходит в графитовой пресс-форме одновременно с нагревом и как следствие – спеканием. Усадка в таком случае происходит по одному линейному размеру, что позволяет изготавливать изделия сложной формы с высокой точностью размеров и с высокой плотностью. Данный метод более всего подходит для получения крупногабаритных изделий из твердого сплава и для устранения такого дефекта, как коробление уже готовых твердосплавных изделий. Недостатки метода: неровная поверхность изделия, за счет взаимодействия кобальта с графитом пресс-формы, низкий ресурс пресс-инструмента и низкая производительность с большими потерями энергии в виде тепла.

4. Импульсное прессование отличается кратковременным приложением к твердосплавной смеси давления большой величины (около десятков ГПа). Это позволяет достичь высокой скорости перемещения частиц твердосплавной смеси, что приводит к высокой степени уплотнения заготовки. В качестве источников энергии для достижения давлений столь больших величин служат электромагнитные поля импульсного характера, электрогидравлический эффект либо расширяющиеся газы при детонации взрывчатых веществ. Метод имеет существенные недостатки (отсутствие видимой возможности достижения достаточного уровня автоматизации технологического процесса и высокая трудоемкость), которые исключают возможность широкого применения данного метода, и поэтому он применим лишь для изготовления изделий, к которым предъявляются особые требования.

5. Изостатическое прессование представляет собой метод, при котором помещенную в эластичную оболочку твердосплавную смесь либо предварительно спрес-

сованную заготовку погружают в жидкую или газообразную среду, в которой после нагнетается высокое давление (до 2 ГПа), что приводит к равномерному уплотнению частиц твердосплавной смеси. Однако ввиду высокой трудоемкости метод имеет узкое применение. Чаще всего его используют для изготовления твердосплавных изделий сферической формы, а также для снижения пористости готовых спеченных изделий.

6. Вибрационное формование отличается от методов, предполагающих статическое прессование тем, что для увеличения подвижности частиц порошка, снижения сил трения между частицами и между порошком и стенками матрицы, увеличению равномерности распределения плотности по объему прессуемой смеси, данную смесь подвергают вибрационному воздействию. Это позволяет снижать давление прессования до 200 раз. Рассматриваемый метод применяется редко, так как оборудование для реализации данного метода значительно дороже классического.

7. Прокатка порошков – это метод формования твердосплавной смеси, суть которого заключается в подаче твердосплавной смеси из накопителя под действием силы тяжести к валкам, которые, вращаясь в противоположных направлениях, захватывают смесь за счет сил трения, и, уплотняя ее, формируют в ленту толщиной от 0,1 до 7 мм с плотностью от 7,5 до 9,2 г/см<sup>3</sup>. Метод является узкоспециальным и вариация изделий, получаемых с использованием данного метода, не широка.

8. Мундштучное выдавливание – метод, при котором разогретую до пластического состояния твердосплавную смесь с повышенным содержанием пластификатора (парафина) продавливают через подогретый мундштук с заданным профилем. В результате получают стержни, форма сечения которых повторяет форму отверстия мундштука. Метод позволяет производить следующие изделия: заготовки для сверл или фрез, трубки, шары малых диаметров (менее 1 мм), спирали, и др.

9. Литье под давлением (инжекционное формование) предполагает использование твердосплавной смеси с повышенным содержанием пластификатора (парафин-воск). Данная смесь разогревается до состояния жидкотекучести и под давлением около 0,1–0,6 МПа подается в литейную форму, где выдерживается и охлаждается до застывания. Метод чаще всего применяется при изготовлении изделий, конструктив которых предполагает наличие тонких отверстий 20 мкм и менее, реализуемых посредством выставления в литейной форме «проволок – знаков», которые вытаскивают после затвердевания отливки.

10. Шликерное литье реализуется посредством смешивания твердосплавной смеси со специальной жидкостью в пропорции, обеспечивающей состояние суспензии для данной смеси, и заливки ее в форму, изготовленную из материала с высокой пористостью (гипс и др.). После заливки жидкость впитывается в поры, а твердосплавная смесь оседает на стенках формы. Данный метод имеет узкое предназначение, так как является трудозатратным (необходимость изготовления формы, длительное время ожидания выхода жидкости из всего объема смеси). Чаще всего с использованием данного метода изготавливают такие изделия, как стаканы, тигли и трубки.

11. Сварка спеканием под давлением дает возможность получать твердосплавные изделия путем «сваривания» двух и более готовых спеченных твердосплавных заготовок. Для реализации данного метода места стыков заготовок шлифуют и полируют до уровня шероховатости 0,08–0,04 мкм, после чего наносят гальванопокрытие, присыпают металлом-связкой и отправляют на спекание под грузом в защитной

атмосфере. Данным методом изготавливают изделия, форма или размеры которых затрудняют использование других методов.

12. Метод пластифицированных заготовок основан на использовании заранее спрессованных и отожженных заготовок. Данные заготовки пропитываются жидким парафином, что делает их пригодными к лезвийной обработке, после которой заготовки отправляются на депарафинизацию и спекание. Данный метод считается устаревшим ввиду больших потерь сырья, так как до 25 % может уходить в стружку. Однако при изготовлении некоторых изделий сложной геометрии он может быть незаменим.

13. Мокрое прессование как метод представляет собой прессование твердосплавных смесей в жесткой пресс-форме с добавлением небольшого количества жидкости (дистиллированной воды, лучше уайт-спирита). Это позволяет снизить силы трения между частицами порошка, что понижает требуемое давление прессования и повышает плотность спрессованной заготовки, это сокращает время спекания, что, в свою очередь, позволяет сохранить размер карбидных частиц (при содержании кобальта до 6 %). Данный метод применяется редко, так как является низкопроизводительным за счет наличия операции по сушке. Чаще данный метод рассматривают при производстве изделий, которые должны иметь мелкозернистую структуру.

В настоящее время в ИТМ НАН Беларуси разрабатывается метод прессования твердосплавных смесей с одновременным приложением энергии резонансных волн, генерирующихся при аэродинамическом звуковом воздействии. Предполагается, что применение данного метода позволит значительно увеличить подвижность частиц твердосплавной смеси, что, в свою очередь, приведет к снижению требуемого давления прессования и к более равномерному распределению плотности прессовки по всему объему. Снижение требуемого давления прессования позволит уменьшить упругое последствие, что положительно скажется на снижении риска возникновения расслойных трещин и уменьшит вероятность возникновения производственного брака. Более равномерное распределение плотности прессовки по всему объему заготовки будет сопутствовать увеличению равномерности усадки при жидкофазном спекании, тем самым обеспечивая снижение внутренних напряжений в спеченном сплаве, высокие значения которых приводят к понижению стойкости твердосплавного инструмента. А для изделий с соотношением длины к диаметру более 4-х, увеличенная равномерность усадки также способствует снижению вероятности коробления.

Преимуществом разрабатываемого метода по отношению к методу вибрационного формования будет отсутствие потребности в использовании дорогостоящего оборудования и оснастки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев : МГУП, 2019. – 213 с.
2. Панов, В. С. Технология и свойства и область применения спеченных твердых сплавов : учеб. пособие / В. С. Панов, Ж. В. Еремеева. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 148 с. : ил.

**УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ  
ДИФфуЗИОННОМУ УПРОЧНЕНИЮ**

**Е. П. Поздняков, А. В. Рабков**

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

**Д. В. Куис**

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

**Т. И. Сидоренко, А. М. Коротцов**

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

**С. Н. Лежнев, А. Б. Найзабеков**

*Рудненский индустриальный институт, Казахстан*

Научный руководитель И. Н. Степанкин

*Приведено сравнение ударной вязкости диффузионно-упрочненных образцов из низкоуглеродистых конструкционных сталей 18ХГТ, 20ХН3А и 16CrMnS5. Установлено, что наибольшей ударной вязкостью обладают диффузионно-упрочненные образцы из стали 16CrMnS5. При изменении времени цементации с 8 до 12 часов ударная вязкость стали 16CrMnS5 снижается с 13,8 до 12,9 Дж/см<sup>2</sup>. При проведении нитроцементации ударная вязкость стали 16CrMnS5 возрастает в 2,2–2,8 раза. Диффузионно-упрочненные слои стали 20ХН3А имеют в 1,0–1,4 раза меньшую ударную вязкость, чем аналогичные слои стали 16CrMnS5. Ударная вязкость слоев, сформированных на стали 18ХГТ, в 1,8–3,2 раза меньше, чем аналогичных слоев стали 16CrMnS5.*

**Ключевые слова:** конструкционная сталь, цементация, нитроцементация, ударная вязкость.

С целью повышения износостойкости и контактной выносливости зубчатых колес, шестерен, поршневых пальцев и других ответственных деталей машин, работающих при высоких ударных и динамических нагрузках, применяются методы диффузионного упрочнения поверхностного слоя. Самыми распространенными среди них являются процессы преимущественной имплантации углерода – цементация и нитроцементация. Помимо высокой твердости поверхности необходимо учитывать и способность материала сердцевины противостоять продвижению трещин при ударных нагрузках. Для данных деталей традиционно используются большое количество конструкционных низколегированных сталей – 12ХН3А, 18ХГТ, 20ХН3А, 15Х, 20ХГР 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 и стран ближнего зарубежья она не получила широкого распространения, что связано с недостаточной информативностью о ее свойствах.

Целью работы является установление влияния вида и длительности химико-термической обработки на ударную вязкость сталей 16CrMnS5, 20ХН3А и 18ХГТ.

Объектом исследований являлись термодиффузионно-упрочненные слои сталей 16CrMnS5, 20ХН3А и 18ХГТ. Размер образцов  $10 \times 10 \times 55$  мм. Диффузионное насыщение сплавов осуществлялось путем проведения цементации при температуре  $920^\circ\text{C}$  в течение 8-ми и 12-ти часов и нитроцементации при температуре  $860^\circ\text{C}$  в течение 6-ти и 8-ми часов в твердом карбюризаторе. После ХТО проводилась закалка в масле с температуры  $860^\circ\text{C}$  и отпуск при  $200^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. Определение ударной вязкости образцов проводилось на установке для проведения на ударный изгиб echoLAB в соответствии с ГОСТ9454–78. Изучение изломов осуществлялось при помощи сканирующей электронной микроскопии на микроскопе «VEGA II» LSH фирмы TESCAN (Чехия).

На рис. 1 представлены результаты испытаний диффузионно-упрочненных образцов из указанных сталей. Анализ данных показал, что самым высоким показателем ударной вязкости обладает сталь 16CrMnS5, а самым низким сталь 18ХГТ и не зависит от типа и длительности диффузионного насыщения.

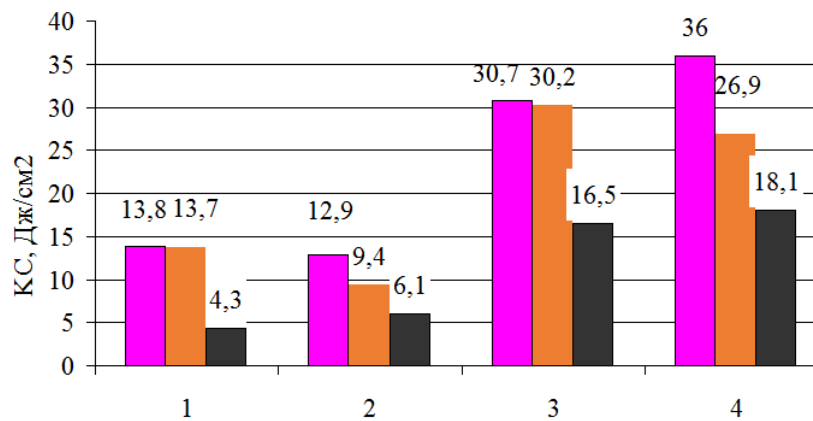


Рис. 1. Ударная вязкость стали 16CrMnS5 (левые столбцы), 20ХН3А (центральные) и 18ХГТ (правые) после термодиффузионного упрочнения: 1 – 8-часовая цементация; 2 – 12-часовая цементация; 3 – 6-часовая нитроцементация; 4 – 8-часовая нитроцементация

Увеличение длительности цементации с 8-ми до 12-ти часов не приводит к значительному изменению ударной вязкости стали 16CrMnS5. После 8-часового науглероживания ее ударная вязкость составила  $13,8 \text{ Дж/см}^2$ , а после 12-часового –  $12,9 \text{ Дж/см}^2$ . Это обусловлено тем, что науглероженные слои имеют близкие параметры значений твердости и ее распределения по всему сечению модифицированных слоев [1].

После испытаний нитроцементованных образцов стали 16CrMnS5 оказалось, что значение ударной вязкости повышается в 2,5 раза по сравнению с цементованными. Это явление обусловлено различной толщиной диффузионных слоев, их морфологией и фазовым составом. Толщина нитроцементованных слоев (рис. 2, *г–е*) примерно в 2 раза меньше, чем цементованных (рис. 2, *а–в*), толщина которых составила около 1 мм [1]. Снижение толщины слоя приводит к увеличению удельной площади сердцевины, которая является более вязкой, чем хрупкая поверхность. Также в структуре нитроцементованных слоев отсутствуют крупные включения (карбиды), которые являются концентраторами повышенных напряжений на меж-

фазной границе «карбид–матрица». При одновременной диффузии углерода и азота в структуре диффузионного слоя формируется большее количество остаточного аустенита, чем при чистом науглероживании [2, 3]. По пластичности аустенит значительно превосходит хрупкую мартенситную матрицу, что позволяет нитроцементованному слою лучше противостоять ударной нагрузке. Также следует отметить, что увеличение длительности нитроцементации повышает ударную вязкость стали – с 30,7 до 36 Дж/см<sup>2</sup>.

Для стали 20ХН3А ударная вязкость образца после 8-часовой цементации и 6-часовой нитроцементации практически соответствует аналогичным слоям, сформированным на стали 16CrMnS5. Однако после увеличения длительности ХТО их ударная вязкость значительно снижается более чем на 25 %.

Диффузионные слои, сформированные на стали 18ХГТ, обладают самыми низкими показателями вязкости – в 1,8–3,2 раза, чем у стали 16CrMnS5. Это, вероятно, связано с изучением морфологии изломов (рис. 2). Определено, что поверхность разрушения образцов стали 18ХГТ имеет мелкозернистое строение с более ровной поверхностью, чем у сталей 16CrMnS5 и 20ХН3А. То есть продвижение трещины при испытании на ударную вязкость в стали 18ХГТ происходит по траектории, которая менее криволинейна, чем у остальных сталей.

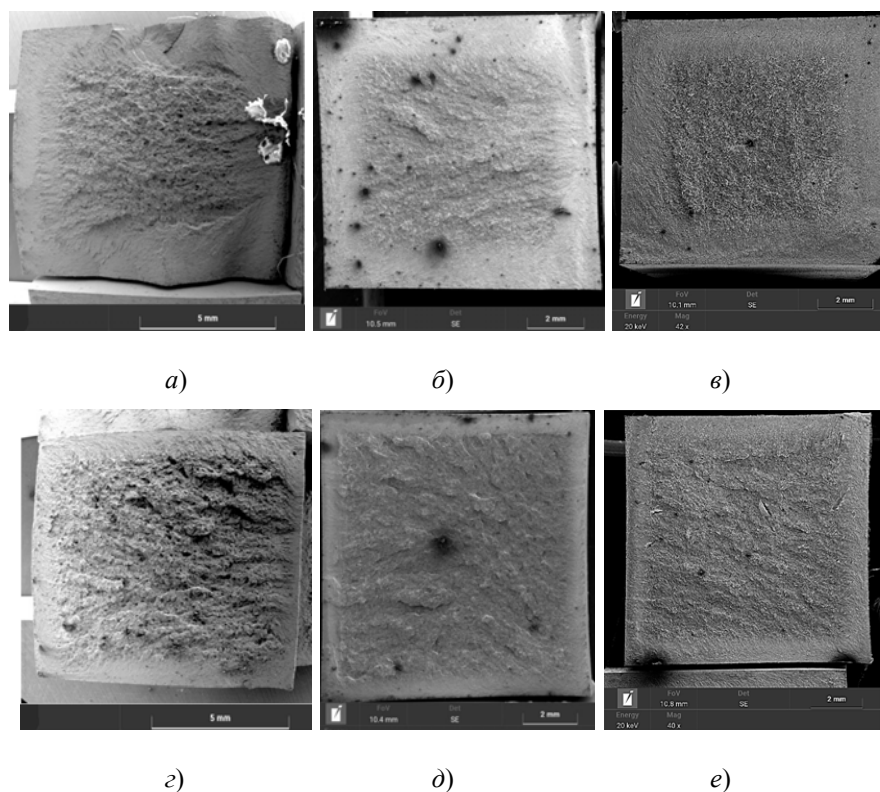


Рис. 2. СЭМ-изображения изломов после проведения испытаний на ударный изгиб диффузионо-упрочненных образцов из стали 16CrMnS5 (а, г), 20ХН3А (б, д) и 18ХГТ (в, е): а–в – 8-часовая цементация; г–е – 6-часовая нитроцементация

Исследовано влияние цементации и нитроцементации на ударную вязкость сталей 16CrMnS5, 20ХН3А и 18ХГТ. Анализ данных позволил сделать следующие выводы:



1. Наибольшей ударной вязкостью обладают диффузионные слои стали 16CrMnS5 в не зависимости от длительности и вида ХТО. После 8-часовой цементации величина ударной вязкости составила 13,8 Дж/см<sup>2</sup>. После увеличения длительности процесса до 12 часов значение незначительно снизилось – до 12,9 Дж/см<sup>2</sup>. В случае проведения нитроцементации ударная вязкость возросла с 30,7 до 36 Дж/см<sup>2</sup> при увеличении времени насыщения.

2. У стали 20ХН3А величина ударной вязкости при проведении 8-часовой цементации и 6-часовой нитроцементации имеет близкие значения к аналогичным слоям стали 16CrMnS5 – 13,7 и 30,2 Дж/см<sup>2</sup> соответственно. Однако после увеличения длительности обоих процессов значение ударной вязкости снижается на 25 %.

3. Значения ударной вязкости всех диффузионных слоев стали 18ХГТ значительно ниже, чем у остальных слоев на сталях 16CrMnS5 и 20ХН3А. Величина ударной вязкости в 1,8–3,2 раза, чем у стали, обладающей наибольшей вязкостью, – 16CrMnS5.

#### Литература

1. Микроструктура и микротвердость термодиффузионно-упрочненных слоев конструкционной стали 16CrMnS5/ И. Н. Степанкин [и др.] // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О.Сухого ; под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 84–88.
2. Gas nitriding and its variations in industrial applications / P. Wach [et al.] // Materials Engineering. – 2008. – Vol. 6. – P. 808–811.
3. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев стали 40Х и 35ХГСА / И. Н. Степанкин [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редкол.: А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2019. – С. 104–116.

## СЕКЦИЯ III ЭНЕРГЕТИКА

---

### АБСОРБЦИОННЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС С ПАРОВЫМ ПРИВОДОМ В СИСТЕМЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ТЭЦ

В. В. Янчук

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель В. Н. Романюк

*Приведены основные результаты расчета изменения эффективности работы электрической станции на базе паротурбинной установки ПТ-60. При модернизации системы регенеративного подогрева питательной воды и сохранении минимального пропуска пара в конденсатор, что соответственно приведет также и к снижению электрической мощности станции, возможно повышение электрического КПД на 0,82 % и энергетического КПД станции – на 0,54 %.*

**Ключевые слова:** турбоустановка ПТ-60, абсорбционный тепловой насос, система регенеративного подогрева питательной воды, низкотемпературные тепловые потоки.

Основным источником первичной энергии в Беларуси как в энергетическом, так и в промышленном секторе является природный газ. За 2021 г. его доля среди всех первичных источников при производстве электроэнергии в Беларуси составила 83,8 %, что значительно меньше, чем за 2020 г., когда данная величина составляла 95,5 % [1]. Отмеченное изменение связано с пуском в эксплуатацию Белорусской АЭС. Далее доля природного газа в приходной части энергобаланса энергосистемы будет уменьшаться и при выводе двух блоков БелАЭС на полную мощность составит 57 %, т. е. природный газ по-прежнему останется основным энергоносителем [2]. Соответственно сохраняется актуальность повышения эффективности использования природного газа при производстве энергии.

Основное количество электроэнергии в стране вырабатывается на паротурбинных электрических станциях, сбросные энергетические потоки которых возможно использовать как для смежных технологий, так и внутри самого цикла. Оба варианта повышают степень использования первичного топлива. Далее рассмотрено регенеративное использование побочных потоков для повышения КПД паротурбинных циклов.

Наиболее распространенным типом турбоагрегата в энергосистеме является ПТ-60 и его современные версии – ПТ-65, ПТ-70 и ПТ-80. В этой связи, в первую очередь, следует рассмотреть возможность и эффективность регенеративного использования низкопотенциальных сбросных тепловых потоков применительно к данному типу турбоагрегатов, а именно к тем из них, которые установлены на ТЭЦ, где имеет место значительный невозврат конденсата с производства (Гродненская ТЭЦ-2, Мозырская ТЭЦ и Новополоцкая ТЭЦ) [3].

Для полезного использования тепловых потоков с температурой ниже 40 °С следует применять тепловые машины, работающие по обратному циклу – тепловые насосы. Исследования [4, 5] показывают, что более целесообразно использовать абсорбционные тепловые насосы (АБТН), приводом которых служат тепловые высокопотенциальные потоки, которые имеют более низкую себестоимость по сравне-

нию с электрической энергией, требуемой на привод парокompрессионных тепловых насосов.

В качестве утилизируемого потока АБТН выбрана циркуляционная вода охлаждения конденсатора паровой турбины с температурным графиком 25/20 °С. В качестве нагреваемого потока – поток подпиточной воды, который в классической схеме после блока водоподготовки с температурой около 35 °С подмешивается к потоку основного конденсата. В качестве греющего потока рассмотрен вариант использования парового привода АБТН.

В тепловой схеме исследуемой турбоустановки ПТ-60 для данных нужд возможно использовать пар из регенеративного отбора на ПНД-3 с давлением при рассматриваемых параметрах 3,4 ата и пара из отбора на деаэрактор с давлением 6,0 ата.

Расчетные данные приведены при следующих параметрах: расход пара в П-отбор – 140 т/ч; нагрузка теплофикационного отбора – 52,3 Гкал/ч; что соответствует расходу пара в Т-отбор – 100 т/ч; пропуск пара в конденсатор – 12 т/ч; электрическая мощность при полном невозврате в цикл конденсата производственного отбора – 61,9 МВт.

В качестве функции цели при решении данной задачи возможны три варианта: увеличение выработки электрической энергии при сохранении расхода пара на турбину, сохранение электрической мощности установки при сокращении подачи пара в голову турбины или сохранение минимального пропуска пара в конденсатор с одновременным снижением расхода острого пара и снижением выработки. При этом для каждого варианта тепловые нагрузки отопительного и промышленного отбора сохраняются. Цель модернизации следует выбирать в соответствии с текущими условиями в энергосистеме и в зависимости от показателей работы конкретной электростанции. В условиях пуска Белорусской АЭС предпочтительным будет вариант со снижением выработки электрической мощности. При этом, как известно, эффективность выработки электрической энергии в последних ступенях паровых турбин невысока, поэтому необходимо выбирать вариант с сохранением минимального расхода пара в конденсатор, что для турбин ПТ-60 с уплотненной диафрагмой составляет 12 т/ч.

Эффективность модернизации ТЭЦ оценим на основании электрического КПД  $\eta_{эл}$  и энергетического КПД  $\eta_{эн}$ , которые соответственно рассчитываются:

$$\eta_{эл} = \frac{N}{Q_{топл} - Q_{т.о} - Q_{п.о}};$$

$$\eta_{эн} = \frac{N + Q_{т.о} + Q_{п.о}}{Q_{топл}},$$

где  $N$  – электрическая мощность турбоустановки;  $Q_{т.о}$  – тепловая нагрузка теплофикационного отбора;  $Q_{п.о}$  – тепловая нагрузка производственного отбора;  $Q_{топл}$  – мощность потока топлива.

Далее приведены графики увеличения электрического КПД и снижения электрической мощности турбоустановки от процента возврата конденсата производственного отбора в цикл для данного варианта (рис. 1).

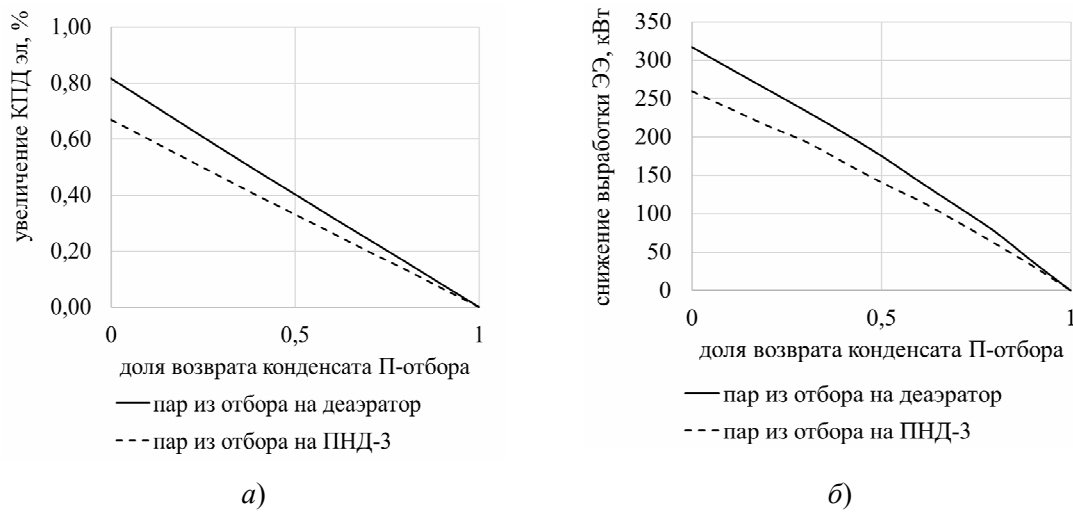


Рис. 1. Изменение показателей работы турбоустановки:  
 а – рост электрического КПД;  
 б – снижение электрической мощности турбоустановки

Из рис. 1, а, б следует, что эффектом от данной модернизации будет снижение электрической мощности турбоустановки на 320 кВт при полном невозврате конденсата производственного отбора и использовании пара давлением 6,0 ата в качестве привода АБТН, и 260 кВт – при использовании пара давлением 3,4 ата. В варианте с меньшим давлением греющего пара получен меньший эффект, что объясняется более низкой конечной температурой нагреваемого потока. При этом электрический КПД турбоустановки увеличивается на 0,82 и 0,67 соответственно, энергетический КПД также увеличивается на 0,54 и 0,44 %.

Полученные расчетные данные доказывают термодинамическую эффективность предложенных решений. В дальнейшей работе следует рассмотреть использование других высокопотенциальных потоков в качестве привода АБТН, а именно – дымовых газов из тракта парового котла.

#### Литература

1. Ourworldindata / Electricitymix. – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/electricity-mix#fossil-fuels-what-share-of-electricity-comes-from-fossil-fuels>. – Дата доступа: 28.12.2022.
2. Хрусталева, Б. М. Расширение энергосберегающей базы в условиях централизованного теплоснабжения и доминирования энергоемких технологий / Б. М. Хрусталева, В. Н. Романюк // Энергоэффективность. – 2017. – № 12. – С. 20–27.
3. Янчук, В. В. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. выс. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2022. – № 6. – С. 511–523.
4. Романюк, В. Н. Абсорбционные или парокompрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, С. В. Мальков // Энергия и менеджмент. – 2013. – № 4. – С. 18–21.
5. Янченко, И. В. Влияние абсорбционного теплового насоса на тепловую экономичность ТЭС и АЭС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / И. В. Янченко. – Новочеркасск, 2015. – 180 л.

## ОПТИМАЛЬНЫЙ ТИП ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ПРИ МАЛОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА

А. С. Каледник

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель Н. А. Попкова

*Рассмотрены преимущества и недостатки основных типов ветроэнергетических установок. Проведен расчет мощности ротора Дарье и горизонтально-осевого ветрогенератора.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ротор Дарье, ротор Савониуса, концентратор, эффективность.

Ветроэнергетика является одним из наиболее перспективных направлений возобновляемой энергии в Республике Беларусь. В стране выявлено более 1840 площадок, подходящих для промышленных ветростанций с суммарным теоретическим потенциалом более 1600 МВт [1]. Законодательством установлен ряд комплексных планов развития и мер стимулирования возобновляемой энергетики, что является частью политики обеспечения энергетической безопасности государства.

Средняя скорость ветра в Беларуси составляет 3–4.4 м/с на высоте 10 м [2]. Для эффективной работы ветрогенераторов требуются показатели – не менее 5–6 м/с. В связи с относительно низкой средней скоростью ветра возникает необходимость рассмотреть перспективу использования различных ветроэнергетических установок малой мощности. На сегодняшний день разработано множество ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Целью данного исследования является определение оптимального типа ветроэнергетической установки при малой скорости ветра. Под малой скоростью ветра подразумеваются значения от 3 до 5 м/с, так как именно они характерны для большей части территории Беларуси. Задачи исследования включают следующее:

- 1) ознакомиться с основными типами конструкций ВЭУ;
- 2) выявить преимущества и недостатки данных конструкций;
- 3) привести сравнительную характеристику ротора Дарье и горизонтально-осевой ВЭУ пропеллерного типа.

Рассмотрим основные виды конструкций ВЭУ (рис. 1), предлагаемые для использования при малой скорости ветра.

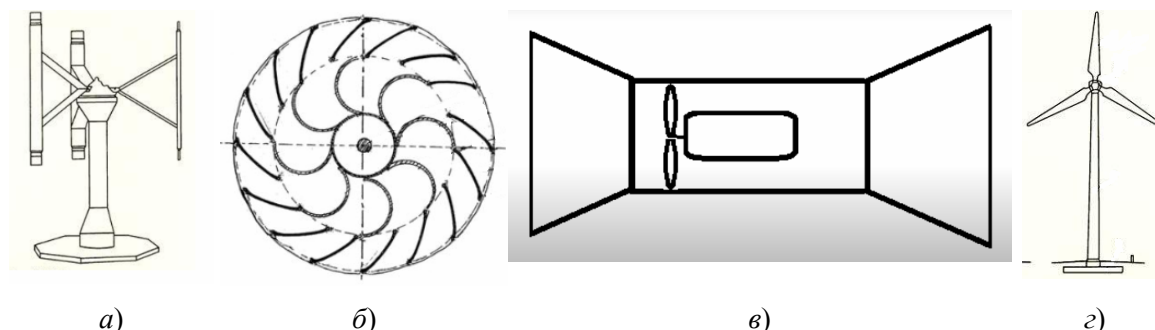


Рис. 1: Основные виды конструкций ветроэнергетических установок:  
а – ротор Дарье; б – многолопастный ротор Савониуса с воздухозаборниками;  
в – конфузор-диффузор; г – ветрогенератор пропеллерного типа

Ротор Дарье представляет собой симметричную конструкцию, состоящую из двух и более аэродинамических крыльев, закрепленных на радиальных балках. На каждое крыло, движущееся относительно потока, действует подъемная сила, величина которой зависит от угла между векторами скорости потока и мгновенной скорости крыла. Основными преимуществами работы ротора Дарье, как и большинства вертикально-осевых ВЭУ, являются независимость от изменения направления ветра и отсутствие сложных механизмов защиты, в то время как в горизонтально-осевой ВЭУ пропеллерного типа необходима система винтрегулируемого шага, что усложняет конструкцию. Коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) не зависит от оси вращения и для ротора Дарье, как и ВЭУ пропеллерного типа, составляет в среднем 45 % [3]. Тем не менее ротор Дарье при одинаковой материалоемкости значительно уступает пропеллерному ветрогенератору по площади ометания  $S$ , которая пропорциональна мощности ветрового потока  $P$ :

$$P = 0,6 \cdot Sv^3.$$

**Сравнительная таблица мощностей ротора Дарье и ветроколеса с одинаковой материалоемкостью**

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6
Мощность ветроколеса, Вт	3,39	27,13	91,56	217,04	423,9	732,5
Мощность ротора Дарье, Вт	1,08	8,64	29,16	69,12	135	340,44

Расчеты произведены для ротора Дарье и горизонтально-осевой ВЭУ пропеллерного типа, имеющих по три одинаковых крыла длиной 2 м. КИЭВ принят за 45 %. Потери в подшипниках и передачах не учитывались.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что ротор Дарье значительно уступает ветроколесу по вырабатываемой мощности, материалоемкости и, как следствие, – имеет более длительный срок окупаемости.

Ещё одной вертикально-осевой турбиной является ротор Савониуса. Вращающий момент возникает при обтекании ротора Савониуса потоком воздуха за счет разного сопротивления выпуклой и вогнутой частей. Достоинствами ротора Савониуса являются простота конструкции, низкий уровень шума, независимость от направления ветра. Однако он обладает низкой аэродинамической эффективностью. КИЭВ не превышает 0,18–0,24; КПД составляет 17–18 % [4]. Очевидно, при малой скорости ветра вырабатываемая мощность ротора Савониуса будет незначительной. Для увеличения энергетических характеристик турбины требуется добавление дополнительных устройств, усиливающих поток воздуха (например, воздухозаборники), что может значительно увеличить стоимость установки, усложнить эксплуатацию.

Концентраторы ветрового потока представляют собой конфузورные или диффузорные конструкции, устанавливаемые рядом с рабочим колесом ветрогенератора. На практике оказалось, что такая установка является экономически и технически неэффективной. Прирост в скорости составляет только 8–10 %. Неэффективность концентратора объясняется парадоксом сужающейся воронки.

Ожидается, что поток воздуха будет полностью проходить через сужающую воронку и ускоряться. Однако на входе в конфузур возникает область повышенного давления, которая тормозит набегающий поток воздуха, заставляет его огибать воронку с внешней стороны. На выходе концентратора давление уменьшается, ком-

пенсирюя торможение воздуха на входе. Для увеличения эффективности требуется громоздкая конструкция, что является экономически невыгодным и сложным технически.

Таким образом, в ходе исследования самым оптимальным типом ветрогенератора при малых скоростях ветра признана горизонтально-осевая ВЭУ малой мощности. Это обусловлено использованием ею максимальной площади ометания при наименьшей материалоемкости.

#### Л и т е р а т у р а

1. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь. – Режим доступа: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map>.
2. Викторovich, Н. В. Исследование эффективности использования энергии ветра на территории Брестской области Республики Беларусь / Н. В. Викторovich // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 2. – С. 117–121.
3. Бабина, Л. В. Анализ ветроустановок для электростанций малой мощности / Л. В. Бабина // Науч. журн. КубГАУ. – 2012. – № 78.
4. Исследование аэродинамики и энергетических характеристик ротора Савониуса / А. А. Бубенчиков [и др.] // МНИЖ. – 2016. – № 12-3 (54).

## СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОДУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

У. И. Гришан

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель Н. А. Самосюк

*Проведен анализ валового потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и энергоемкости валового внутреннего продукта Республики Беларусь. Повышение эффективности использования ТЭР является для республики приоритетным направлением. Изучены различные трактовки понятия «энергоемкость». Выделены факторы, способствующие снижению энергоемкости продукции. По результатам внутреннего энергетического аудита на предприятии предложен план мероприятий по экономии потребления ТЭР.*

**Ключевые слова:** топливно-энергетические ресурсы, энергосбережение, энергоэффективность, энергоемкость.

Состояние экономики любых стран во многом определяется эффективностью использования (ТЭР), а поскольку Республика Беларусь не обладает значительными собственными ТЭР, и до 80 % всех потребляемых в стране ТЭР являются импортными, то данный фактор особенно важен для страны, так как снижение энергоемкости ВВП позволяет снизить валютные затраты страны на закупку ТЭР, следовательно, Республика Беларусь становится более независимой в сфере энергообеспечения от внешних поставщиков, что способствует повышению конкурентоспособности продукции на внутреннем и внешнем рынках страны, а также позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Динамика энергоемкости ВВП в Республике Беларусь представлена на рис. 1.

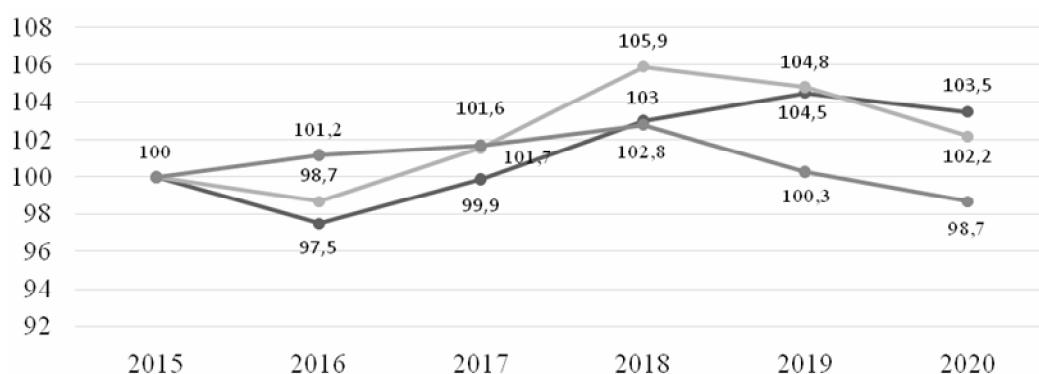


Рис. 1. Динамика энергоемкости валового внутреннего продукта, %:  
 —●— валовой внутренний продукт (ВВП); —●— валовое потребление топливно-энергетических ресурсов; —●— энергоемкость ВВП

Проанализировав рис. 1, можно отметить, что динамика энергоемкости в Республике Беларусь нестабильна, однако в сравнении с базисным периодом (2015 г.) имеет положительное направление в сторону снижения. Это связано с грамотно проводимой политикой по энергосбережению в Республике Беларусь.

Как отмечает В. С. Северянин: «Энергоемкость – количество энергии, потребленной для производства продукции» [1].

В словаре-справочнике Д. К. Евдокимова «под энергоемкостью продукции (работ) понимается показатель, характеризующий величину годовых затрат первичных топливно-энергетических ресурсов в тоннах или килограммах условного топлива на производство единицы продукции: 1 млн (тыс.) р. совокупного общественного продукта, национального дохода, товарной продукции» [2].

В экономическом словаре В. Г. Золотогорова дается следующее определение: «энергоемкость продукции (работы) – показатель, характеризующий количество энергии, затраченной на единицу выпуска продукции или выполненных работ (оказанных услуг)» [3].

Согласно краткому экономическому словарю: «энергоемкость продукции – показатель, характеризующий расход энергии на единицу выпущенной продукции. По предприятию рассчитывается как отношение затрат топливно-энергетических ресурсов к объему товарной продукции. В расчет включаются все виды топлива и энергии, пересчитанные в тонны условного топлива (или гигаджоули) по единым в стране эквивалентам (коэффициентам пересчета)» [4].

По мнению Л. П. Падалко, энергоемкость продукции – это «один из показателей, характеризующих энергоэффективность на стадии потребления энергоресурсов и энергии». Он измеряется в килограммах условного топлива (тоннах условного топлива) на 1 р. выпущенной продукции [5].

Выделяют следующие факторы, способствующие снижению энергоемкости продукции: организационные, экономические, технологические, конструктивные (рис. 2).





Рис. 2. Факторы снижения энергоемкости продукции

На основании проведенного внутреннего энергетического аудита на предприятии, можно предложить план мероприятий по экономии потребления ТЭР и как следствие снижению энергоемкости продукции (см. таблицу).

### План мероприятий по снижению энергоемкости продукции на промышленном предприятии

Мероприятие	Экономия ТЭР, т у. т.	Эффект, тыс. руб.
1. Модернизация склада бестарного хранения сырья	110,4	78,13
2. Замена печей	64,8	45,86
3. Внедрение утилизатора тепловой энергии уходящих газов печей	51,3	36,31
4. Замена низкоэффективных отопительных котлов, выработавших свой ресурс, на современные энергоэффективные аналоги	45,9	32,19
5. Реализация схем рекуперации тепловых ВЭР организованных вентиляционных выбросов на базе приточно-вытяжных систем	7,3	5,12
6. Внедрение энергоэффективного компрессора с частотным регулированием для производства сжатого воздуха	15,6	10,9
<i>Итого</i>	295,3	208,51

Реализация предложенных мероприятий позволит снизить расход топливно-энергетических ресурсов на 295,3 т у. т., что в денежном эквиваленте составит 208,51 тыс. руб.

#### Литература

1. Северянин, В. С. Основы энергосбережения: Курс лекций / В. С. Северянин. – Брест : БПИ, 1998. – 60 с.
2. Евдокимов, Д. К. Нормирование материальных ресурсов : словарь-справочник / Д. К. Евдокимов, Г. М. Покараев. – М. : Экономика, 1988. – 199 с.
3. Золотогоров, В. Г. Экономический словарь / В. Г. Золотогоров, Г. Ф. Кузнецова, М. Ю. Пасюк. – Минск : Наука і тэхніка, 1990. – 415 с.
4. Краткий экономический словарь. – М. : Инфра-М, 1987. – 600 с.
5. Падалко, Л. П. Основы рыночной экономики и энергетика : учеб.-метод. пособие / Л. П. Падалко. – Минск : БГПА, 2000. – 34 с.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОПАНЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОХРАНЫ ГРАНИЦЫ

Е. В. Кудлаева, Д. В. Балюк

Государственное учреждение образования  
«Институт пограничной службы Республики Беларусь», г. Минск

Научный руководитель Д. В. Гансецкий

*На основании практического использования солнечных фотопанелей в составе автономных систем электроснабжения технических средств охраны границы описаны факторы, оказывающие влияние на работоспособность и производительность солнечных фотопанелей, и, в частности, произведено исследование воздействия температуры окружающей среды на их энергоэффективность. В ходе проведенных исследований установлено, что при повышении температуры окружающей среды солнечная фотопанель начинает нагреваться, в результате чего ее энергоэффективность снижается.*

**Ключевые слова:** технические средства охраны границы, автоматизированный пост технического наблюдения, автономная система электроснабжения, солнечная фотопанель, температура, коэффициент полезного действия, энергоэффективность, производительность, работоспособность.

Целью исследования является воздействие температуры окружающей среды на энергоэффективность солнечных фотопанелей технических средств охраны границы (ТСОГ), в частности, автоматизированного поста технического наблюдения (АПТН).

Солнечные фотопанели в XXI в. активно вошли в повседневный быт человека. Эффект преобразования света в электричество был открыт еще в 1842 г. французским физиком Александром Эдмонтом Беккерелем, но популярность и внедрение в различные отрасли человеческой деятельности солнечной энергетики произошло в конце XX – начале XXI в. благодаря развитию информационных и полупроводниковых технологий [1].

На сегодняшний день благодаря таким преимуществам, как возобновляемость, неисчерпаемость, повсеместность применения, автономность и экологичность солнечная энергетика продолжает развиваться и внедряться в различные технологические процессы и области человеческой деятельности. Не стало исключением и применение солнечных фотопанелей в органах пограничной службы Республики Беларусь (ОПС РБ) в качестве основного источника электроснабжения некоторых ТСОГ, которые находятся на значительном удалении от промышленных сетей электроснабжения и коммуникаций. Примером может служить АПТН, оснащенный автономной системой электроснабжения (АСЭ) [2].

Конструктивно АПТН может состоять из оптико-электронного, тепловизионного и радиолокационного модулей с антеннами беспроводной передачи данных. Для обеспечения круглосуточного электроснабжения АПТН обычно проектируется и устанавливается АСЭ, основными компонентами которой являются ветрогенератор и солнечные фотопанели, их контроллеры, утилизатор нагрузки, блок аккумуляторных батарей (АКБ) и инвертор (рис. 1).

Вместе с тем, несмотря на все положительные стороны солнечных фотопанелей, имеется и ряд недостатков, которые оказывают существенное влияние на их энергоэффективность (производительность) и работоспособность всей АСЭ АПТН в целом.

Факторами, оказывающими влияние на энергоэффективность солнечных фотопанелей будут являться: технология и материал, из которого они изготовлены; время

суток (день либо ночь) и время года (лето или зима); погодные и климатические условия (дождь, снег, туман, смог и т. п.); неравномерность солнечного освещения (угол падения солнечных лучей на поверхность солнечной фотопанели) и затенение посторонними предметами (деревья, строения и элементы строительных конструкций и т. д.); загрязнение поверхности солнечных фотопанелей (осевшая пыль, налипшая грязь, дождевые осадки, снег, оледенение и т. п.); рост температуры окружающей среды и, как следствие, – повышение температуры на поверхности самих солнечных фотопанелей.

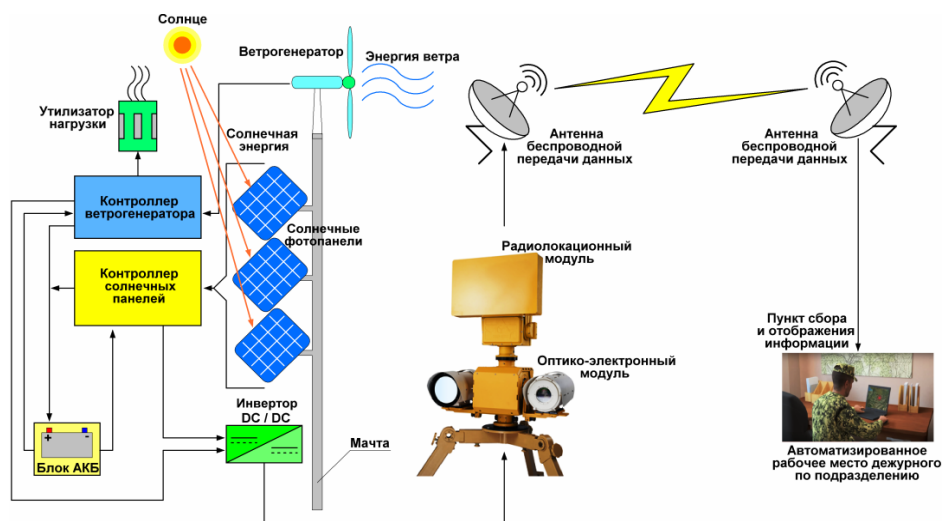


Рис. 1. Структурная схема АПТН с АСЭ

Рост температуры солнечной фотопанели негативно влияет на ее производительность и работоспособность, особенно данный фактор актуален для летнего периода.

Исходя из вышеизложенного методом математических вычислений произведем исследование данного фактора и отразим полученные результаты на графике.

Зависимость температуры поверхности солнечной панели от температуры окружающей среды можно рассчитать по следующей формуле:

$$T_{pi} = T_{\text{возд}} + \frac{E_i}{800} (T_{\text{н.экс}} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}), \quad (1)$$

где  $T_{pi}$  – температура поверхности солнечной фотопанели,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{возд}}$  – температура окружающей среды в расчетной точке,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{н.экс}}$  – нормальная температура эксплуатации солнечной фотопанели,  $^\circ\text{C}$  (обычно в технических характеристиках солнечной фотопанели принимается  $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ );  $E_i$  – интенсивность солнечного излучения в расчетной точке,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  [3].

Коэффициент полезного действия (КПД) солнечной фотопанели рассчитываем по следующей формуле:

$$\eta_{pi} = \eta_0 (1 - 0,0045 (T_{pi} - 25)), \quad (2)$$

где  $T_{pi}$  – температура поверхности солнечной фотопанели, °С;  $\eta_0$  – КПД солнечной панели при температуре 25 °С, % [3].

По формулам (1) и (2) произведем расчет зависимости КПД солнечной фотопанели от температуры ее поверхности для июля месяца в течение суток, и полученные данные сведем в таблицу.

По полученным данным построим график зависимости КПД солнечной фотопанели  $\eta_{pi}$  от температуры ее поверхности  $T_{pi}$  в течение времени суток  $t$  для июля месяца (рис. 2).

**Зависимость КПД солнечной фотопанели  $\eta_{pi}$  от температуры ее поверхности  $T_{pi}$  в течение времени суток  $t$  для июля месяца**

$t, \text{ч}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{\text{возд.}}, \text{°C}$	17	17	16	16	16	17	19	22	24	27	30
$E_i, \text{Вт/м}^2$	0	0	0	0	200	300	400	500	600	700	800
$T_{pi}, \text{°C}$	17	17	16	16	17,25	18,875	21,5	25,125	27,75	31,375	35
$\eta_{pi}, \%$	17,612	17,612	17,6885	17,6885	17,59288	17,46856	17,26775	16,99044	16,78963	16,51231	16,235

*Продолжение*

$t, \text{ч}$	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$T_{\text{возд.}}, \text{°C}$	34	34	32	30	29	28	27	25	24	23	22	20
$E_i, \text{Вт/м}^2$	1000	1100	1200	1300	1300	1200	1000	800	600	400	200	100
$T_{pi}, \text{°C}$	40,25	40,875	39,5	38,125	37,125	35,5	33,25	30	27,75	25,5	23,25	20,625
$\eta_{pi}, \%$	15,83338	15,78556	15,89075	15,99594	16,07244	16,19675	16,36888	16,6175	16,789	16,961	17,134	17,335

Исходя из полученных расчетов следует, что в результате увеличения температуры окружающей среды  $T_{\text{возд}}$  в течение времени суток  $t$  увеличивается и температура поверхности солнечной фотопанели  $T_{pi}$ , в результате чего ее КПД  $\eta_{pi}$  начинает уменьшаться (на 2–3 %), что свидетельствует о снижении ее энергоэффективности. Данное выражение подтверждается графиком на рис. 2.

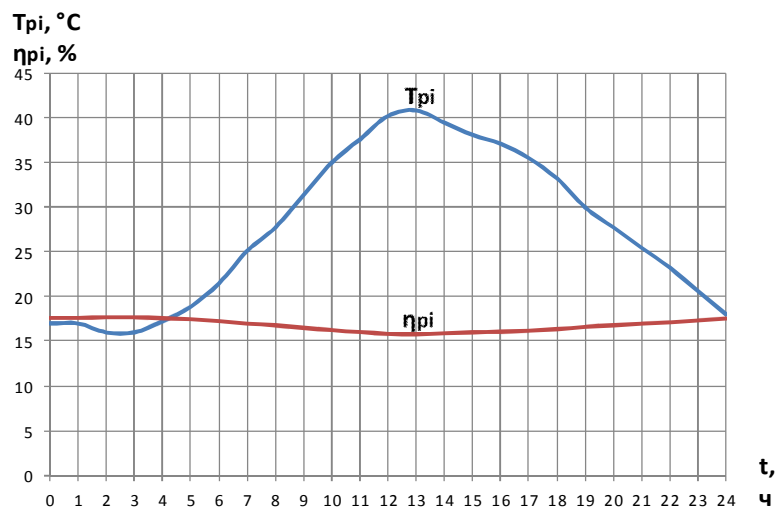


Рис. 2. Зависимость КПД солнечной фотопанели  $\eta_{pi}$  от температуры ее поверхности  $T_{pi}$  в течение времени суток  $t$

Перспективы применения солнечных фотопанелей в ОПС РБ для электроснабжения ТСОГ – инновационный и неотъемлемый процесс, которому способствует удаленность подразделений границы и рубежей охраны от промышленных сетей электроснабжения и коммуникаций. Вместе с тем при проектировании и монтаже АСЭ ТСОГ следует учитывать ряд вышеуказанных факторов, которые в последующем могут оказывать негативное влияние на работоспособность всей АСЭ и производительность солнечных фотопанелей – в частности. Одним из таких негативных факторов является воздействие температуры окружающей среды на энергоэффективность солнечной фотопанели, что и было подтверждено в ходе проведенного исследования.

#### Л и т е р а т у р а

1. Солнечная батарея.. – 2023. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная\\_батарея](https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_батарея). – Дата доступа: 15.03.2023.
2. Пост технического наблюдения с автономной системой электропитания : рук. по эксплуатации / Производств. част. унитар. предприятие «ЛЕАРА». – Минск, 2020. – 8 с.
3. Головки, С. В. Анализ влияния климатических факторов на выбор типа солнечной панели / С. В. Головки, Д. А. Задоркин / Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. – 2020. – № 2 (70). – С. 21–26.

### СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ ПО ХРОМОТОГРАФИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

Е. А. Жук

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

*Рассмотрены различные методы анализа результатов хроматографии трансформаторного масла, а также представлены результаты исследований.*

**Ключевые слова:** хроматографический анализ, трансформатор, методика Дорненбурга, методика согласно ИЕС 60599, методика согласно СТП 33243.20.366–16.

Сегодня можно наблюдать, что проводится реконструкция и строительство новых трансформаторных подстанций. Выполнить замену такого дорогостоящего и важного элемента электрической сети не всегда представляется возможным. По этой причине в соответствии с нормами проводятся периодические испытания трансформаторов. Для выявления дефектов трансформатора выполняются различные испытания. Одним из таких испытаний является хроматографический анализ трансформаторного масла.

При выполнении анализа по соотношению различных газов выявляются различного рода дефекты, такие, как частичные разряды с низкой плотностью энергии; частичные разряды с высокой плотностью энергии; электрические разряды малой мощности; электрические разряды большой мощности; термический дефект низкой температуры ( $< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); термический дефект в диапазоне низких температур ( $150\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); термический дефект в диапазоне средних температур ( $300\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); термический дефект высокой температуры ( $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); разрядный и термический дефект.

В Республике Беларусь при выполнении хроматографического анализа опираются на рекомендации, описанные в СТП 33243.20.366–16. В Российской Федерации

применяется аналогичная методика. Согласно белорусско-русской методике для определения характера дефекта используются следующие отношения концентраций газов:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \frac{CH_4}{H_2} \text{ и } \frac{C_2H_4}{C_2H_6}. \quad (1)$$

В странах Запада и США используются методика, описанная в ИЕС 60599, и методика, разработанная Дорненбургом.

Метод ИЕС 60599 для идентификации дефектов использует те же три, что и ранее, отношения пяти углеводородных газов. Однако трактовка результатов, получаемых при расчетах, имеет отличия.

Метод Дорненбурга для определения характера дефекта включает следующие отношения концентраций газов:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \frac{CH_4}{H_2}, \frac{C_2H_6}{C_2H_2} \text{ и } \frac{P_2H_2}{CH_4}. \quad (2)$$

Можно наблюдать явное отличие между соотношением газов по методике Дорненбурга.

В табл. 1 приведены результаты хроматографического анализа газов в трансформаторном масле. В табл. 2 дана информация о предполагаемом дефекте в соответствии с методиками.

Таблица 1

Газы, растворенные в масле трансформатора ТЗ

Дата анализа	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
30.10.2015 г.	0,0006	0,0006		0,0193	0,0065	0,022	0,507		
13.11.2015 г.	0,0015	0,0008		0,0204	0,0073	0,022	0,562		
30.11.2017 г.		0,0008		0,0236		0,033	1,076	1,86	9,24
22.11.2018 г.	0,0017	0,0001		0,0016		0,004	0,052		
09.12.2019 г.		0,0005	0,00005	0,0068		0,007	0,11		
25.06.2020 г.		0,0013	0,00008	0,0222		0,011	0,904		

Таблица 2

Результаты анализа соотношений газов

Дата анализа	Белорусско-российская методика	ИЕС 60599	Метод Дорненбурга
30.10.2015 г.	Термический дефект в диапазоне средних температур (300–700 °С)	Нет дефекта	Нет дефекта
13.11.2015 г.	Термический дефект низкой температуры (< 150 °С)	Нет дефекта	Нет дефекта
30.11.2017 г.	Термический дефект высокой температуры (> 700 °С)	Термический дефект высокой температуры (>700 °С)	Электрические разряды большой мощности

Окончание табл. 2

Дата анализа	Белорусско-российская методика	IEC 60599	Метод Дорненбурга
22.11.2018 г.	Нет дефекта	Нет дефекта	Электрические разряды большой мощности
09.12.2019 г.	Термический дефект высокой температуры ( $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Термический дефект высокой температуры ( $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Нет дефекта
25.06.2020 г.	Термический дефект высокой температуры ( $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Термический дефект высокой температуры ( $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Нет дефекта

Как видно из табл. 2, результаты анализа соотношения газов от 30.11.2017 г. показали расхождения по трем методикам. Проведенные исследования в лаборатории показали, что в зоне электрического разряда масло горит, поэтому получается ложный дефект – локальный перегрев. В этом случае дополнительно необходимо определить уровень частичных разрядов и провести термографическое обследование.

## ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

А. Л. Громыко

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

Научный руководитель О. Г. Широков

*Исследованы пусковые характеристики современных бытовых приборов в момент их включения. На основании зарегистрированных осциллограмм определена кратность импульса пускового тока бытовых электроприемников.*

**Ключевые слова:** пусковые характеристики бытовых приборов, кратность импульса пускового тока бытовых электроприемников.

Пусковые характеристики современных бытовых электрических приборов исследовались с помощью лабораторной установки, собранной по схеме, представленной на рис. 1.

Регистрация значений напряжений и токов современных бытовых приборов при исследовании их пусковых характеристик производилась с помощью комплекса регистрации параметров электрических сигналов, по двум измерительным каналам с частотой опроса 5 кГц на каждый канал.

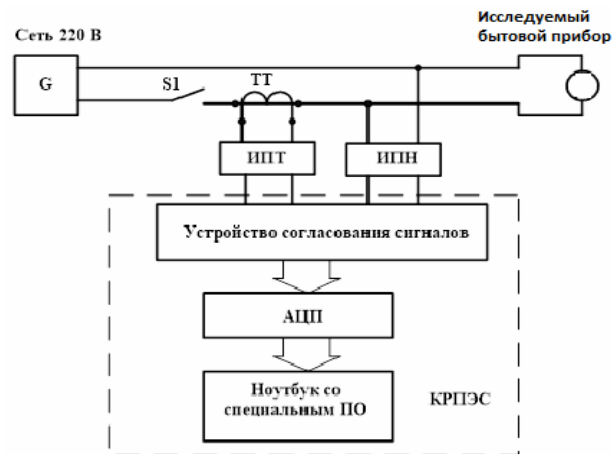


Рис. 1. Схема исследования пусковых характеристик современных бытовых приборов

Схема исследования пусковых характеристик бытовых современных приборов, представленная на рис. 1, содержит: ТТ – измерительный трансформатор тока; ИПТ – измерительный преобразователь тока; ИПН – измерительный преобразователь напряжения; КРПЭС – комплекс регистрации параметров электрических сигналов, содержащий устройство согласования сигналов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь и персональный компьютер со специальным программным обеспечением.

Объектами исследования для изучения пусковых характеристик являлись современные бытовые приборы: фен, блендер, машинка для стрижки, тостер, миксер, утюг, обогреватель, кофемашина, пылесос, микроволновка, электрический чайник, светильник настольный, электрические часы. Ввиду массогабаритных параметров не были измерены и учтены такие приборы, как кондиционеры, телевизор, холодильник, морозильник, джакузи, стереосистема, электрическая плита, стиральная машина, посудомоечная машина, джакузи и т. д.

Осциллограммы напряжения и тока при включении современных бытовых приборов: фен, блендер, машинка для стрижки, тостер, миксер, утюг, обогреватель, кофемашина, пылесос, микроволновая печь, электрочайник и электронные часы приведены на рис. 2–13 соответственно.

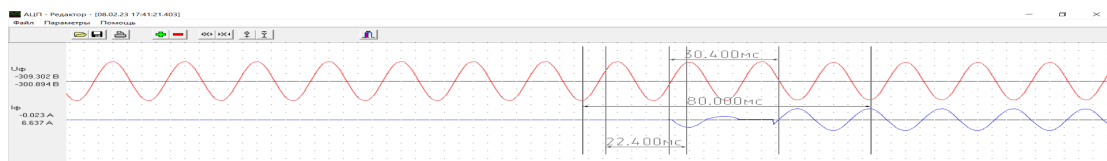


Рис. 2. Осциллограмма напряжения и тока при включении фена

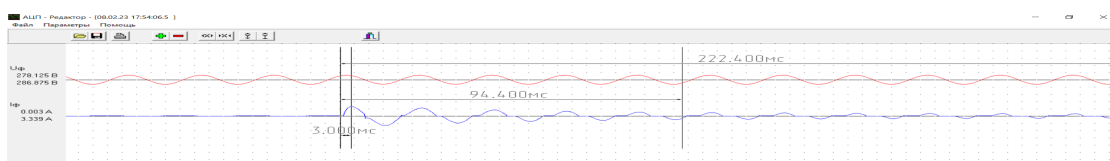


Рис. 3. Осциллограмма напряжения и тока при включении блендера



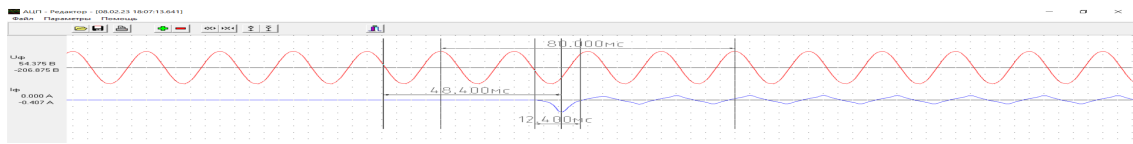


Рис. 4. Осциллограмма напряжения и тока при включении машинки для стрижки

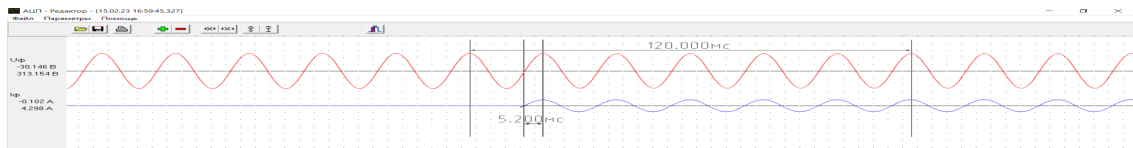


Рис. 5. Осциллограмма напряжения и тока при включении тостера

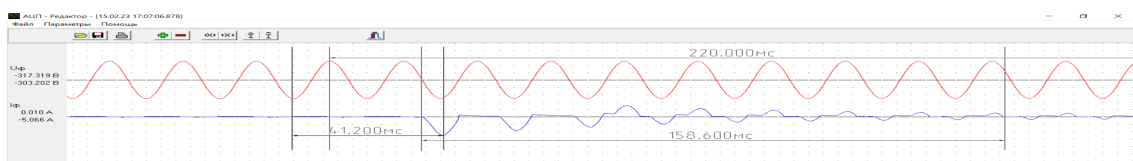


Рис. 6. Осциллограмма напряжения и тока при включении миксера

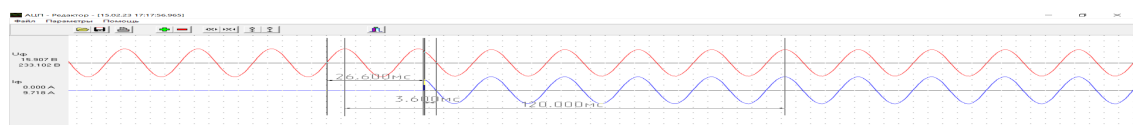


Рис. 7. Осциллограмма напряжения и тока при включении утюга

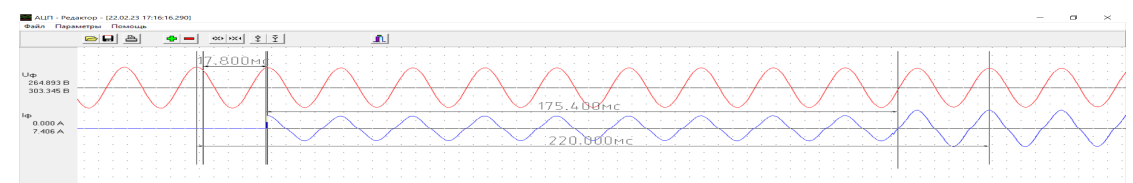


Рис. 8. Осциллограмма напряжения и тока при включении обогревателя

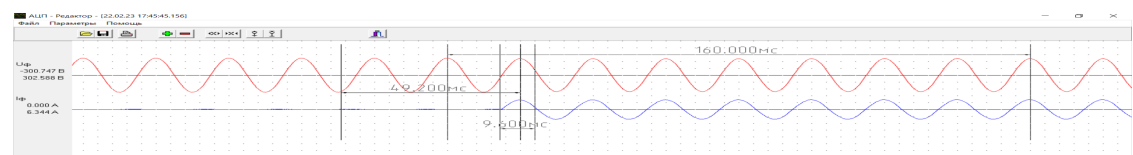


Рис. 9. Осциллограмма напряжения и тока при включении кофемашины

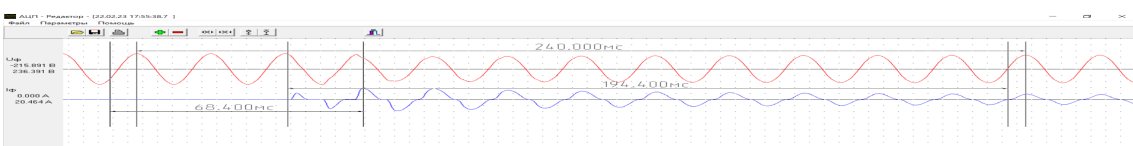


Рис. 10. Осциллограмма напряжения и тока при включении пылесоса

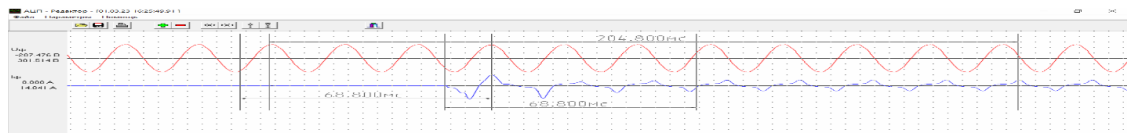


Рис. 11. Осциллограмма напряжения и тока при включении микроволновой печи

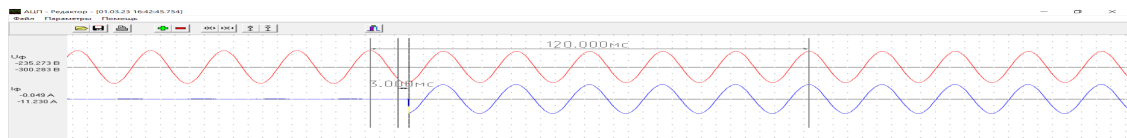


Рис. 12. Осциллограмма напряжения и тока при включении чайника

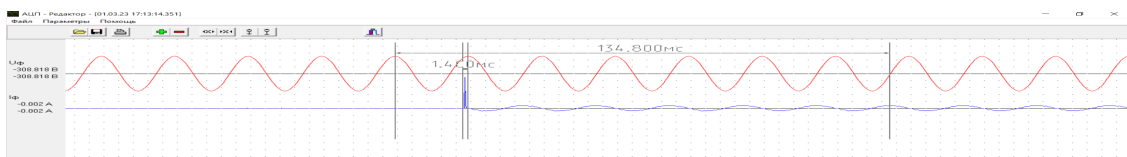


Рис. 13. Осциллограмма напряжения и тока при включении электронных часов

Данные по пусковым характеристикам тока и напряжения рассмотренных бытовых приборов представлены в таблице.

#### Данные по пусковым характеристикам тока и напряжения рассмотренных бытовых приборов

Имя файла	$U_{раб}$ , В	$I_{раб}$ , А	Тип приемника	$U_{амп}$ , В	$I_{амп}$ , А	$I_{пуск}$ , А	Длительность пуска, мс	$K_{п}$	$K_{i}$	$K_{u}$
ras00162.dat	218	4,81	Фен	301	6,637	4,655	30,4	0,7	4,72	123
ras00186.dat	225	0,55	Блендер	317,5	0,781	3,339	94,4	4,28	0,65	128
ras00207.dat	225	0,1	Машинка для стрижки	318,13	0,141	0,407	12,4	2,89	0,213	128
ras00234.dat	221	3,04	Тостер	318,13	4,3	4,3	-	1	5,24	126
ras00260.dat	224	0,6	Миксер	317,9	0,851	5,066	158,6	5,95	1,98	125,7
ras00278.dat	212	8,53	Утюг	299,8	12,06	9,718	3,6	0,8	4,89	125,3
ras00323.dat	211	7,5	Обогреватель	299	10,6	7,406	175,4	0,7	4,8	125
ras00379.dat	214	4,7	Кофемашина	302,6	6,65	6,344	9,6	0,95	4,64	125,7
ras00405.dat	211	6,6	Пылесос	298,5	9,3	20,46	194,4	2,2	11	131,2
ras00450.dat	222	5,12	Микроволновка	314,3	7,25	14,041	68,8	1,94	7,1	125
ras00490.dat	218	7,96	Чайник	308,3	11,23	11,23	-	1	5	126,8
ras00553.dat	225	0,11	часы	318,1	0,16	1,887	1,4	11,8	0,42	127

Из табличных данных делаем вывод, что бытовые приборы могут обладать как значительной кратностью пускового тока и длительностью пуска, так и наоборот, и это зависит от типа прибора. Также, проанализировав осциллограммы напряжений и токов, установлено, что пуск некоторых приборов вызывает провал напряжения, который негативно влияет на качество электроэнергии.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА ЦЕЛЬ В СВЯЗИ С ЛИКВИДАЦИЕЙ СЕТИ 35 кВ

А. В. Михадюк

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

Научный руководитель П. В. Лычѳв

*Предложен по ряду причин вариант перевода питающей сети населенного пункта Цель с 35 кВ на напряжение 10 кВ с последующим сооружением на территории подстанции нового открытого распределительного устройства 10 кВ, выполненного на базе реклоузеров.*

**Ключевые слова:** ликвидация напряжения 35 кВ; открытое рампредельительное устройство на реклоузерах.

Согласно Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей до 2030 г., утвержденной Министерством энергетики Республики Беларусь 25 февраля 2020 г. № 7, намечена программа по переводу сетей 35 кВ на напряжение 110 (10) кВ. Причиной данных изменений в энергосистеме Республики Беларусь является полная амортизация сетей данного класса напряжения и подхода срока их эксплуатации к завершению. Основным критерием при определении дальнейшей перспективы нормальной работы сети 35 кВ является уровень электрических нагрузок энергорайонов. При достаточном уровне электрических нагрузок энергорайона намечается вывод из эксплуатации ВЛ 35 кВ с сооружением ВЛ 110 кВ с выполнением мероприятий по реконструкции действующих подстанций 35 кВ с переводом на напряжение 110 кВ или строительству ПС 110 кВ на новом месте. При низких уровнях электрических нагрузок энергорайона и соответствующей конфигурации сети 10 кВ намечается перевод ВЛ 35 кВ на 10 кВ с подключением нагрузки к ближайшей ПС 110 кВ.

В качестве одного из примера можно привести действующую ПС 35 кВ «Цель», находящуюся на балансе филиала «Бобруйские электрические сети» РУП «Могилев-энерго», которая располагается на территории Осиповичского района Могилевской области. Данная подстанция является тупиковой и получает питание по возведенной в 1972 г. ЛЭП 35 кВ «Цель» от ПС 220 кВ «Лапичи», находящейся в 8,97 км.

На ПС 35 кВ «Цель» установлен масляный трансформатор ТМ-1600/35 1981 г. выпуска. Ячейки КСО 10 кВ установлены в металлическом закрытом распределительном устройстве (ЗРУ) типа «киоск» и оборудованы масляными выключателями ВМПП 10-630-20 (ППВ). Оборудование на данной ПС морально и технически устарело и нуждается в замене, защиты отходящих линий частично выведены из строя по причине их неисправности. Всего отходящих линий – 4, одна из которых – резервная. Основным потребителем нагрузки является военная часть (потребитель 2 категории) и ее объекты. Питание части происходит по кабельной линии 10 кВ № 329, резерв осуществляется по ВЛЭП 10 кВ № 527 до ЗРУ 2211, находящимся на балансе воинской части. Также подстанция питает по ВЛ 10 кВ № 528 населенный пункт Цель. К ВЛ 10 кВ № 528 присоединены 2 КТП суммарной мощностью 200 кВА, одно из которых питает школу в населенном пункте Цель (потребитель 2 категории) и 1 МТП мощностью 63 кВА, схема указана на рис. 1. Для обеспечения надежности и резервирования питающей линии 35 кВ была создана ВЛ 10 кВ № 527, которая обеспечивала питание ПС через населенный пункт Сосновый от ПС 220 кВ «Лапичи» по стороне 10 кВ, но вследствие стихийных бедствий и заболачивания территорий

вокруг р. Свислочь линия была утрачена и частично выведена из эксплуатации. Таким образом, резерва по питанию данная ПС не имеет, надежность электроснабжения потребителей 2 категории (школа в населенном пункте Цель и военная часть 61732) не обеспечивается.

Данные АСКУЭ по среднесуточной проходящей через вводной выключатель активной мощности за период 2022 г. приведены ниже на рис. 2. Анализируя их, можно увидеть, что среднесуточная активная мощность, проходящая через трансформатор за год примерно равна  $P = 108$  кВт, что составляет около 6,75 % от его номинальной мощности, потери холостого хода трансформатора данной марки равны  $P_{xx} = 5,1$  кВт. При этом по экспертным данным специалистов Осиповичского района электрических сетей и Осиповичского районного исполнительного комитета рост нагрузок в данном энергорайоне не планируется.

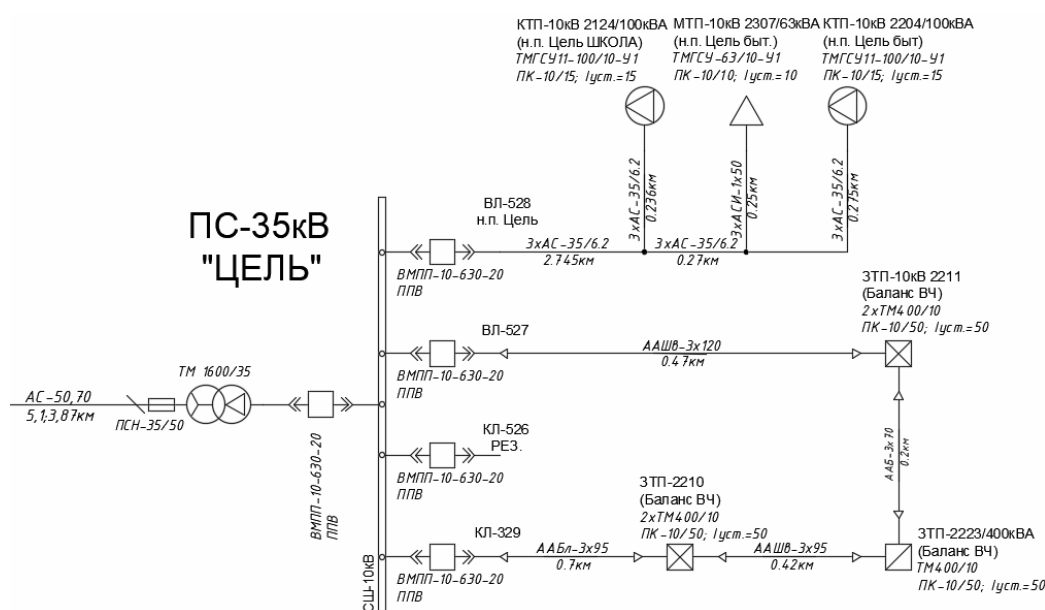


Рис. 1. Схема электрической сети ПС 35 кВ «Цель» и населенного пункта Цель



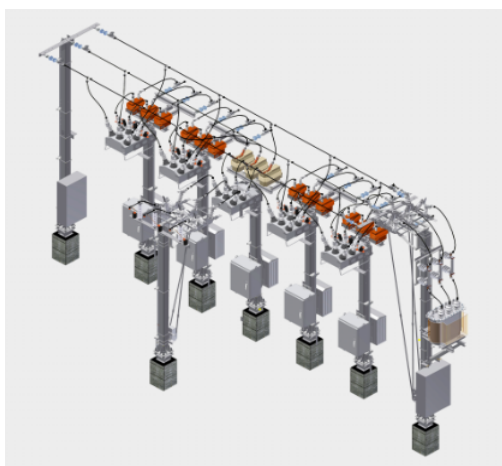
Рис. 2. График нагрузки за 2022 г. по данным АСКУЭ на вводном выключателе ПС 35 кВ «Цель»

Учитывая совокупность всех сложившихся факторов, делаем вывод, что данная электрическая сеть нуждается в реконструкции в связи с завершением срока эксплуатации установленного электрооборудования, снижением потребляемой мощности в данном энергорайоне и не соблюдением критериев надежного электроснабжения потребителей 2 категории.

На рассмотрение выносится предложение по реконструкции электрической сети населенного пункта Цель с переводом ПС «Цель» на напряжение 10 кВ. При этом предлагается полностью демонтировать оборудование 35 кВ, в том числе и ВЛ 35 кВ «Цель» в связи с окончанием срока эксплуатации, имеющееся ЗРУ 10 кВ также подлежит демонтажу. Необходимо проложить к территории ПС 35 кВ «Цель» ВЛП 10 кВ и КЛ 10 кВ в целях обеспечения надежности электроснабжения от ПС 220 кВ «Лапичи» по имеющейся просеке и смонтировать новое распределительное устройство 10 кВ на территории ПС 35 кВ «Цель».

Новое распределительное устройство 10 кВ на территории действующей подстанции предлагается выполнить открытого типа с применением защитных коммутационных аппаратов типа реклоузера.

Открытое распределительное устройство (ОРУ) на реклоузерах – комплексное решение, которое включает само оборудование, необходимые металлоконструкции и материалы для монтажа. ОРУ представляет собой набор типовых узлов, с помощью которых реализуются стандартная функциональность для ввода и отходящих линий рис. 3. Решение выбора ОРУ на базе реклоузеров снизит капитальные затраты на 10–30 % при этом операционные затраты будут минимальны, так как применяемые в составе решения реклоузеры являются надежным и необслуживаемым оборудованием, заслужившим доверие энергетиков Республики Беларусь. Возможность реализации нескольких вводных линий и секционирования отходящих фидеров существенно повысит надежность электроснабжения потребителя при малых капитальных затратах. Помимо стандартных функций реклоузера в ОРУ будут реализованы системы собственных нужд, коммерческого учета электроэнергии, сбора и передачи данных. Высокий уровень заводской готовности данного решения, применение *PnP*-инжиниринга и простота монтажа позволят максимально оптимизировать сроки и ресурсы выполнения реконструкции электрической сети населенного пункта Цель.



а)



б)

Рис. 3. Пример проектной модели (а) и реализованного ОРУ (б) выполненного на базе реклоузеров

Преимущества аналогичных решений были подтверждены при реализации проекта реконструкции ПС 35/6 (10) «Уш-шоки» АО «Жезказганской распределительной электросетевой компании» в Казахстане, реализованных ООО «Таврида Элек-

трик». В ходе проекта было отмечено, что решение ОРУ на реклоузерах отличается от КРУН малой металло- и материалоемкостью, а также минимальным количеством кабельных связей вторичных цепей.

Резюмируя все вышесказанное, приходим к выводу, что ПС 35кВ «Цель» необходимо перевести на напряжение 10 кВ на основании концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года, в связи с низкой энергонагруженностью подстанции ( $P_{\text{ср}} = 108$  кВт), техническому и моральному устареванию оборудования, а также наличием подходящих условий действующей электрической сети. Перевод на напряжение 10 кВ на данной ПС необходимо выполнить с сооружением 2 линий 10 кВ для создания условий надежного электроснабжения потребителей. Запитать ПС 35 кВ «Цель» необходимо с секций 10 кВ ПС 220 кВ «Липичи» (8,97 км). Также следует реализовать компактное ОРУ 10 кВ на территории ПС 35 кВ «Цель» на базе реклоузеров 10 кВ так как это решение отвечает высоким требованиям надежности, функциональности и безопасности, предъявляемым к современным распределительным устройствам и по совокупным показателям превосходит распространенные решения с применением КРУН.

## КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРЫ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

А. А. Ковальчук

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Повышение эффективности использования топлива при производстве электроэнергии и тепла может быть достигнуто путем внедрения конденсационных теплоутилизаторов (КТУ), с их помощью можно использовать низкопотенциальное тепло уходящих дымовых газов. При охлаждении в КТУ дымовых газов ниже температуры точки росы содержащихся в них водяных паров можно дополнительно получить до 12–15 % рекуперации тепла, которое может быть направлено на подогрев обратной сетевой воды в теплосети. Наиболее эффективно применять КТУ в котлах, сжигающих топливо, в продуктах сгорания которого содержится большое количество водяных паров, таких как природный газ и биотопливо. Приведены различные решения, позволяющие обеспечить высокую степень утилизации в КТУ тепла при конденсации водных паров. Представлены КТУ с предварительным подогревом и увлажнением воздуха, подаваемого в котел.*

**Ключевые слова:** конденсационный теплоутилизатор, низкопотенциальное тепло, биотопливо, природный газ, КПД, уходящие дымовые газы.

Благодаря уменьшению температуры дымовых газов ниже температуры точки росы обеспечивается частичная конденсация водяных паров, находящихся в составе уходящих газов. Это тепло далее полезно направляется для подогрева обратной сетевой и подпиточной воды или подогрева воздуха, подаваемого на горение. Поэтому наибольший эффект при применении КТУ достигается в котлах, сжигающих топлива, в продуктах сгорания которых содержится наибольшее количество водяных паров. В этом случае эффективность утилизации низкопотенциального тепла может достигать 15 % при сжигании природного газа и 25 % – при сжигании биотоплива (древесная щепа, дрова, солома).

Принципиальная схема установки глубокой утилизации тепла влажных газов в КТУ с байпасированием части влажных газов в упрощенном виде (рис. 1). Основной

элемент этой установки – конденсаторный теплоутилизатор. Байпасная линия позволяет, когда это необходимо, пропускать газы мимо теплообменника. Такое регулирование обеспечивает требуемые температуру и влагосодержание уходящих газов. Капельная влага, уносимая из КТУ потоком уходящих газов, отделяется в каплеуловителе. В процессе работы конденсационного теплоутилизатора выделяется конденсат, часто в значительном количестве, который удаляется в систему сбора и нейтрализации, после чего конденсат может быть полезно использован для подпитки котельной установки, теплосети либо других нужд.

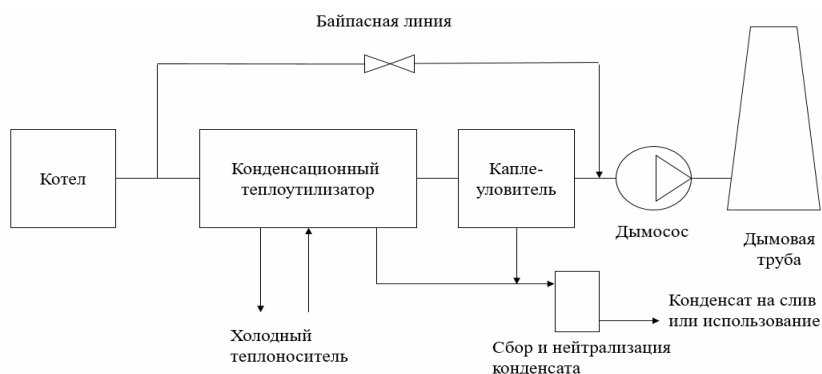


Рис. 1. Принципиальная схема использования КТУ, установленного за котлом

Конденсерная технология с контактным теплообменником обычно применяется в трех вариантах: конденсер; конденсер и увлажнитель воздуха; конденсер, увлажнитель воздуха и тепловой насос.

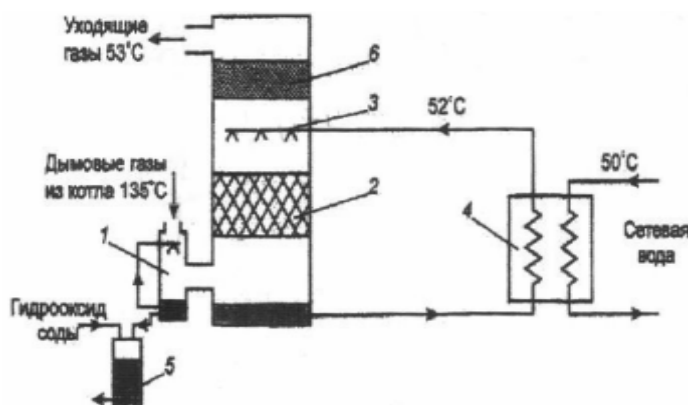


Рис. 3. Схема установки «конденсер»

Схема утилизации теплоты уходящих газов на основе конденсера (рис. 3) наиболее простая и дешевая. Достаточно высокая эффективность установки достигается, если температура обратной сетевой воды не превышает 45 °С.

Дымовые газы после котла поступают в предварительный охладитель 1, где происходит быстрое снижение их температуры. Далее газы поступают в основную колонну установки. Газы проходят через распылитель 2, который обеспечивает разбиение подаваемой сверху воды на мелкие капли. Это позволяет существенно интенсифицировать процессы охлаждения продуктов сгорания и конденсации содержащихся в них водяных паров. Далее продукты сгорания проходят через жалюзийный

сепаратор и направляются в дымовую трубу. Подогретая вода собирается внизу колонны конденсера и направляется в теплообменник 4, где подогревает сетевую воду, а часть воды переливается в предварительный охладитель 1. Так как за счет конденсации части содержащихся в дымовых газах водяных паров объем воды постоянно увеличивается, то излишек воды из предварительного охладителя сливается в накопительный бак 5. Ввиду того, что за счет растворения в конденсате  $\text{CO}_2$  кислотность воды повышается, в баке осуществляется ее химическая нейтрализация, после чего она сливается в канализацию. Охлажденная в теплообменнике 4 вода снова подается в конденсер через раздающее устройство.

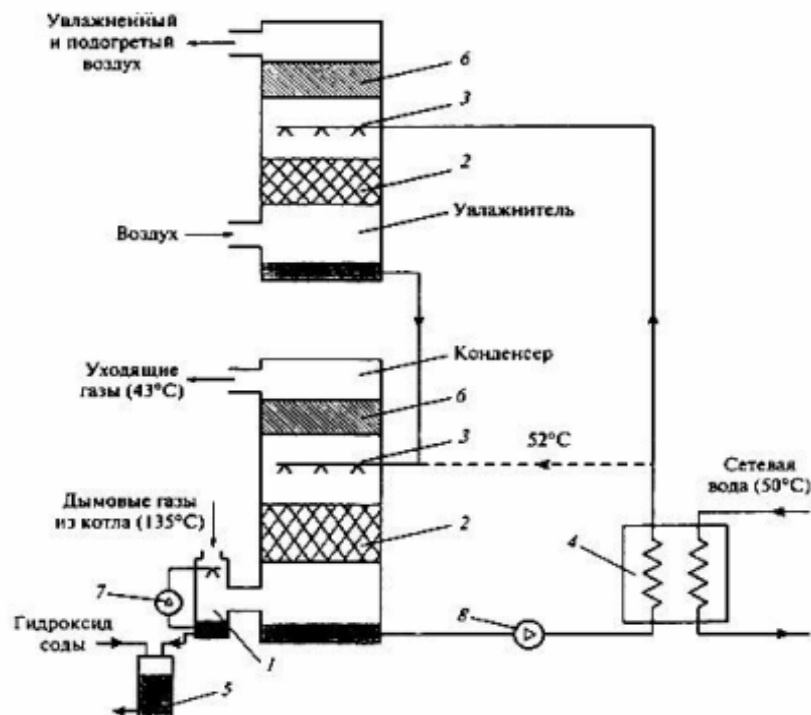


Рис. 4. Схема установки «конденсер и увлажнитель»

Более сложная, но и более эффективная схема «конденсер и увлажнитель» (рис. 4). Может работать при более высокой температуре обратной сетевой воды.

Вода после теплообменника 4 разделяется на два потока, один из которых идет на увлажнитель воздуха. Воздух, поступающий в увлажнитель, проходит через распылитель 2, в котором происходит его подогрев за счет контакта с каплями воды, подаваемой через распылитель 3. Часть влаги испаряется, а часть влаги при этом собирается на дне увлажнителя. Вследствие теплообмена с воздухом температура воды снижается, и она подается в конденсер через распылитель, а подогретый и увлажненный воздух проходит через жалюзийный сепаратор подается в котел.

Предварительное увлажнение воздуха способствует уменьшению выбросов оксидов азота на 40–60 %; снижается кислотность благодаря переходу части растворенного  $\text{CO}_2$  в воздух; температура дымовых газов на выходе из КТУ становится меньше температуры обратной сетевой воды.



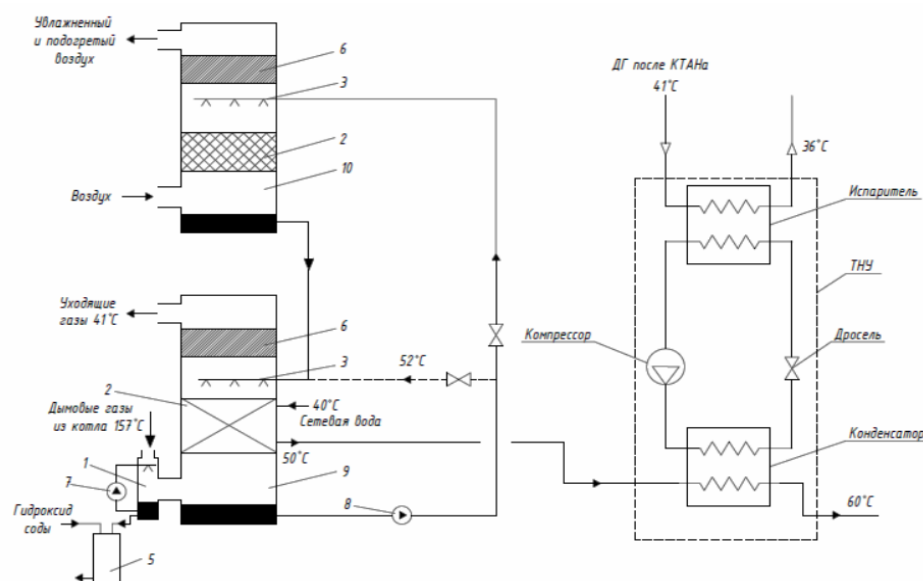


Рис. 4. Схема установки «конденсер, увлажнитель и тепловой насос»

Еще больший эффект позволяет получить схема «конденсер, увлажнитель и тепловой насос».

Эта схема обеспечивает высокую эффективность во всем диапазоне температур. Отличие этой схемы от предыдущих заключается в наличии теплового насоса, благодаря которому происходит дополнительное охлаждение обратной сетевой воды, что приводит к еще большему снижению температуры дымовых газов перед сбросом в атмосферу.

#### Литература

1. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках / А. А. Кудинов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000.
2. Влияние конденсационных утилизаторов на работу паровых и водогрейных газовых котлов / И. Л. Ионкин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 5. – С. 44–50. <https://doi.org/10.1134/S0040363615050033>
3. Использование конденсерной технологии для повышения эффективности использования топлива в котлах, сжигающих нефтепродукты / Б. Лунинг [и др.] // Наука и технологии трубопровод. трансп. нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 2. – С. 45–51.
4. Утилизация тепла дымовых газов на теплоисточниках г. Риги / А. Жигуре [и др.] // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 5. – С. 19–24.

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ СПИРТОВ

А. В. Конопляная

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

Направлена на изучение свойств смесевых топлив при добавлении спиртов. Изучено, что при добавлении к бензину этилового или изопропилового спиртов повышается температура выкипания смеси и соответственно снижается объем испарившегося бензина, что способствует снижению полноты сгорания топлива и увеличению интенсив-

ности износа двигателя. Экспериментально рассмотрены способы повышения октанового и цетанового чисел, а также представлены их сравнения в виде графиков. Подтверждена эффективность использования этанола в качестве экологической добавки к смесевым топливам.

**Ключевые слова:** бензин, дизельное топливо, октановое число, цетановое число.

Бензин – горючая смесь легких углеводородов с температурой кипения от +33 до 205 °С. Температура замерзания – около –60 °С в случае использования специальных присадок.

Состав бензина показан на рис. 1.

**Состав бензина**

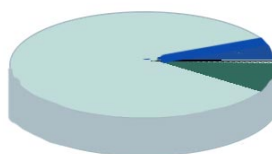


Рис. 1. Состав бензина:  
 ■ – оксид углерода; ■ – углеводы; ■ – оксид азота;  
 ■ – диоксиды серы; ■ – альдегиды; ■ – сажа

Виды бензина приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Виды бензина**

Нормаль	АИ-80
Регулятор	АИ-92
Премиум	АИ-95
Супер	АИ-95+
Экстра	АИ-98
ЭКТО	АИ-100

Важное качество бензина, на которое обязательно нужно обращать внимание во время заправки, – это **октановое число**. Октановое число определяет стойкость топлива к детонации.

Дизельное топливо – жидкий продукт, использующийся как топливо в дизельном двигателе внутреннего сгорания. Обычно под этим термином понимают топливо, получающееся из керосиново-газойлевых фракций прямой перегонки нефти.

Состав дизельного топлива представлен на рис. 2.

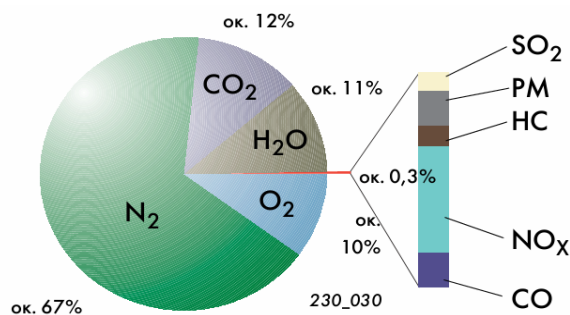


Рис. 2. Состав дизельного топлива

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  $\alpha$ -метилнафталином, которое в стандартных условиях имеет одинаковую воспламеняемость по сравнению с исследованным топливом.

#### Экспериментальная часть

1. Добавление изопропанола в бензин. В 100 мл бензина (АИ-92) мы добавляли по 5 мл изопропанола и получили данные по актановому исследовательскому числу (ОЧИ) и октановому моторному числу (ОЧМ), приведенные в табл. 2.

Таблица 2

#### Октановые исследовательское и моторное числа при добавлении изопропанола в бензин

Без добавления	ОЧИ	92,4
	ОЧМ	83,4
5мл (5 %)	ОЧИ	94,8
	ОЧМ	84,5
10мл (10 %)	ОЧИ	96,4
	ОЧМ	86,1
15мл (15 %)	ОЧИ	96,7
	ОЧМ	87,5
20мл (20 %)	ОЧИ	98,9
	ОЧМ	88,3
25мл (25 %)	ОЧИ	102
	ОЧМ	91,7
30мл (30 %)	ОЧИ	108
	ОЧМ	96,2

Октановые исследовательское и моторное числа при добавлении изопропанола в бензин показаны на рис. 3.

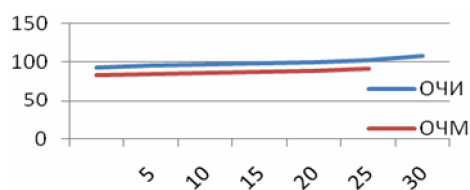


Рис. 3. Октановые исследовательское и моторное числа при добавлении изопропанола в бензин

2. Добавление изопропанола в дизельное топливо. В 100 мл дизельного топлива мы добавляли по 1 мл изопропанола и получили данные по ОЧН и ОЧМ, представленные в табл. 3.

Таблица 3

**Октановые исследовательское и моторное числа при добавлении изопропанола в дизельное топливо**

Без добавления	ЦК	
		48,7
1 мл	ЦК	48,7
2 мл	ЦК	49,1
3 мл	ЦК	48,6
4 мл	ЦК	48,8
5 мл	ЦК	49
6 мл	ЦК	53,4
7 мл	ЦК	50,9
8 мл	ЦК	51,5
9 мл	ЦК	52,1
10 мл	ЦК	52,7
11 мл	ЦК	52,9
12 мл	ЦК	49,7
13 мл	ЦК	50,8
14 мл	ЦК	51,7

Октановые исследовательское и моторное числа при добавлении изопропанола в дизельное топливо даны на рис. 4.

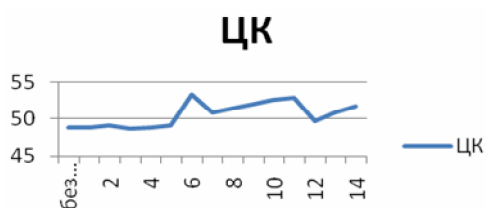


Рис. 4. Октановые исследовательское и моторное числа при добавлении изопропанола в дизельное топливо

3. Добавление этанола в бензин. В 100 мл бензина (АИ-92, АИ-95, АИ-98) мы добавляли по 1 мл этанола и получили данные по октановым исследовательскому и моторному числам, показанные в табл. 4.

Таблица 4

**Октановые исследовательское и моторное числа при добавлении этанола в бензин АИ-92, АИ-95 и АИ-98**

АИ-92	ОЧИ	ОЧМ	АИ-95	ОЧИ	ОЧМ	АИ-98	ОЧИ	ОЧМ
Без добавления	92,4	82,4	Без добавления	94,2	84,7	Без добавления	93,7	84,2
1 мл	94,2	84,3	1 мл	94,7	84,8	1 мл	94,6	84,7
2 мл	94,4	84,6	2 мл	95	84,9	2 мл	94,3	84,5
3 мл	95	85	3 мл	96	85,7	3 мл	94,4	84,7
4 мл	95,3	85,2	4 мл	96,2	85,9	4 мл	94,3	84,5
5 мл	96,2	85,9	5 мл	97	86,6	5 мл	95,2	85,9
6 мл	96,4	86,1	6 мл	98,2	87,5	6 мл	95,4	85,2
7 мл	97,1	86,7	7 мл	99,1	88,3	7 мл	97,1	86,6
8 мл	98,7	88	8 мл	100	89,1	8 мл	98,2	87,8
9 мл	99	88,2	9 мл	101	90,1	9 мл	100	89,2
10 мл	100	89,3	10 мл	102	91	10 мл	101	92,1
12 мл	102	90,8	12 мл	103	91,7	12 мл	104	92
14 мл	104	92,2	14 мл	105	93,3	14 мл	105	93,4
20 мл	106	94,4	20 мл	112	99,2	20 мл	108	95,5

Октановые исследовательское и моторное числа бензина при добавлении этанола представлены на рис. 5, 6.

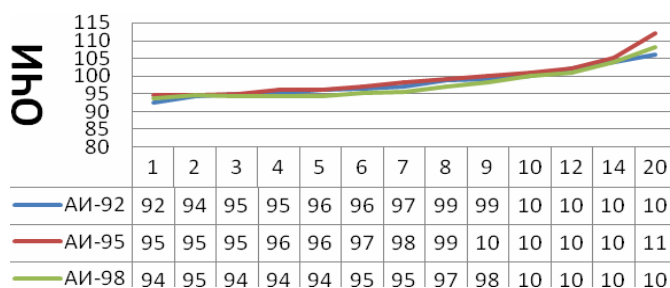


Рис. 5. Октановое исследовательское число бензина при добавлении этанола

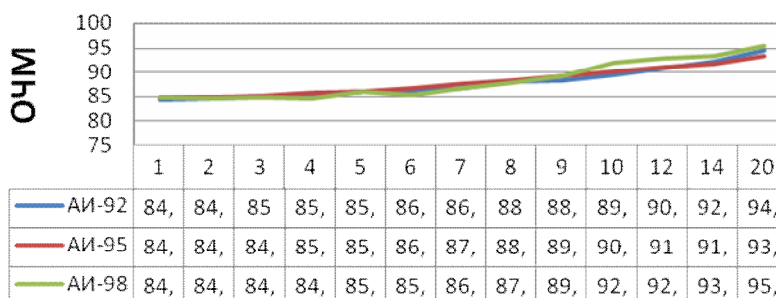


Рис. 6. Октановое моторное число бензина при добавлении этанола

В заключение можно сделать следующие выводы: в ходе лабораторного эксперимента мы исследовали способы повышения октанового числа бензина и цетанового числа дизельного топлива. Было обнаружено, что наивысшее октановое число бензина (АИ-92) – в смеси с 30 % изопропанола и наивысшее цетановое число дизельного топлива – в смеси с 6 % изопропанола. При исследовании бензина в смеси с 20 % этанола лучше всего себя показал бензин АИ-95 с октановым числом 112.

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПО РЕЖИМАМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ГАЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ ПЕЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**В. А. Панасик**

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

*На примере ОАО «Гродненский стеклозавод» рассмотрено построение моделей по режимам потребления газа для исследования износа футеровки печного оборудования для варки цветного стекла. Установлено, что на формирование удельного расхода газа влияет не цветность стекла, а техническое состояние печи, в большей степени – ее футеровка.*

**Ключевые слова:** режимы потребления газа, печное оборудование, варка стекла, моделирование, износ футеровки.

Производство листового стекла можно классифицировать как потребителя ТЭР со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией. Такое производство является большой технологической системой, состоящей из нескольких подсистем, тесно связанных между собой и оказывающих значительное влияние на энергопотребление системы в целом.

Исследования показали, что именно подсистема «технологическое оборудование» и такой фактор, как старение футеровки стекловаренных печей оказывает значительное влияние на годовую результирующую энергоэффективность (ЭЭФ) производства листового стекла. Для стекольного производства затраты энергоресурса, связанные с поддержанием работоспособного состояния печи технологической линии, формируют технологическую условно-постоянную составляющую расхода топлива (природный газ).

На примере ОАО «Гродненский стеклозавод» рассмотрим построение моделей по режимам потребления газа для исследования износа футеровки печного оборудования.

На предприятии эксплуатируется четыре печи, причем в двух из них производится варка цветного стекла. Чтобы исключить влияние цвета стекла на формирование технологической условно-постоянной расхода газа, выполнено разделение статистики по цветности стекла. Модели построены для всех четырех печей предприятия. Рассмотрим полученные результаты.

Печь № 2. В табл. 1 представлены результаты моделирования суточного расхода газа в зависимости от производительности печи № 2, которая специализируется на варке трех видов бутылочного стекла: бесцветное, зелено-коричневое и зеленое. Графическая интерпретация моделей представлена на рис. 1.

Таблица 1

**Результаты моделирования удельного расхода газа  
на варку бесцветного стекла печью № 2**

Год	Модель	$b_{\text{уд.,техн газ}}$ т у. т./т	Условно-постоянная составляющая газа, т у. т./т
2017	$B_{\text{уд.,газ}} = 0,0043 + 11,330/\Pi_{\text{сут}}$ , т у. т./т	0,0043	11,330
2018	$B_{\text{уд.,газ}} = 0,013 + 11,572/\Pi_{\text{сут}}$ , т у. т./т	0,013	11,572
2021	$B_{\text{уд.,газ}} = 0,15 + 9,58/\Pi_{\text{сут}}$ , т у. т./т	0,15	9,58

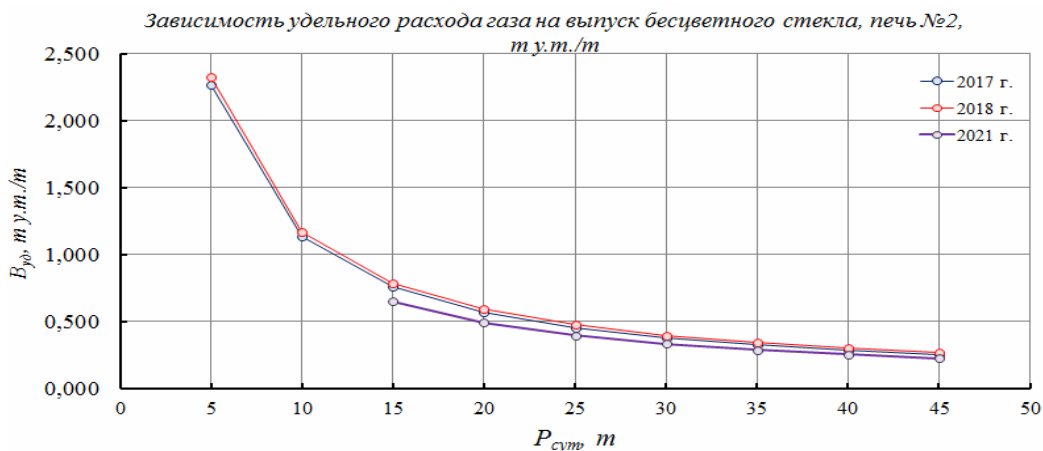


Рис. 1. Графическая интерпретация результатов моделирования  $B_{\text{уд., газ}} = F(\Pi_{\text{сут}})$ .  
Бесцветное стекло, печь № 2

Из анализа рис. 1 следует, что модели 2017 и 2018 гг. очень близки друг к другу. Наблюдается небольшое смещение в 2018 г. в сторону увеличения удельных расходов газа в области суточной производительности от 5 до 20 т в сутки, что обусловлено ростом условно-постоянной расхода газа с 11,330 т у. т. в сутки (2017 г.) до 11,572 т у. т. в сутки (2018 г.). В 2021 г. условно-постоянная расхода газа снизилась до 9,58 т у. т. после ремонта печи, что и повлияло на формирование самых низких удельных расходов газа на варку бесцветного стекла.

За рассматриваемый шестилетний период коричнево-зеленое стекло варилось с 2018 по 2022 г. В табл. 2 представлены результаты моделирования удельного расхода газа на производство коричнево-зеленого стекла. На рис. 2 даны графические изображения зависимостей  $B_{\text{уд., газ}} = F(\Pi_{\text{сут}})$ .

**Результаты моделирования удельного расхода газа  
на варку коричнево-зеленого стекла печью № 2**

Год	Модель	$W_{уд.,техн газ}$ т у. т./т	Условно- постоянная составляющая газа, т у. т./т
2018	$V_{уд., газ} = 0,016 + 11,612/P_{сут}$ , т у. т./т	0,016	11,612
2019	$V_{уд., газ} = 0,001 + 22,137/P_{сут}$ , т у. т./т	0,001	22,137
2020	$V_{уд., газ} = 0,029 + 11,774/P_{сут}$ , т у. т./т	0,029	11,774
2021	$V_{уд., газ} = 0,0004 + 10,204/P_{сут}$ , т у. т./т	0,0004	10,204
2022	$V_{уд., газ} = 0,0163 + 9,9848/P_{сут}$ , т у. т./т	0,0163	9,9848

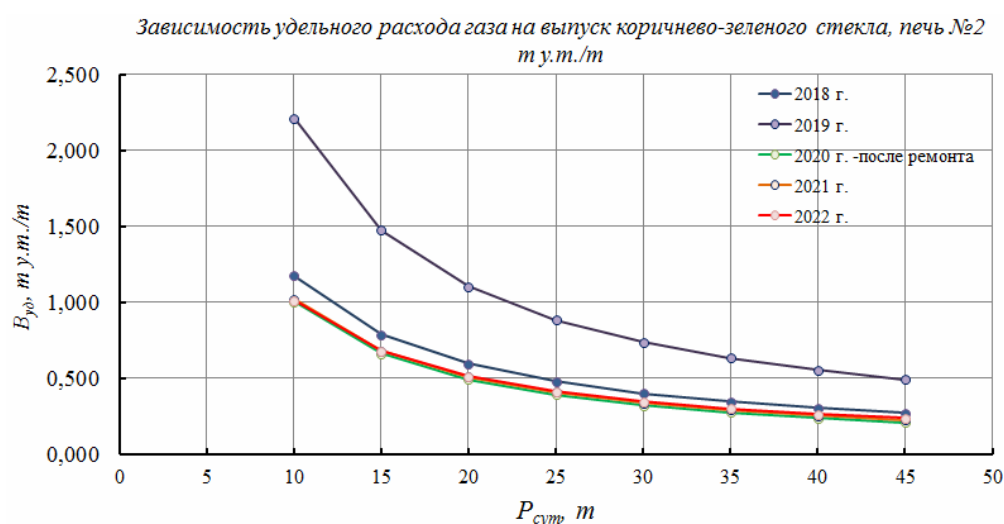


Рис. 2. Графическая интерпретация результатов моделирования  $V_{уд., газ} = F(P_{сут})$ .  
Коричнево-зеленое стекло, печь № 2

Из анализа рис. 2 следует, что модели 2020–2022 гг., очень близки друг к другу. Самое большое смещение моделей в сторону увеличения удельных расходов газа в области суточной производительности от 10 до 45 т в сутки установлено в 2019 г. перед остановкой печи на ремонт. В 2019 г. условно-постоянная расхода газа увеличилась практически в два раза с 11,612 т у. т. в сутки (2018 г.) до 22,137 т у. т. в сутки (2019 г.). В 2022 г. условно-постоянная расхода газа снизилась до 9,98 т у.т./т.

Зеленое стекло в печи № 2 варилось в 2017 и 2019 гг. В табл. 3 представлены модели зависимости удельного расхода газа от среднесуточной производительности печи, графическое представление моделей можно увидеть на рис. 3.



Таблица 3

**Результаты моделирования удельного расхода газа  
на варку зеленого стекла печью № 2**

Год	Модель	$w_{уд.,техн газ}$ т у. т./т	Условно- постоянная составляющая газа, т у.т./т
2017	$B_{уд., газ} = 0,004 + 11,13/P_{сут}$ , т у. т./т	0,004	11,13
2018	$B_{уд., газ} = 0,01 + 12,02/P_{сут}$ , т у. т./т	0,01	12,02

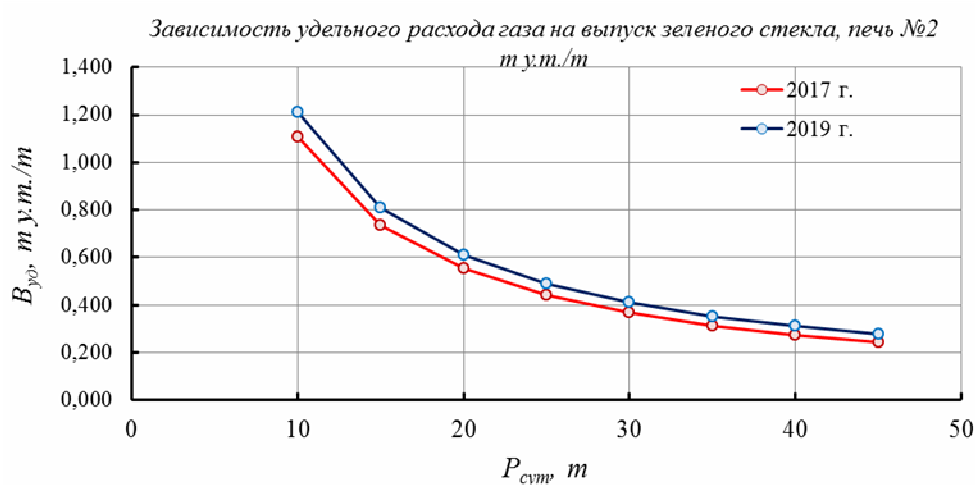


Рис. 3. Графическая интерпретация результатов моделирования  
 $V_{уд., газ} = F(P_{сут})$ . Зеленое стекло, печь № 2

На рис. 3 приведены результаты наложения моделей за 2017–2020 гг. по разному цвету стекла. Из анализов результатов моделирования, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что на формирование удельного расхода газа влияет не цветность стекла, а техническое состояние печи, в большей степени – ее футеровка. После ремонта печи в 2020 г. произошло существенное снижение условно-постоянной расхода газа, что привело к уменьшению его удельных расходов на всем диапазоне суточной производительности печи.

#### Литература

1. Методика оценки энергоэффективности промышленных производств с газовым печным оборудованием для обеспечения устойчивого функционирования и развития энергетического комплекса Республики Беларусь / Н. В. Грунтович. – 2022. – 64 с.

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕФТЕПОГРУЖНОГО КАБЕЛЯ НА УСТЬЕ СКВАЖИНЫ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

С. В. Ладорный

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

*Рассмотрено применение диагностики нефтепогружного кабеля методом частичных разрядов с помощью установки OWTS-28.*

**Ключевые слова:** OWTS-28, нефтепогружной кабель,  $L$ - $C$ -контур, затухающее напряжение, частичные разряды.

В процессе бурения нефтяных скважин и последующего подъема нефти на поверхность используется большое количество разнообразных электроинструментов высокой мощности (электробуры, погружные центробежные насосы и аналогичные им устройства), работающие непосредственно в скважине. Для подачи к ним напряжения питания необходимы специализированные кабели, учитывающие специфику типовой области эксплуатации.

Характерной особенностью кабелей, которые относятся к группе нефтепогружных, являются чрезвычайно жесткие условия эксплуатации, которые определяются сочетанием таких влияющих факторов, как высокая температура, воздействие на оболочку скважинной жидкости в виде смеси различных фракций нефти, воды, кислот, солей, сероводорода и прочих агрессивных составов, большое гидравлическое статическое давление, необходимость передачи переменных напряжений вплоть до 5000 В и частотой до 70 Гц.

Все это в комплексе приводит к коррозии изоляции кабеля и в следствии выхода его из строя. Применение диагностики кабеля методом частичных разрядов с помощью установки OWTS-28 позволит выявить повреждения кабеля на ранних стадиях, тем самым минимизировать потери на производстве.

В основе работы лежит метод, использующий затухающее осциллирующее напряжение. Даная 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 частичных разрядов (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. 1).

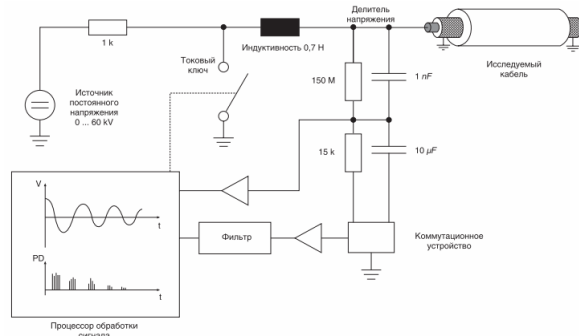
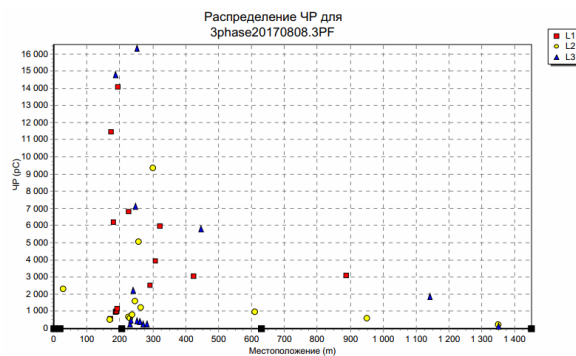
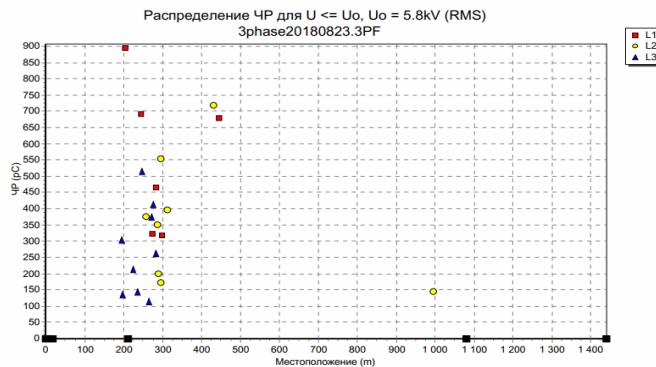


Рис. 1. Принципиальная схема системы OWTS M28

На рис. 2 показаны уровни частичных разрядов и их расположение на кабеле КППБКТ-120 3 × 25 длиной 1400 м, выполненные в 2022 и 2023 гг. Можно наблюдать, что уровень частичных разрядов в 2023 г. (максимальное значение – 900 пКл) значительно снизился по сравнению с уровнем в 2022 г. (максимальное значение – 16000 пКл) в диапазоне длин 200–300 м.



а)



б)

Рис. 3. Уровни частичных разрядов в кабеле КППБКТ-120 3 × 25 в 2022 г. (а) и в 2023 г. (б)

В заключение отметим, что при проведении таких исследований можно выделить проблемные участки и своевременно выполнить их замену, не выполняя замену 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.

## ПОКАЗАТЕЛИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ПРИ РАБОТЕ ИНВЕРТОРА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

**И. М. Яцков**

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

Научные руководители: О. Г. Широков, Т. В. Алфёрова

*Оценены значения показателей несинусоидальности напряжения и тока при работе инвертора фотоэлектрической установки. На основании зарегистрированных осциллограмм определено качество энергии при работе инвертора фотоэлектрической установки.*

**Ключевые слова:** инвертор фотоэлектрической установки, качество электроэнергии.

В настоящее время все больше применяются фотоэлектрические установки, служащие для выработки электрической энергии. Фотоэлектрические панели, входящие в состав установки, преобразуют солнечную энергию в электрическую, а инвертор преобразует постоянный ток от солнечных батарей в переменный. При этом инвертор фотоэлектрической установки является источником высших гармоник и интергармоник. Общие уровни показателей несинусоидальности напряжения и тока при работе фотоэлектрических станций освещены в научно-технических материалах, однако в сопроводительной документации конкретных фотоэлектрических установок приводятся не всегда. В таких условиях актуальными являются работы, позволяющие определить значение показателей несинусоидальности напряжения и тока при работе инвертора конкретной фотоэлектрической установки.

Несинусоидальность напряжения и тока исследовались с помощью лабораторной установки, собранной по схеме, представленной на рис. 1.

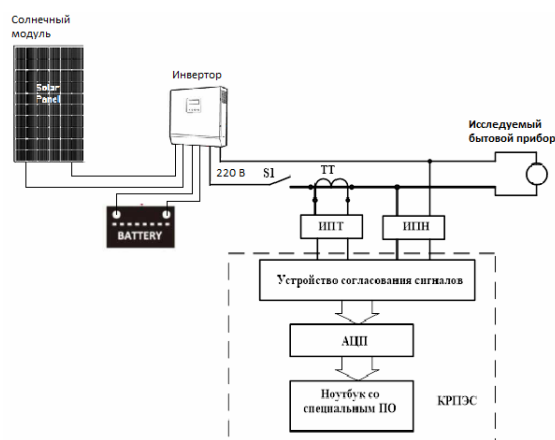


Рис. 1. Схема исследования пусковых характеристик современных бытовых приборов

Регистрация значений напряжений и токов инвертора производилась с помощью комплекса регистрации параметров электрических сигналов (КРПЭС), по двум измерительным каналам с частотой опроса 5 кГц на каждый канал.

Схема исследования пусковых характеристик бытовых современных приборов, представленная на рис. 1, содержит: ТТ – измерительный трансформатор тока; ИПТ – измерительный преобразователь тока; ИПН – измерительный преобразователь напряжения; КРПЭС – комплекс регистрации параметров электрических сигналов, содержащий: устройство согласования сигналов, АЦП – аналого-цифровой преобразователь и персональный компьютер со специальным программным обеспечением.

Объектами исследования для изучения качественных характеристик являлись две лампы: светодиодная и накаливания. В виду ограниченного доступа к установке не были измерены и учтены более мощные приборы и двигатели.

Осциллограммы напряжения и тока при включении светодиодной лампы, лампы накаливания приведены на рис. 2–4 соответственно.

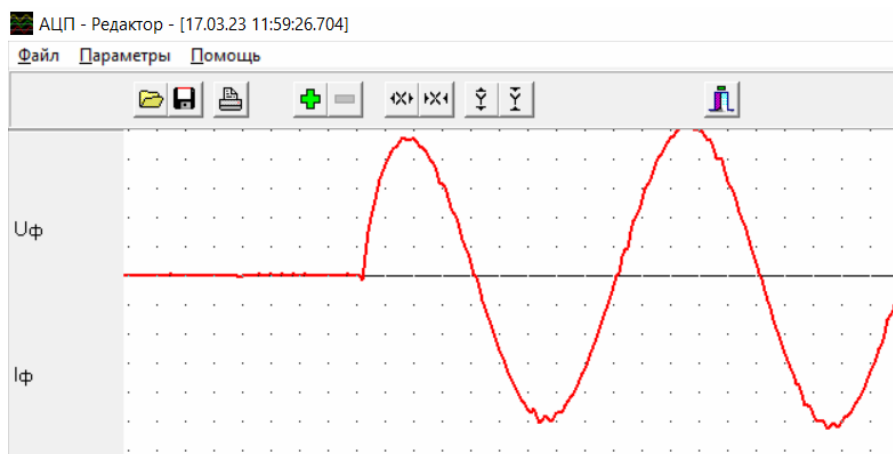


Рис. 2. Осциллограмма напряжения при включении инвертора

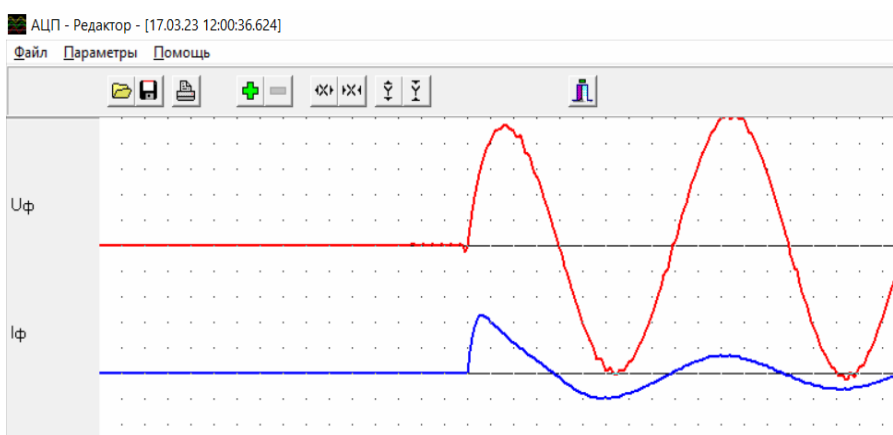


Рис. 3. Осциллограмма напряжения и тока при включении инвертора на нагрузку (лампа накаливания – 95 Вт)

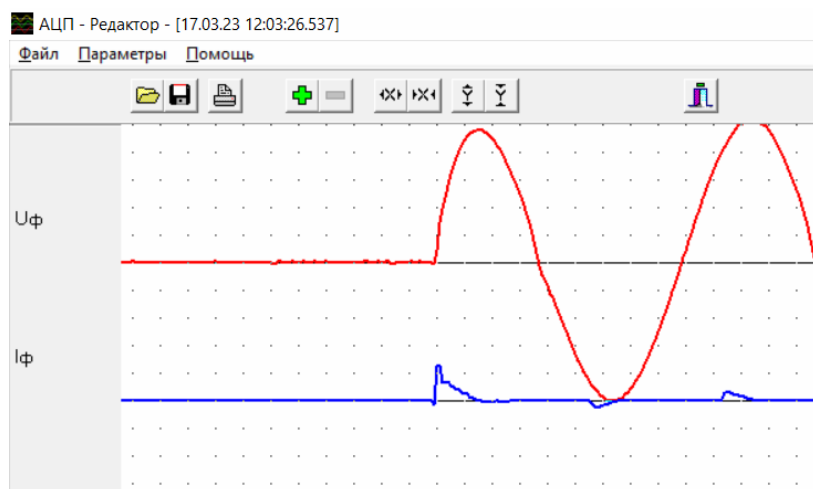


Рис. 4. Осциллограмма напряжения и тока при включении инвертора на нагрузку (светодиодная лампа – 7 Вт)

Из сканов осциллографа делаем вывод, что инвертор фотоэлектрической установки имеет видимые помехи, которые, в зависимости от чувствительности приборов к изменению качества электроэнергии могут повлиять на исправную работу электроприемников. Исходя из этого, следует при монтаже фотоэлектрических установок либо покупать более дорогостоящий инвертор, либо дополнительно использовать фильтр напряжения.

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС «ОФИС ИНЖЕНЕРА» КАК СПОСОБ СТРУКТУРИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

К. Е. Коршунов

*Учреждение образования Гомельский Государственный технический университет имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Научный руководитель А. А. Капанский

*Для формирования периодических отчётов необходимо собрать данные за период и провести их анализ. Рациональности этого процесса можно добиться при помощи программных комплексов, которые будут интегрированы на промышленные предприятия. Специально для этого были разработаны АС «Статистика» и ИС «Оборудование».*

**Ключевые слова:** инновационная экономика, цифровизация, энергоэффективность, программный комплекс.

*Аналитическая система «Статистика» как инструмент организации учета энергопотребления. Повышение эффективности работоспособности промышленных предприятий не представляется возможным без внедрения информационных систем на базе программных комплексов. Совершенствование нормативно-правовой базы, переход на электронный документооборот, расширение спектра затрагиваемых вопросов, учитывающих финансовые, операционные, организационные и технологические изменения предполагают постепенный пересмотр традиционных способов взаимодействия структурных подразделений. Организационные преобразования процессов управления промышленных предприятий в сфере решения технических задач требуют реализации и внедрения системного подхода, объединяющего в единый ме-*

ханизм работу различных структурных подразделений. Формирование единой структуры взаимодействия отдельных элементов системы является длительным и сложным процессом. Очевидно, что такой процесс, предусматривающий модернизацию инженерной инфраструктуры на предприятиях путем перехода к формированию комплекса «Новая индустрия 2040», заложенного в базовых понятиях Стратегии «Наука и технологии 2018–2040», невозможен без использования программных комплексов, идентифицирующих отдельные предприятия, организации или их структуры в виде некоторого моделируемого класса.

Для больших предприятий, филиалы которых разбросаны территориально драг от друга, процесс составления сводной отчетности должен учитывать их юридическую принадлежность, а также принятую систему взаимных расчетов. При формировании отчетов по всей структуре предприятия и обработке большого объема данных ответственным специалистам легко допустить ошибку при проведении расчетов или при группировке многочисленных пунктов таблиц и ячеек. Для рационализации реализации учета энергопотребления на предприятиях предложена модель информационного обмена (рис. 1).



Рис. 1. Принципиальная схема информационного обмена

Одним из важнейших элементов приведенной на рис. 1 структуры является разрабатываемая аналитическая система (АС) «Статистика», служащая для целого комплекса актуальных задач, позволяющих повысить уровень энергоуправления, а именно:

- заполнение и проверка статистических, ведомственных и отраслевых отчетов;
- централизованный сбор и контроль данных (отчетов);
- автоматизированное формирование сводной отчетности предприятия;
- ведение учета потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) по направлениям (на производство продукции, выполняемые работы/услуги);
- ведение журнала теплотворных способностей по видам потребляемого топлива;

- ежемесячный учет выработки/генерации тепловой и электрической энергии;
- сверка балансов отпуска/поставок ТЭР.

В аналитической системе «Статистика» реализуется общий принцип проверки достоверности данных. Пользователи выбирают отчетный период, вводят данные и подписывают их внутренней подписью системы. Далее данные проверяются «администраторами» АС. Если не были выявлены ошибки, данные считаются действительными, в противном случае производится «разблокировка данных» и отчет корректируется пользователями (рис. 2).

Наименование показателя	Код строки	С начала года					
		котельно-печное топливо, т			усл. топл	тепловая энергия, Гкал	электрическая энергия, тыс.кВт
		всего	из него местные виды топлива и отходы	из них отходы собственного производства			
A	B	1	2	3	4	5	
Истрасходовано, всего	110	1 509.5	1 503.4	0,6	37 736,7	86	
из него на производственные нужды	111	1 487,9	1 487,9	0	37 589,6	86	
на производство тепловой и электрической энергии	112	1 420,2	1 420,2	0	X		
потери в магистральных сетях	113	X	X	X	0	0	
Отпущено другим организациям	120	X	X	X	8 209,5	3 671	
Отпущено (продано) населению	130	143,3	143,3	0	0	0	
Произведено собственными энергоисточниками (тепловая энергия отпущенная; электрическая энергия выработанная)	140	X	X	X	9 115,6	1	
из них за счет использования тепловых вторичных энергетических ресурсов (далее – ВЭР), ВЭР избыточного давления	141	X	X	X	0	0	
энергии воды, ветра, солнца, геотермальных источников	142	X	X	X	4,9		

Рис. 2. Статистический отчет 12-ТЭК

*Информационная система «Оборудование». Создание модели промышленного предприятия.* Разработанная ИС «Оборудование» реализует приведенную модель, позволяет организовать информационное обеспечение повседневных функций инженеров предприятия и автоматизировать обмен оперативными данными между подразделениями и отделами технических служб предприятия.

Приложения системы используют прямые подключения к базам данных (БД) Microsoft SQL Server 2008–2019, размещенных на серверах предприятия или в сети Интернет. Архитектура приложений построена таким образом, что прямой обмен данными с БД может быть замещен на транспортировку через web-сервисы.

Система позволяет осуществлять сбор информации в центральной БД несколькими способами: подключением рабочих мест к корпоративной сети, через сеть Интернет, передачей данных в виде файлов по электронной почте или на мобильных носителях.

Учет в ИС «Оборудование» реализован в виде иерархической модели предприятия, на основе гибкой классификации объектов учета (рис. 3). На базе такой модели достигается автоматизация нескольких процессов, присущих большинству инженерно-технических служб:

- ведение технического учета оборудования;



- связь объектов учета с экономическими и бухгалтерскими данными основных средств предприятия;
- автоматизация разработки и мониторинга исполнения планов-графиков планово-предупредительных, капитальных ремонтов;
- ведение журнала обслуживания;
- учет случаев аварийных ремонтов;
- работа с данными о поставщиках оборудования и закупками.

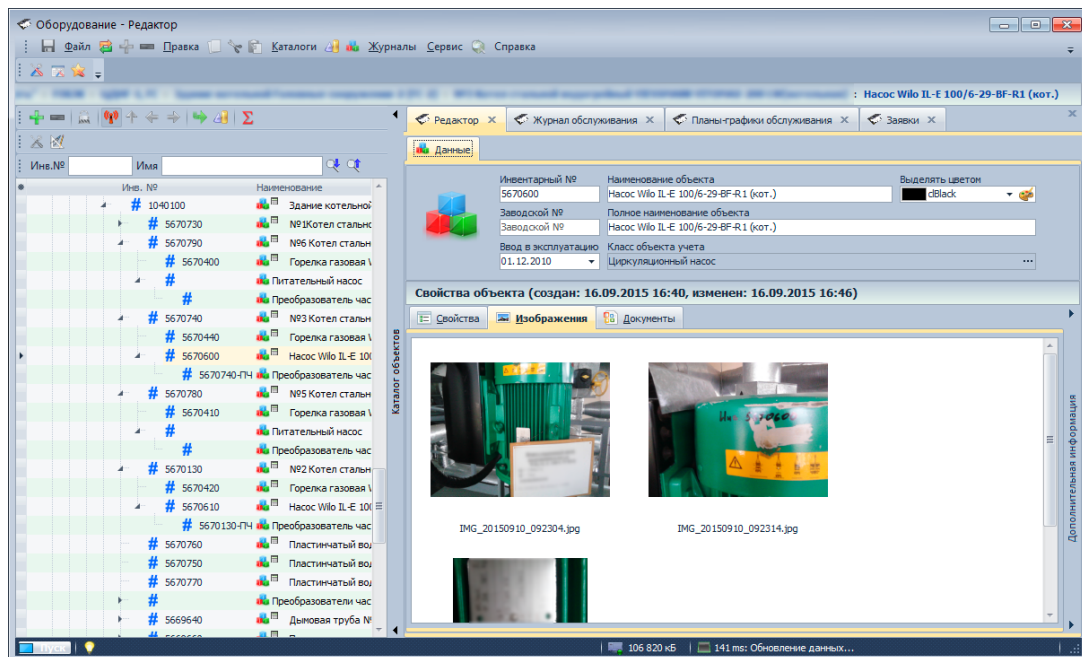


Рис. 3. Редактор объекта учета ИС «Оборудование»

Таким образом, применение программных комплексов для автоматизации прикладных задач инженеров является очень важной частью развития энергетики по всему миру. Исходя из этого, был разработан программно-аппаратный комплекс «Офис инженера», включающий в себя программные комплексы ИС «Оборудование» и АС «Статистика». Испытания были проведены на базе ПО «Белоруснефть».

#### Литература

1. Коршунов, Е. А. Программные средства для информатизации вспомогательных производственных процессов инженерно-технических служб предприятия / Е. А. Коршунов, А. С. Фиков, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2020. – № 4. – С. 18–21.
2. Патапенко, Д. Н. Автоматизация сбора и контроля данных периодической отчетности с помощью специализированного программного обеспечения / Д. Н. Патапенко, Е. А. Коршунов, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2020. – № 9. – С. 30–32.
3. Белоусова Д. А. Цифровые технологии в управлении предприятием // Наука, образование и культура. – 2020. – № 4 (48). – С. 5–8.
4. О Государственной программе информатизации Республики Беларусь на 2003-2005 годы : Постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 27 дек. 2002 г., № 1819 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <http://pravo.newsby.org/belarus/postanov-sm9/sovnm109.htm>. – Дата доступа: 04.02.2018.
5. Тойбаев, Р. Процессный подход как необходимое условие для цифровой трансформации предприятий / Р. Тойбаев // Вестн. ун-та «Кайнар». – 2019. – №. 3. – С. 99–102.

6. О развитии цифровых инноваций в машиностроении в условиях формирования промышленности 4.0 / Б. М. Позднеев [и др.] // Вестн. МГТУ Станкин. – 2019. – № 2. – С. 23–28.
7. Назаров, И. К. Модель информационной архитектуры процессов взаимодействия на уровне виртуального предприятия / И. К. Назаров, А. О. Коломыцева, М. А. Медведева // Инструменты проектного управления и анализа данных в системах поддержки принятия решений. – 2020. – С. 160–165.
8. Брусакова, И. А. Проблемы внедрения технологических инноваций на цифровом предприятии / И. А. Брусакова // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, 2018 г. / Санкт-Петерб. гос. электротехн. ун-т ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). – СПб., 2018. – Т. 2. – С. 359–360.
9. Кушнир, К. А. Трансформация промышленных предприятий оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации в условиях цифровой экономики / К. А. Кушнир, Е. В. Кобылина // Экономика и менеджмент инновац. технологий. – 2018. – № 12. – С. 13.
10. Грунтович, Н. В. Экспертные системы управления энергоэффективностью и энергетической безопасностью / Н. В. Грунтович // Энергоэффективность. – 2014. – № 4. – С. 26–30.
11. Optimize the cost of paying for electricity in the water supply system by using accumulating tanks / A. Kapanski [et al.] // In E3S Web of Conferences, 2020 / EDP Sciences. – Les Ulis, 2020. – Vol. 178. – P. 01065.
12. Грачева, Е. И. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутривзаводского электроснабжения / Е. И. Грачева, А. Н. Горлов, З. М. Шакурова // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – № 22 (2). – С. 65–74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>
13. Грачева, Е. И. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей / Е. И. Грачева, А. Р. Сафин, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 48–52.
14. Fedorov, O. V. Expedient forecasting of power consumption / O. V. Fedorov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, May 16–19, Chelyabinsk, Russia, 2017 / IEEE. – Chelyabinsk, 2017. – С. 1–4.

## ИНОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

К. Е. Коршунов

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

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

*Представлены основные методы борьбы с кибератаками, выявлены основные проблемы защиты информационной среды промышленных предприятий, определены главные проблемы в кибербезопасности.*

**Ключевые слова:** информационные технологии, кибербезопасность, пентестинг, защита данных, информационная безопасность.

Одними из информационных технологий в области цифровизации электроэнергетики (цифровая энергетика) являются технологии, обеспечивающие кибербезопасность. Цель исследования – привлечение внимания к развитию кибербезопасности в энергетике и возможные методы борьбы с нежелательной утечкой данных.

Кибербезопасность – это реализация мер по защите сетей и программных приложений от цифровых атак. Такие атаки обычно направлены на получение доступа к конфиденциальной информации, ее изменение и уничтожение, на вымогательство у пользователей денег или на нарушение нормальной работы компании. Технологии кибербезопасности являются важнейшим элементом, предоставляющим организациям и отдельным пользователям инструменты, необходимые для защиты от кибератак. Основные компоненты, которые необходимо защитить, – это оконечные устрой-

ства, например, компьютеры, интеллектуальные устройства и маршрутизаторы; сети и облачная среда.

К наиболее распространенным технологиям, используемым для защиты перечисленных компонентов, относятся межсетевые экраны нового поколения, фильтрация DNS, защита от вредоносного ПО, антивирусное ПО и решение для защиты электронной почты. В этом направлении можно выделить несколько основных категорий [1, 4]:

- безопасность сетей – действия по защите компьютерных сетей от различных угроз, например, целевых атак или вредоносных программ;

- безопасность приложений – защита устройств от угроз, которые преступники могут спрятать в программах. Зараженное приложение может открыть злоумышленнику доступ к данным, которые оно должно защищать. Безопасность приложения обеспечивается еще на стадии разработки, задолго до его появления в открытых источниках;

- безопасность информации – обеспечение целостности и приватности данных как во время хранения, так и при передаче;

- операционная безопасность – обращение с информационными активами и их защита. К этой категории относится, например, управление разрешениями для доступа к сети или правилами, которые определяют, где и каким образом данные могут храниться и передаваться;

- аварийное восстановление и непрерывность бизнеса – реагирование на инцидент безопасности (действия злоумышленников) и любое другое событие, которое может нарушить работу систем или привести к потере данных. Аварийное восстановление – набор правил, описывающих то, как организация будет бороться с последствиями атаки и восстанавливать рабочие процессы. Непрерывность бизнеса – план действий на случай, если организация теряет доступ к определенным ресурсам из-за атаки злоумышленников;

- повышение осведомленности – обучение пользователей. Это направление помогает снизить влияние самого непредсказуемого фактора в области кибербезопасности – человеческого. Даже самая защищенная система может подвергнуться атаке из-за чьей-то ошибки или незнания. Поэтому каждая организация должна проводить тренинги для сотрудников и рассказывать им о главных правилах: например, что не нужно открывать подозрительные вложения в электронной почте или подключать сомнительные USB-устройства.

Доступ злоумышленников к сети промышленного предприятия подразумевает не только утечку данных, но и открытый доступ к микропроцессорной технике, вмешательство в работу которой может иметь серьезные последствия.

Пентестинг включает в себя серию тестов на проникновение, основанных на атаках ИТ-систем для выявления их слабых мест или уязвимостей. Они предназначены для классификации и определения масштабов брешей безопасности, а также их степени влияния. В результате таких тестов предприятие можете получить достаточно четкое представление об опасностях для системы и эффективности вашей защиты [2].

Пентесты помогают определить вероятность успеха атаки, а также выявить дыры безопасности, которые являются следствием уязвимостей с низким уровнем риска, но использующихся определенным образом. Они также позволяют выявлять другие уязвимости, которые невозможно обнаружить с помощью автоматизированного сетевого программного обеспечения или специальных программ, а также могут использоваться для оценки того, способны ли менеджеры по безопасности успешно обнаруживать атаки и эффективно реагировать на них.

Существует несколько типов пентестов, классифицированных в соответствии с типом информации о системе. В whitebox-пентестах известно все о системе, приложениях или архитектуре, а в blackbox-пентестах нет никакой информации о цели. Такой тип классификации – это практическая необходимость, так как условия тестирования основываются на критериях предприятия.

Лаборатория Касперского – международная компания, специализирующаяся на разработке систем защиты от компьютерных вирусов, спама, хакерских атак и прочих киберугроз [3].

Для реализации безопасности предлагается решение, состоящее из двух компонентов:

- KICS for Nodes – компонент защиты конечных узлов технологической локальной вычислительной сетью с загружаемым программным обеспечением;

- KICS for Networks – компонент мониторинга и регистрации событий сетевого обмена с возможностью глубокого анализа прикладных протоколов МЭК 60870-5-104, МЭК 61850 и др.;

- KICS for Nodes – специализированный продукт для промышленных систем. Он представляет собой программное обеспечение, созданное для защиты серверов автоматизированной системы управления технологически процессом, а также операторских панелей и рабочих станций инженеров и операторов под управлением ОС Windows.

Ключевые функции KICS for Nodes:

- белые списки приложений – позволяют запретить запуск всех приложений, помимо явно разрешенных. Этот компонент можно использовать в тестовом режиме, чтобы упростить установку и снизить количество ошибок на этапе внедрения;

- контроль устройств – позволяет администраторам определять, какие устройства разрешено подключать к защищаемым промышленным системам. Технология предотвращает возможность несанкционированного доступа и поддерживает применение масок для удобства управления и оперирования списком устройств;

- контроль беспроводных сетей – позволяет отслеживать любые попытки подключения к неавторизованным сетям Wi-Fi;

- средства обнаружения вредоносных программ – сочетают сигнатурные и эвристические методы защиты и ограждают рабочие станции Windows от известных, неизвестных и сложных угроз. Технология «Анти-Криптор» защищает от попыток атак программ-шифровальщиков;

- межсетевой экран – ограничивает возможность подключиться к узлам промышленной сети;

- проверка целостности ПЛК – обеспечивает дополнительный уровень контроля конфигурации контроллера с помощью периодических проверок изменений в проектах.

KICS for Networks является специализированным программно-аппаратным средством мониторинга сетевого обмена между узлами в промышленной сети систем защиты и управления, которое позволяет определять и регистрировать аномальные и важные с точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации оборудования электроустановок и бесперебойного электроснабжения потребителей информационные события. Об обнаруженных отклонениях KICS for Networks оповещает обслуживающий персонал.

Представим список основных функциональных возможностей решения:

1. Мониторинг целостности технологической ЛВС:

- режим самообучения, позволяющий выявить и зарегистрировать все существующие узлы ЛВС и коммуникации между ними, с целью последующего использования этой модели сети в качестве опорной и для отслеживания изменений;

- обнаружение и регистрация подключения новых сетевых устройств к контролируемым сегментам технологической сети;
- обнаружение и регистрация новых сетевых коммуникаций между узлами по признакам: адрес узла-отправителя, адрес узла-получателя, протокол обмена, порт, количество допустимых соединений;
- обнаружение и регистрация сетевых подключений к ИЭУ с использованием прикладных технологических протоколов, используемых для конфигурирования;
- 2. Анализ прикладных технологических протоколов:
  - Разбор, анализ и регистрация важных сообщений прикладных технологических протоколов, в соответствии с конфигурацией и с учетом их возможного влияния на исполнение технологического процесса, а именно:
    - обнаружение команд телеуправления оборудованием электроустановки по промышленным сетевым протоколам (МЭК 61850, МЭК 60870-5-104);
    - обнаружение команд телеуправления параметрами функционирования системы защиты и управления (например, переключения группы уставок) по промышленным сетевым протоколам (МЭК 61850, МЭК 60870-5-104);
    - обнаружение фактов управления и параметрирования ИЭУ сервисным ПО через контролируемый сегмент сети – как при использовании стандартных, так и специализированных протоколов;
    - мониторинг сообщений телеизмерений и телесигнализации.
- 3. Хранение информации о событиях:
  - система KICS for Networks обеспечивает хранение выявленных событий во внутренней защищенной базе;
  - глубина хранения данных о событиях определяется сроком хранения и верхней границей размера архива;
- 4. Интеграция с внешними системами и уведомление пользователей:
  - KICS for Networks можно интегрировать как один из компонентов в систему управления событиями безопасности (Security information and event management, SIEM) более высокого уровня, – например, HP ArcSight, либо в другую внешнюю систему, поддерживающую стандарт отправки и регистрации сообщений о событиях Syslog;
  - уведомление ответственных лиц может быть дополнительно организовано при помощи сообщений электронной почты и SMS.

Таким образом, были выведены основные направления кибербезопасности в энергетике. Кибербезопасность должна стать неотъемлемой частью в защите данных промышленных предприятий. Также для сотрудников, работающих в структурах с использованием облачных хранилищ необходимо проводить краткие тренинги по кибербезопасности с целью исключения человеческого фактора.

#### Л и т е р а т у р а

1. Безкорвайный, М. М. Кибербезопасность подходы к определению понятия / М. М. Безкорвайный, А. Л. Татузов // *Вопр. кибербезопасности*. – 2014. – № 1 (2). – С. 22–27.
2. An overview of penetration testing / A. G. Bacudio [et al.] // *International Journal of Network Security & Its Applications*. – 2011. – Vol. 3, N 6. – P. 19.
3. Касперский, Е. В. В заложниках у автоматики: как защитить промышленность от кибератак / Е. В. Касперский // *Безопасность информ. технологий*. – 2016. – Т. 23, № 3. – С. 7–10.
4. Ерохин, П. М. Инновации и инновационные технологии в электроснабжении / П. М. Ерохин, Ю. А. Куликов // *Систем. оператор Единой энергосистемы*.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В. М. Шакин

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

Научный руководитель А. О. Добродей

*Рассмотрен вариант моделирования перенапряжений в электрических сетях с использованием программного комплекса NI Multisim 14.0. Получены осциллограммы напряжений и рассчитаны кратности перенапряжений.*

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

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

Цель работы – моделирование перенапряжений в электрических сетях и оценка их уровня.

Перенапряжение – всякое превышение мгновенным значением напряжения амплитуды наибольшего рабочего напряжения [1]. Основные характеристики перенапряжения: максимальное значение; кратность перенапряжения – отношение максимального значения напряжения к амплитуде наибольшего рабочего напряжения

$$K = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}U_{\text{нр}}}$$
; время нарастания; длительность; число импульсов в перенапряжении;

форма кривой перенапряжения; широта охвата сети; повторяемость перенапряжения.

Перенапряжения, возникающие в электрических сетях, являются одним из факторов, влияющих на надежность электроустановок. Несмотря на кратковременность воздействия, перенапряжения характеризуются высокой кратностью по отношению к длительному рабочему напряжению и воздействием на все электрически связанные элементы системы независимо от места возникновения. Поэтому исследование перенапряжений и разработка мероприятий и устройств защиты от перенапряжений сетей и электрооборудования – актуальная проблема для повышения надежности их работы и обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей.

Для исследования перенапряжений в электрических сетях необходимо провести ряд экспериментов, чтобы получить данные о перенапряжениях, которые могут возникнуть в сети, а также опробовать различные методы предупреждения и подавления возникающих перенапряжений. Поставленную задачу предполагается решать при помощи моделирования переходного процесса в электрической сети при замыкании одной из фаз на землю с использованием программного комплекса NI Multisim 14.0, позволяющего производить моделирование, тестирование, разработку и отладку электрических цепей и схем [2].

Для исследования перенапряжений была выбрана одна секция шин РУ-6 кВ подстанции ПС-1 РДУП «Белоруснефть-Промсервис», представленная на рис. 1.

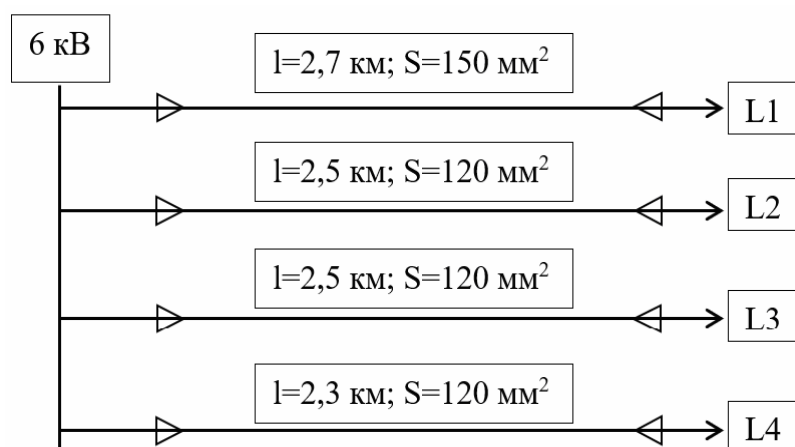


Рис. 1. Секция шин РУ-6 кВ подстанции ПС-1  
РДУП «Белоруснефть-Промсервис».

Суть эксперимента заключается в исследовании кратности перенапряжений при однофазном замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью. Для анализа перенапряжений была составлена схема замещения, показанная на рис. 2.

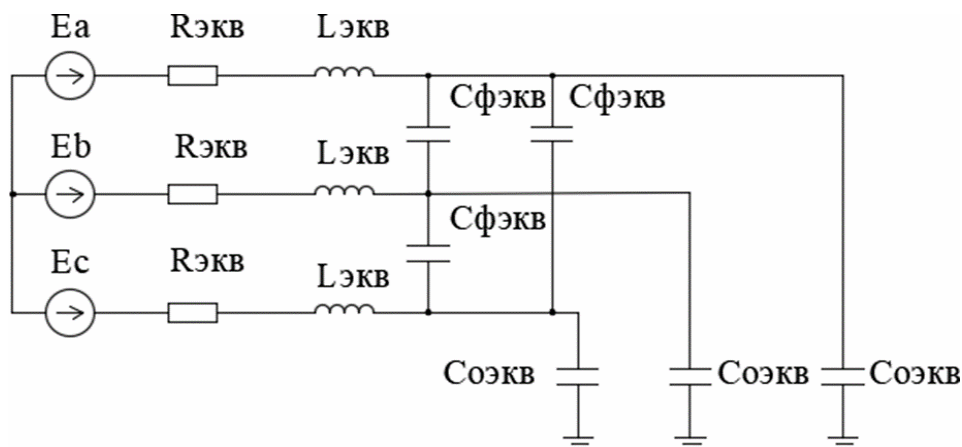


Рис. 2. Схема замещения сети с изолированной нейтралью

Перед началом моделирования были рассчитаны параметры схемы замещения:  $E_a$ ,  $E_b$ ,  $E_c$  – фазные напряжения источника питания;  $L$  – индуктивность линии;  $R$  – активные сопротивления линии;  $C_\phi$  – емкость между фазами;  $C_o$  – емкость фаз относительно земли.

С помощью программного комплекса NI Multisim 14.0 произведено моделирование перенапряжения в электрической сети с изолированной нейтралью, представленной на рис. 2. Для этого в программе составлена модель с параметрами кабельной линии по результатам расчета. Окно программы со схемой замещения исследуемой сети при замыкании фазы С на землю дано на рис. 3.

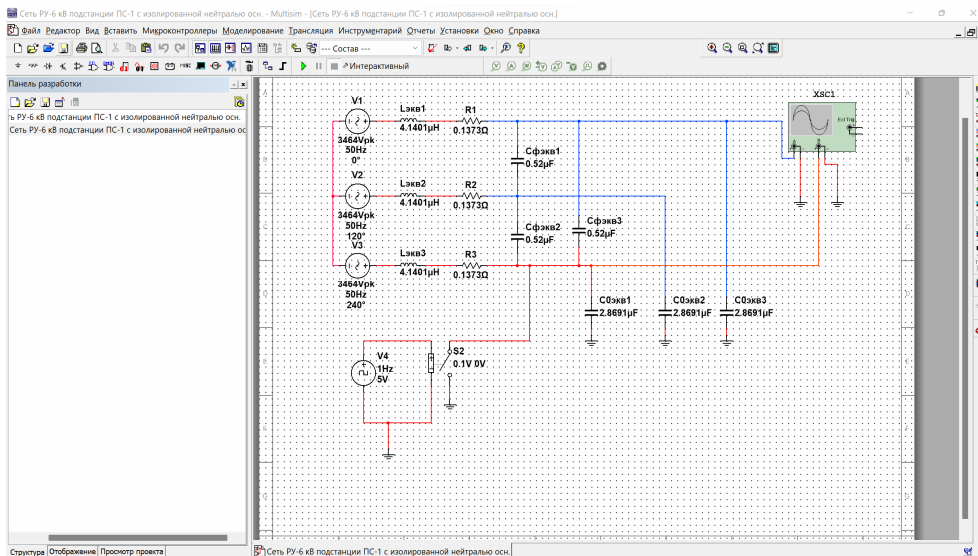


Рис. 3. Схема замещения исследуемой сети при замыкании фазы *C* на землю в программе NI Multisim 14.0.

Для сети представленной на рис. 3 произведено осциллографирование переходного процесса при замыкании фазы *C* на землю. Для этого в схему добавлен генератор импульсов со скважностью 50 % и ключ, который через равные промежутки времени будет закрываться и замыкать фазу *C* за землю. Чтобы получить график переходного процесса, подключим к схеме осциллограф. Красным цветом отображается поврежденная фаза, синим – неповрежденная (рис. 4).

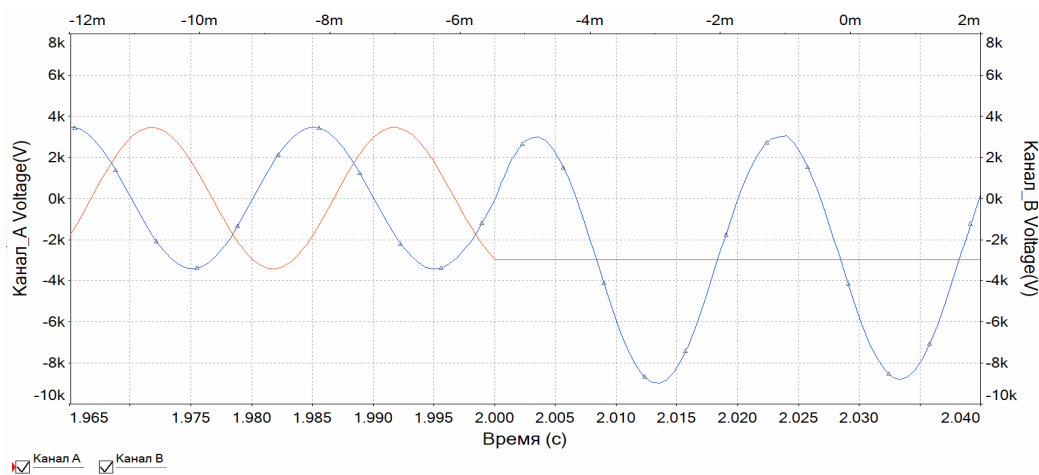


Рис. 4. Осциллограмма переходного процесса при замыкании фазы *C* на землю

По осциллограмме переходного процесса (рис. 4) при замыкании фазы *C* на землю в сети с изолированной нейтралью зафиксирована амплитуда максимального перенапряжения  $U_{\max} = 8,98$  кВ при амплитуде наибольшего рабочего напряжения  $U_{н.р} = 3,46$  кВ. Кратность перенапряжения составит  $K = \frac{8,98}{3,46} = 2,59$ ; длительность перенапряжения – 0,427 с.



Аналогично проведено моделирование перенапряжений для данной электрической сети при различных способах заземления нейтрали; результаты представлены в таблице.

**Значения кратности и длительности протекания перенапряжений в электрической сети при различных способах заземления нейтрали**

Нейтраль сети	Кратность перенапряжения, о. е.	Длительность перенапряжения, с
Изолированная	2,59	0,427
Заземленная через низкоомный резистор	1,998	0,366
Заземленная через высокоомный резистор	2,09	0,354

В результате моделирования переходных процессов, возникающих в сети с изолированной нейтралью при замыкании одной из фаз на землю были получены осциллограммы напряжений и рассчитаны кратности перенапряжений. Наибольшие кратности перенапряжений наблюдались в сети с изолированной нейтралью  $K = 2,59$ . Для снижения кратности перенапряжения было предложено резистивное заземление нейтрали сети. При применении низкоомного резистивного заземления нейтрали кратность перенапряжения уменьшилась и составила  $K = 1,998$ . Уменьшилась также длительность протекания перенапряжения с 0,427 до 0,366 с.

**Литература**

1. Закарюкин, В. П. Техника высоких напряжений: Конспект лекций / В. П. Закарюкин. – Иркутск : ИрГУПС, 2005. – 137 с.
2. Multisim/National Instruments Corporation : management. – Delaware, Texas, 2007. – 491 с.

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

**А. А. Белаш**

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

Научные руководители: С. Г. Жуковец, Т. В. Алфёрова

*Рассмотрены преимущества цифровизации мониторинга воздушных линий электропередач при помощи внедрения использования беспилотных летательных аппаратов в энергосистему страны.*

**Ключевые слова:** дроны, беспилотные летательные аппараты, цифровизация мониторинга.

Транспортировка электроэнергии является одной из важнейших задач энергетики. Линии электропередач (ЛЭП) лежат в основе электроэнергетического комплекса любой страны. По ним передается электроэнергия от станций, производящих её, к потребителям, которые используют ее в промышленных и жилищных целях.

Благодаря большой роли линий электропередач в энергетике стран мира, особое внимание уделяется их мониторингу. Он позволяет оценивать работоспособность, аварийность и бесперебойность работы всей сети. В век высокотехнологичного общества появляются все новые и новые способы мониторинга линий электропередач.

Высоковольтные линии электропередач являются наиболее аварийными элементами энергосистемы в целом. Из-за большой опасности в перерывах энергоснаб-

жения особое внимание необходимо уделять мониторингу именно этих участков. Это позволит решить многие проблемы в этой области.

Из-за постоянного увеличения потребности в электрической энергии энергосистемы поневоле используют линии электропередач на пределе их электрофизических возможностей, а потребность в эффективности и безопасности кабелей имеет огромное значение для операторов, которым необходимо знать, что происходит вдоль трассы электропередач (неравномерный нагрев, предельная раскочка проводов, обледенение, критический провес). Системы мониторинга воздушных линий электропередач предоставляют возможность дополнительных функций, позволяя увеличить результативность передачи электроэнергии и уменьшить потери [1].

Наиболее современным и технологичным способом мониторинга и диагностирования является использование дронов (БПЛА). Современные разработки позволяют внедрить в это устройство огромное количество функций, которые позволят снизить нагрузку на персонал, обслуживающий участки высоковольтных ЛЭП.

Дроны позволяют осуществлять огромное число операций, которые помогают проводить диагностику всех видимых элементов исследуемых участков энергосистемы, например, лазерное и тепловое сканирование местности, помогают строить трёхмерные модели исследуемых участков для дальнейшего исследования энергообъектов и планирования их развития. Данные процедуры для БПЛА не занимают много времени, в то время как для обычной выездной бригады для этого понадобилось бы значительно больше времени.

Помогут БПЛА решить одну из проблем для выездных бригад при исследовании и мониторинге линий электропередач – доступ ко всем участкам исследуемой местности. Республика Беларусь имеет большое количество болотной местности и лесных массивов. Для выездных бригад это создает трудность для объезда (обхода) всех участков ЛЭП и тщательного их сканирования, в то время как дрон может облететь эти участки за небольшой промежуток времени и дать всю необходимую информацию для дальнейших работ.

Внедрение дронов в систему мониторинга воздушных линий электропередач даст и экономический эффект энергокомпаниям страны. При обследовании объектов энергосетей обычным способом выездными бригадами время на обследование 1000 км сетей составит 60 дней. В то же время при использовании 5 БПЛА время на аналогичное обследование составит 1 день, что позволит снизить затраты на заработную плату сотрудникам и получить экономическую выгоду для электросетевых предприятий [2].

Таким образом, цифровизация мониторинга в виде внедрения БПЛА приведет к усовершенствованию методов и надежности диагностики участков электрических сетей. Небольшие размеры и скорость дронов поможет исследовать те участки, которые находятся в труднодоступных местах: болотная местность, лесные массивы. Экономический эффект позволит распределить свободные средства на модернизацию материально-технической базы сетевых организаций.

#### Литература

1. Современные системы мониторинга ЛЭП и энергооборудования. – Режим доступа: [http://elib.osu.ru/bitstream/123456789/2437/1/elibrary\\_28976937\\_44248177.pdf](http://elib.osu.ru/bitstream/123456789/2437/1/elibrary_28976937_44248177.pdf). – Дата доступа: 03.04.2023.
2. Автоматический комплекс дистанционной диагностики электросетевого оборудования АК ДД ЭСО «Смарт БПЛА Умная Среда МТМ IoT». – Режим доступа: [https://files.sk.ru/-navigator/company\\_files/1121615/1640280943\\_През-АК-ДД-ЭСО-Смарт-БПЛА-Умная-Среда-МТМ-IoT.pdf](https://files.sk.ru/-navigator/company_files/1121615/1640280943_През-АК-ДД-ЭСО-Смарт-БПЛА-Умная-Среда-МТМ-IoT.pdf), свободный. – Дата доступа: 03.04.2023.

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СМАРТФОНА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

А. А. Белаш, А. А. Бурей

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

Научные руководители: Л. И. Евминов, Т. В. Алфёрова

*Приведены результаты экспериментального исследования влияния электромагнитных излучений различных видов смартфонов на организм человека в зависимости от расстояния от источника излучения.*

**Ключевые слова:** мобильные устройства, электрическое поле, напряжённость, безопасность.

Целью данной работы является исследование излучений, создаваемых смартфонами различных производителей, и определение безопасного расстояния для человека при их использовании.

Для измерения напряженности электрического поля использовался прибор «ИЭП-05» (измеритель электрических полей). Прибор предназначен для измерения напряженности электрического поля при частоте 5–2000 Гц и 2–400 кГц и применяется для контроля предельно допустимых уровней электрического поля  $E$ , В/м.

На первом этапе исследования были проведены замеры напряженности электрического поля у трех мобильных устройств: Samsung M12, Xiaomi Mi 12 light, Iphone 13 mini. Напряженность электрического поля фиксировались при следующих состояниях устройств: включённый дисплей; выключенный дисплей; работа на прием вызова; исходящий вызов. При этом фиксировалось напряженность электрического поля при различном состоянии от источника излучения. Расстояние изменялось от 0 до 5 см.

Результаты замеров напряженности электрического поля представлены в таблице.

### Значения напряженности поля смартфона в зависимости от расстояния удаления от источника излучения

Марка смартфона	Расстояние от источника излучения, см	Напряженность поля при состоянии устройства, В/м			
		Выключенный дисплей	Включенный дисплей	Входящий звонок	Исходящий звонок
Samsung M 12	5	0	0,1	0,173	0,173
	4	0,25	0,17	0,3	0,35
	2	0,25	0,47	0,52	0,81
	1	0,58	0,75	0,87	1,1
	0	1,22	1,63	1,51	1,65
Xiaomi Mi 12 light	5	0,14	0,17	0,25	0,3
	4	0,3	0,3	0,41	0,41
	2	0,41	0,52	0,64	0,87
	1	0,69	0,87	0,93	1,16
	0	1,22	1,5	1,45	1,68

Окончание

Марка смартфона	Расстояние от источника излучения, см	Напряженность поля при состоянии устройства, В/м			
		Выключенный дисплей	Включенный дисплей	Входящий звонок	Исходящий звонок
Iphone 13 mini	5	0	0	0,14	0,17
	4	0,2	0,17	0,3	0,35
	2	0,25	0,47	0,52	0,81
	1	0,41	0,47	0,52	0,81
	0	1	1,22	1,16	1,45

По результатам замеров строим зависимости напряженности поля от расстояния удаления от источника (рис. 1–4).

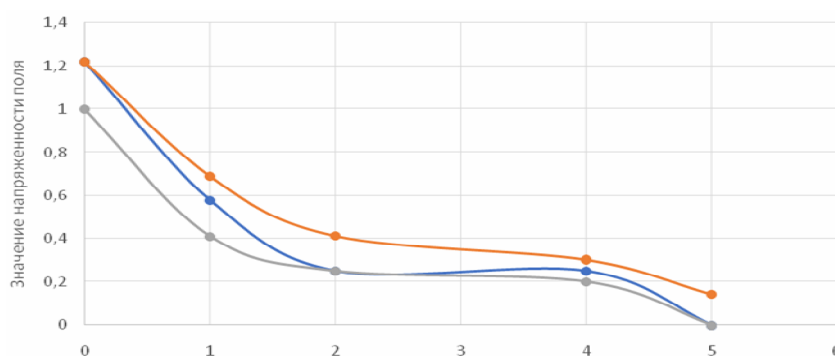


Рис. 1. Зависимость напряженности поля в зависимости от расстояния удаления от источника трех разных смартфонов:  
 — Samsung; — Xiaomi; — Iphone

Из анализа рис. 1 следует, что наименьшую напряженность поля имеет смартфон Iphone 13 mini.

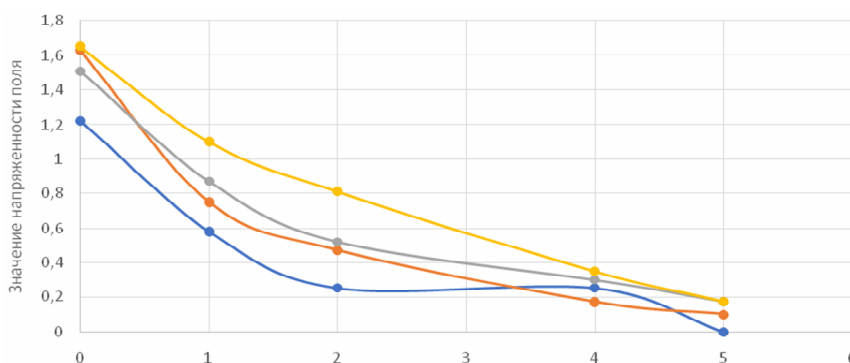


Рис. 2. Зависимость напряженности поля в зависимости от расстояния удаления от источника Samsung M 12:  
 — выключенный; — включенный; — входящий; — исходящий

Из данных рис. 2 видно, что наименьшую напряженность поля смартфон имеет в состоянии исходящего вызова.

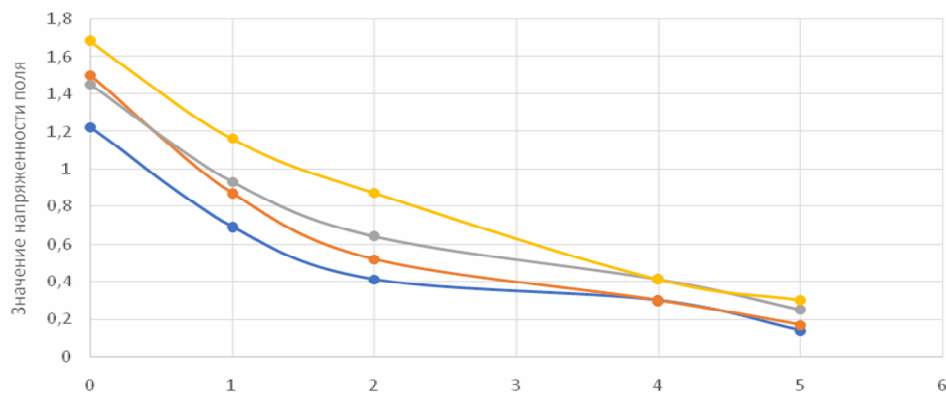


Рис. 3. Зависимость напряженности поля в зависимости от расстояния удаления от источника Xiaomi Mi 12 light:

— выключенный; — включенный; — входящий; — исходящий

Проанализировав рис. 3, понятно, что наименьшую напряженность поля смартфон имеет в состоянии исходящего вызова.

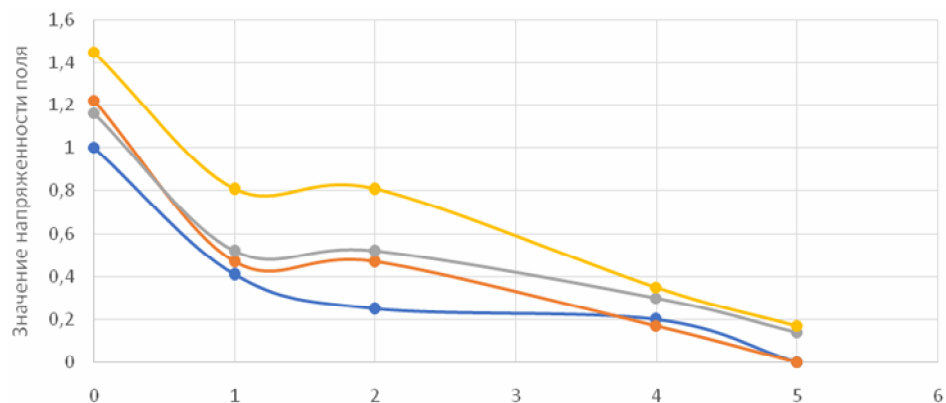


Рис. 4. Зависимость напряженности поля в зависимости от расстояния удаления от источника iPhone 13 mini:

— выключенный; — включенный; — входящий; — исходящий

Исходя из анализа рис. 4, следует, что наименьшую напряженность поля смартфон имеет в состоянии исходящего вызова.

На основании анализа полученных результатов, можно сделать вывод, что все смартфоны безопасны для использования на любом расстоянии от тела человека.

Таким образом, в заключение можно отметить следующее:

- излучения смартфонов по всем параметрам оказались в пределах допустимых значений;
- вблизи смартфонов электрическое поле имело максимальное значение у Samsung M 12;
- подтвердилась основная закономерность: напряженность поля убывает по мере увеличения расстояние от источника.

Литература:

1. Кирюшин, Г. В. Сотовый телефон и экология / Г. В. Кирюшин, О. Н. Маслов // Вестн. связи. – 2016. – № 11. – С. 48–56.

2. Курушин, А. А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE / А. А. Курушин. – М. : Сам Полиграфист, 2014. – 433 с.
3. Курушин, А. А. Расчет теплового поля в биологических объектах под воздействием СВЧ излучения / А. А. Курушин ; под ред. В. А. Пермякова. – М. : One-Book, 2015. – 403 с.
4. Васильева, Т. И. Влияние электромагнитного поля сотового телефона на организм человека в зависимости от возраста / Т. И. Васильева, О. Ю. Сарокваша // Вестн. СамГУ. Естеств. сер. – 2012. – № 3/2 (94). – С. 29–36.

## ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О РЕЖИМАХ РАБОТЫ НАСОСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБОСНОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В. В. Павлов

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

Научный руководитель А. А. Капанский

*Рассмотрены источники получения информации о водо- и энергопотреблении насосных агрегатов для дальнейшего обоснования внедрения на них частотного электропривода. Проанализированы работа портативного ультразвукового расходомера «Акрон-01-02», многофункциональных измерителей мощности, системы «Акватория». Описан способ оценки эффективности эксплуатации насосных агрегатов, который основан на анализе режимов работы скважин и определении времени эксплуатации при максимальном КПД.*

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, характеристики насосных агрегатов, частотный электропривод.

С целью повышения эффективности использования энергии в работе насосных станций возможно внедрение частотных преобразователей. Они обеспечивают плавное регулирование напорной характеристики насосов, что позволяет оптимизировать работу всей системы водоснабжения. Однако для обоснования эффективности таких проектов требуется выполнение технико-экономических расчетов, которые основываются на информационной базе о работе насосных станций. Для получения информации о производительности насосов применяются различные методы измерений, которые условно можно разделить на разовые и систематические. Первые измерения проводятся в момент технического аудита, где анализируются параметры конкретного насоса. В свою очередь, систематические измерения выполняются периодически или непрерывно, что позволяет оценить изменения режимных параметров за длительный период времени. Цель данного исследования – изучение возможных источников получения информации для дальнейшей оценки энергоэффективности насосных агрегатов.

**База вычислительного эксперимента.** Одним из эффективных методов получения информации о режимах подачи воды насосных станций является применение ультразвуковых расходомеров, к примеру, таких, как переносной расходомер «Акрон-01-02», который позволяет производить анализ показателей водопотребления без отключения участка водонапорной сети. Принцип действия устройства основан на измерении разности акустических колебаний. Из основных преимуществ рассмотренного переносного расходомера следует выделить портативность, ведение записи и сохранение ее в собственную память устройства, вывод информации о водопотреблении на ЭВМ. Существенным недостатком является трудоемкий процесс

подготовки поверхности для последующего подключения ультразвуковых излучателей.

Для определения параметров электропотребления могут быть использованы многофункциональные измерители мощности, которые обладают универсальностью в измерении параметров электрической сети. На корпусе устройства имеются дополнительные разъемы для подключения щупов и клещей, с помощью которых прибор получает информацию о напряжении, токе и мощности нагрузки, позволяющих оценить электропотребление приемника. К положительной стороне их использования можно отнести их универсальность в измерении параметров электрической сети.

Эти измерения позволяют получить информацию о режиме работы насосного агрегата, но они имеют существенный недостаток: если установка работает в водонапорной сети, то эти приборы не дают никакого представления о влиянии сети на насосный агрегат. Для учета этого влияния необходимо создать систему измерительных приборов на каждой насосной станции.

В Республике Беларусь существуют разработанные компаниями «Техникон» и «Инженерно-исследовательский центр энергетика» автоматизированные системы мониторинга, такие, как проекты «Акватория» и M2Hydro, которые значительно упрощают работу диспетчерских водоснабжающих организаций с позиции предупреждения аварийных ситуаций.

**Способ оценки эффективности насосных станций.** В данном исследовании была проанализирована эффективность работы скважины № 149 Гомельского водоканала, оснащенной насосом ЭЦВ 8(10)–120–60, который является насосным агрегатом с производительностью 125 м<sup>3</sup>/ч, номинальным напором 59 м и номинальной мощностью электропривода 33 кВт. Регистрация параметров энерго- и гидрорежима проводилась в течение 42 дней – с 12 мая по 23 июня 2020 г. с интервалом времени в один час.

Для анализа работы насосного агрегата была использована аналитическая система мониторинга «Акватория», которая позволяет получать информацию о параметрах работы насосных агрегатов в режиме реального времени. В результате анализа были получены 1006 значений расхода воды и фактической мощности потребления насосным агрегатом. Для каждого измерения выполнен анализ режима работы в соответствии с принятым критерием:

$$Q_{\text{ф}} > 0,8 \cdot Q_{\text{ном}} ; \quad Q_{\text{ф}} < 1,2 \cdot Q_{\text{ном}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ф}}$ ,  $Q_{\text{ном}}$  – фактическая и номинальная производительность насоса, м<sup>3</sup>/ч; 0,8 и 1,2 – границы эффективного режима насоса в соответствии с рис. 1.

На рис. 1 приведена демонстрация к подходу анализа режима работы насоса, где подсчитывается каждая точка эффективного режима.

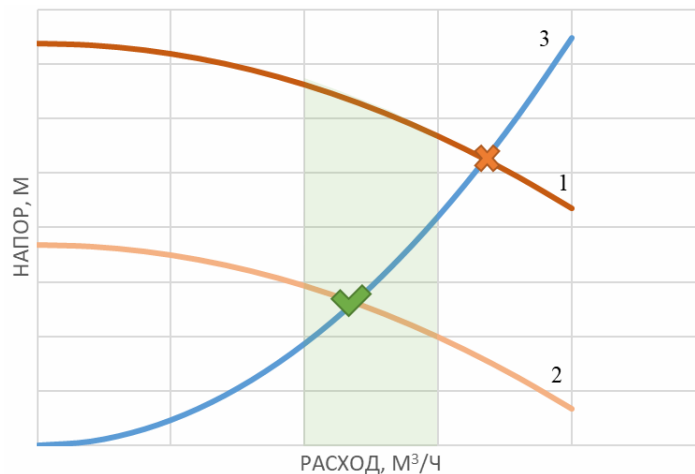


Рис. 1. Демонстрация к подходу анализа режима работы насоса:  
 1 – номинальная характеристика насоса; 2 – характеристика насоса при частотном регулировании; 3 – характеристика водопроводной сети в номинальном режиме; выделенная зона называется областью эффективной работы насосного агрегата

Таким образом, для проведения анализа эффективности работы насосного агрегата можно использовать алгоритм, основанный на оценке частоты встречаемости эффективных режимов. Основная идея заключается в выборке из общей массы всех значений числа точек, которые удовлетворяют заданному условию (1). Следовательно, можно определить, как часто эффективные режимы встречаются в работе насосного агрегата. Для расчета частоты встречаемости эффективных режимов можно использовать следующую формулу, основанную на описанных выше принципах:

$$v = \frac{n_3}{n} 100 \%, \quad (1)$$

где  $n_3$  – количество измерений, для которых фактический расход находится в эффективной области;  $n$  – количество всех измерений, проведенных за период времени регистрации.

Такой способ анализа эффективности работы насосного агрегата позволяет получить более точные данные о том, как часто достигаются эффективные режимы работы. Он может быть полезен для оптимизации работы насосного агрегата и улучшения его производительности. Для нашего случая общее количество наблюдений составило 1006 значений, из которых 821 попало в требуемые диапазоны, что, согласно [1], составляет 81,6 %. Частоту нахождения насоса в неэффективном режиме можно определить следующим образом:  $\bar{v} = 1 - v = 1 - 0,816 = 18,4 \%$ . Результаты такого анализа дают представление о характере существующих режимов работы насоса и дальнейшей целесообразности установки на него частотного преобразователя.

Предложенный подход к мониторингу энерго- и гидрорежима насосных агрегатов позволяет оперативно получать данные о работе насосов и проводить анализ их работы. Аналитические системы мониторинга также способствуют увеличению эффективности работы насосных агрегатов, так как дают возможность выявлять проблемы и недостатки в работе насосов в режиме реального времени.



## Литература

1. Федоров, О. В. Технико-экономическое обоснование внедрения системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на объектах горных предприятий / О. В. Федоров [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 9-10. – С. 91–97.
2. Фашиленко, В. Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий : учеб. пособие / В. Н. Фашиленко. – М. : Гор. кн., 2011. – 260 с.
3. Грачева, Е. И. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутриводского электроснабжения / Е. И. Грачева, А. Н. Горлов, З. М. Шакурова // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – № 22 (2). – С. 65–74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>
4. Optimize the cost of paying for electricity in the water supply system by using accumulating tanks / A. Karanski [et al.] // In E3S Web of Conferences, 2020 / EDP Sciences. – Les Vlis, 2020. – Vol. 178. – P. 01065.

## АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЫНКА СВЕТОТЕХНИКИ

М. Д. Астапенко

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

Научные руководители: Л. И. Евминов, Т. В. Алфёрова

*Приведен подробный анализ развития светотехники. Рассмотрены основные типы современных источников светодиодного освещения, тенденции и перспективы развития мирового рынка светодиодного освещения в 2023 г.*

**Ключевые слова:** источники света, рынок светотехники, светодиоды, светодиодная матрица, область применения.

### Введение

Ежегодный рост цен на энергоносители создает большие проблемы для многих экономик мира, в связи с чем правительством разных стран принимаются меры по внедрению программ энергосбережения и энергоэффективности. В части европейских государств проводится политика экономии электроэнергии, что отражается как в сокращении времени подсветки ночных городов, так и в модернизации систем освещения. В Республике Беларусь рациональное и экономное расходование всех видов топливно-энергетических ресурсов, в том числе и электрической энергии, снижение их потерь на сегодняшний день является актуальной задачей. Строгий контроль со стороны государства за рациональным расходованием всех видов топливно-энергетических ресурсов определяется тем, что Республика Беларусь импортирует более 60 % энергоресурсов. В этих условиях задача эффективного использования электроэнергии в различных отраслях промышленности приобретает особую важность.

В целях обеспечения эффективного использования топлива и энергии реализуется Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. [1]. По данной программе повышение энергоэффективности предлагается реализовать через модернизацию систем освещения мест общего пользования жилых домов с внедрением энергоэффективных осветительных устройств, в том числе светодиодных, и автоматических систем управления освещением.

Преимуществами светодиодного освещения являются низкое потребление энергии, высокая светоотдача, долгий срок работы. Кроме того, светодиодные светиль-

ники могут работать в широком температурном диапазоне, что существенно расширяет область их применения.

Каждый светодиодный светильник может быть выполнен по уникальному заказу, с конфигурируемым корпусом, оптическими элементами и электронными драйверами.

Согласно последнему отчету TrendForce «2022 Global LED Lighting Market Analysis-1H22» [2], светотехническая промышленность больше внимания уделяет качеству света продуктов (например, индексу цветопередачи, значению R9 и SDCM), и HCL для здоровья. Растущие тенденции оцифровки светильников и настройки света и цвета в продуктах светодиодного освещения стимулировали возникновение интеллектуальных светодиодов. В настоящее время новые технологические приложения и потенциальный спрос способствовали росту рынка освещения. TrendForce прогнозирует, что мировой рынок светодиодного освещения достигнет 72,10 млрд долл. США в 2022–2023 гг. (+11,7 % в годовом исчислении) и 93,47 млрд долл. США – в 2026 г.

Проанализировав мировой рынок можно сделать вывод, что спрос на лампы и светильники будет расти в 2023 г. Но в долгосрочной перспективе спрос на светодиодные лампы замедлится в основном из-за снижения спроса на замену и растущего предпочтения потребителей в отношении светильников. CAGR 2020–2022 гг. для ламп и светильников составит 8,5 и 12,0 % соответственно.

Кроме того, на освещение по всему миру приходится около 10 % потребления электроэнергии в жилых помещениях и 18–45 % – производственных помещений. Во всем мире растет потребность в энергосбережении, что дает возможности для роста рынка. Ожидается, что переход на энергосберегающее освещение снизит мировой спрос на электроэнергию для освещения на 30–40 % к 2030 г. Используя на 50 % меньше электроэнергии, светодиоды дают более яркий и четкий свет, Кроме того, светодиодные светильники не содержат опасных материалов, а также полностью подлежат вторичной переработке.

В ближайшие годы осветительные приборы будут разрабатываться с различными датчиками и коммуникационными аппаратами. Более того, спрос на энергосберегающие модификации светодиодов будет расти, поскольку мировое сообщество стремится к нулевому уровню выбросов и экономии энергоресурсов. Таким образом, предложения для коммерческого, жилого, наружного и промышленного освещения создадут возможности для дальнейшего роста рынка.

Спрос на современные качественные источники света дал возможность некоторым компаниям стать мировыми «гигантами» на рынке. Ключевыми из них являются Every Watt Matters, Lumenix, Stouch Lighting, LEDVANCE GmbH, Signify Holdings и ESB Light Manufacture LED Luminaires среди прочих.

Основными типами светодиодных источников света (ИС), распространенными на данный момент, являются [3]:

– RGB. Объединяет в одном корпусе красный, синий и зеленый диоды под общей линзой. Данные устройства используются в лампах с переключением или регулировкой цвета свечения. С их помощью получают и белый свет, но его спектр неприемлем для длительного восприятия. Поэтому область применения данных ИС – декоративное освещение;

– SMD и PCB Star. Данные устройства состоят из одного или нескольких кристаллов в корпусе под линзой или люминофором. Потребляемая мощность SMD (1–9 чипов) не превышает 1 Вт, а вот PCB Star, несмотря на наличие только 1 кристалла, гораздо более мощные светодиоды (СД) (до 10 Вт). Оба этих вида СД отли-

чаются узконаправленным потоком, самой высокой светоотдачей лм/Вт и рекордным сроком службы;

– COB. Матрицы из множества чипов на общей пластине, залитой люминофором. Диапазон мощностей СД COB составляет 3,0–150 Вт. У данных светодиодов меньше светоотдача и срок службы, чем у SMD, однако самая лучшая цветопередача (CRI = 80–96 %). Еще одно их принципиальное отличие от SMD – более широкий угол рассеивания света. Матрицы COB могут быть гибкими и иметь любую форму: прямоугольную, круглую, линейную и т. д.;

– Filament. СД, внешний вид которых имитирует нити накала в традиционной лампочке Эдисона. На узкой стеклянной полоске зафиксировано несколько крохотных чипов, и вся полоска покрыта люминофором. Этот вид светодиодов обеспечивает самое равномерное рассеивание света. Недостаток – сравнительно небольшой срок службы.

Исходя из приведенных типов, можно сделать вывод, что наиболее приемлемым для использования в производстве является светодиодная матрица типа COB. За рубежом светильники на основе COB-матриц стали наиболее распространенными и широко используются в Китае, Англии, США, Польше и ряде других стран. Исследование электрических и световых характеристик матрицы такого типа было проведено в [4].

Ежегодно мировые лидеры по производству светодиодов используют рост рынка, расширяя свою продуктовую линейку за счет эффективности, простоты использования и технологических достижений. Также различные правительственные реализации приводят к более широкому внедрению светодиодного освещения, что способствует росту рынка освещения как услуги.

Исходя из этого, рассмотрим основные технологии, используемые для повышения эффективности светодиодных светильников [5]:

- Лазерное освещение. В светодиодах эффективность излучения падает при повышении плотности тока, однако в лазерных диодах все наоборот: с ростом плотности тока увеличивается эффективность излучения.

- Нитевидные нанокристаллы (ННК). Нитевидные нанокристаллы – сравнительно новый материал, пока не нашедший промышленного применения. Возможность создания светодиодов на их основе активно изучается некоторыми производителями. ННК обладают уникальными свойствами: отличаются большой удельной площадью поверхности, эффективно выводят свет, свободны от механического напряжения, вызванного подложкой.

- Технология удаленного люминофора. Подразумевает пространственное разделение люминофора и чипа. Данная технология позволяет увеличить световую эффективность, уменьшить яркость и слепящий эффект, решить проблему отвода тепла и создать новые возможности для дизайна. При пространственном разделении чип и люминофор не нагревают друг друга, что благоприятно сказывается на эксплуатационных характеристиках светильника.

Таким образом, можно сделать вывод, что рынок светодиодного освещения будет расти и развиваться, а конкуренция среди мировых гигантов по производству данного вида светильников будет порождать все новые открытия и продвижения в данной сфере. На современном этапе переход на светодиодное освещение является одним из способов экономии электроэнергии как в жилых помещениях, так и в коммерческих. В связи с этим в нашей стране и реализуются государственные программы, которые способствуют переводу уличного и промышленного освещения на светодиодные светильники.

## Литература

1. Государственная программа «Энергосбережение» // Главная. Новости. Утверждена Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. – Режим доступа: <https://gosstandart.gov.by/approved-state-program-energy-saving-for-2021-2025-years>. – Дата доступа: 16.01.23.
2. Отчет TrendForce. – Режим доступа: [https://www.ledinside.com/intelligence/2022/2/lighting\\_led](https://www.ledinside.com/intelligence/2022/2/lighting_led). – Дата доступа: 18.02.23.
3. Типы светодиодных светильников // Главная. Блог. Типы светодиодных светильников. – Режим доступа: [https://interalighting.ru/blog/4294\\_tipy-svetodiodykh-svetilnikov](https://interalighting.ru/blog/4294_tipy-svetodiodykh-svetilnikov). – Дата доступа: 05.02.23.
4. Евминов, Л. И. Область применения и экспериментальное исследование электрических и световых характеристик светодиодной матрицы F6040 / Л. И. Евминов, Т. В. Алфёрова, М. Д. Астапенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 4. – С. 77–89.
5. Технологии повышения эффективности светильников // Главная. Свет. Тенденция рынка светодиодного освещения. – Режим доступа: <https://entherm.ru/svet/stili-osveshcheniya-2.html>. – Дата доступа: 06.02.23.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПАКТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СЕТОЧНОГО ТИПА

А. М. Далинчук

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

Научный руководитель Г. И. Селиверстов

*Проведена оценка электрических, технических и конструктивных параметров компактных воздушных линий сеточного типа по сравнению с традиционными линиями электропередачи.*

**Ключевые слова:** компактная воздушная линия, электрические параметры воздушных линий, натуральная мощность воздушных линий.

Известны разные типы воздушных электропередач, при разработке которых, прежде всего, ставится задача повышения их пропускной способности. Наиболее распространены на практике электропередачи с некомпенсированными воздушными линиями, рост пропускной способности которых при необходимости достигается за счет увеличения номинального напряжения и расщепления фаз.

Известно, что для линий электропередачи при неизменных напряжениях  $U$  по концам предельная передаваемая мощность равна:

$$P_{\text{пр}} = \frac{U^2}{Z_{\text{в}} \sin al} = \frac{P_{\text{нат}}}{\sin al}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина линии;  $a$  – коэффициент изменения фазы волны;  $Z_{\text{в}}$  – волновое сопротивление линии.

Отсюда следует, что повысить пропускную способность линии можно, повышая ее натуральную мощность  $P_{\text{нат}}$ . Из выражения (1) также следует, что один из путей повышения натуральной мощности заключается в снижении волнового сопротивления линии электропередачи. Для линии без потерь волновое сопротивление равно:

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (2)$$

где  $L_0$ ,  $C_0$  – индуктивность и емкость единицы длины линии.

Таким образом, для повышения пропускной способности линии необходимо рассматривать следующие задачи:

$$\min \operatorname{Re} L \text{ и } \max \operatorname{Re} C. \quad (3)$$

Из электротехники известно, что скорость распространения электромагнитной волны, зависящая от параметров среды, в которых функционирует линия электропередачи, равна:

$$v_B = \frac{1}{\sqrt{Z_0 C_0}}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что при неизменных параметрах среды и отсутствия на линии каких-либо сосредоточенных устройств, влияющих на параметры линии, постоянство соотношения параметров:

$$L_0 C_0 = \operatorname{const}. \quad (5)$$

Следовательно, при изменении конструкции линии, сопровождающемся, например, снижением индуктивности, одновременно будет увеличиваться емкость, так, чтобы сохранилось соотношение (5).

Факторы расщепления фаз и уменьшения расстояния между проводами разных фаз в одной конструкции использованы при создании компактных воздушных линий сеточного типа [1].

В сеточной линии, варианты схем расположения проводов которых показаны на рис. 1,  $a-z$ , провода закрепляют в вершинах смежных ромбов, причем на большой диагонали каждого из них расположены провода одной фазы, а на меньшей, равной стороне ромба, – провода разноименных расщепленных фаз.

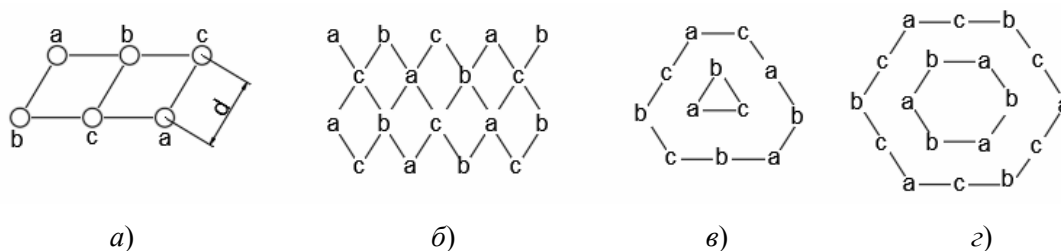


Рис. 1. Варианты одноцепных линий с нетрадиционным расположением проводов расщепленных фаз: сеточная двухрядная ( $a$ ); многорядная ( $b$ ); треугольная ( $v$ ) и шестиугольная ( $z$ )

Это обеспечивает удаление проводов соседних одноименных на величину  $\sqrt{3}d$  при сохранении расстояния между проводами соседних разноименных фаз. Названия вариантов линии приняты исходя из числа в них горизонтальных рядов проводов: при двух рядах – двухрядные, при более двух – многорядные. Сеточная треугольная линия является вариантом многорядной, шестиугольная – двухрядной электропередачи.

На рис. 2 изображена порталная опора сеточной двухрядной линии. Провода к стойке опоры прикреплены вертикальными 1 и горизонтальными 2 гирляндами изоляторов. Для подвески и взаимной фиксации проводов нижнего ряда используют

V-образную гирлянду изоляторов. При трех и более рядах применяют также A-образные гирлянды.

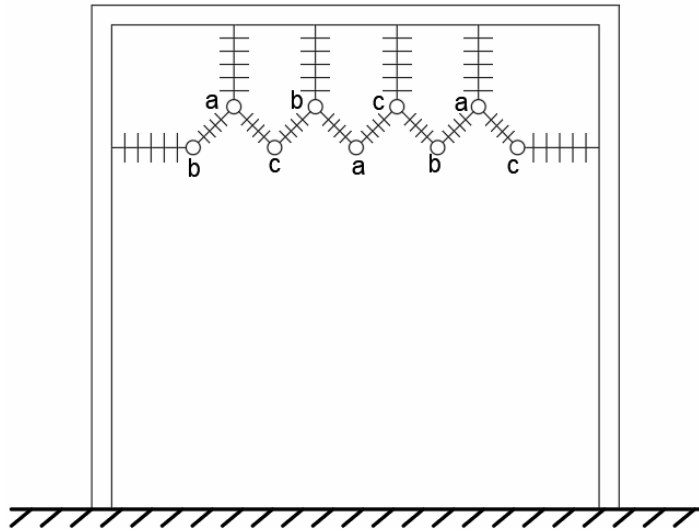


Рис. 2. Схема подвески проводов сеточной линии

Приведем оценку электрических, технических и конструктивных параметров компактных воздушных линий сеточного типа напряжением 110 кВ, рассмотренных выше, и сравним их с параметрами традиционных линий (табл. 1 и 2).

В табл. 1 обозначено:  $x_0$  и  $b_0$  – удельные индуктивное сопротивление и емкостная проводимость линии соответственно

У компактных линий сеточного типа удельная натуральная мощность  $p_i$  (на один провод расщепленной фазы) пропорциональна числу составляющих в расщепленной фазе и лежит в диапазоне 14,2–14,6 МВт (табл. 1).

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

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

Таблица 1

Параметры сеточных двухрядных линий

Напряжение габариты и марки проводов линии	Число проводов в фазах	Электрические параметры				
		$x_0$ , Ом/км	$B_0 \cdot 10^{-6}$ , Ом · км	$Z_B$ , Ом	$P_{\text{нат}}$ , МВт	$P_i$ , МВт
<i>Сеточная двухрядная линия</i>						
$U = 100$ кВ; $d = 0,8$ м; АС 96/16	2	0,153	7,64	141,4	85,	14,2
	3	0,101	11,58	93,4	129	14,4
	4	0,075	15,63	69,2	174	14,6

Таблица 2

**Характеристика удельной натуральной мощности  
традиционных и сеточных линий напряжением 110 кВ**

Линия	Натуральная мощность на единицу ширины трассы (числитель), МВт/м, и площадь поперечного сечения линии (знаменатель), МВт/м <sup>2</sup>				
	Число составляющих и в расщепленной фазе				
	1	2	3	4	5
Традиционная одноцепная	$\frac{2,3}{0,17}$	–	–	–	–
Традиционная двухцепная	$\frac{4,4}{0,24}$	–	–	–	–
Сеточная двухрядная	–	$\frac{14,2}{0,78}$	$\frac{19,9}{1,09}$	$\frac{25,1}{1,38}$	$\frac{33,0}{1,81}$

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

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

Проведены также исследования режимов электропередачи напряжением 110 кВ с применением линий сеточного и традиционного типов в широком диапазоне передаваемых мощностей с изменением длины линий до 80 км, которые также подтверждают преимущества линий сеточного типа.

#### Л и т е р а т у р а

1. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В. Т. Федин [и др.]. – Минск : Наука і тэхніка, 1993. – 224 с.
2. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
3. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ЧЕРЕЗ СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ ПОД АТМОСФЕРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ**

**М. Д. Астапенко**

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

*Исследована возможность протекания трансформаторного масла через силовой кабель под атмосферным давлением. Представлены результаты эксперимента и сделан вывод, что*

для уменьшения частичных разрядов в кабельных линиях возможно использование прокачки масла через кабель. В результате была предложена установка для восстановления изоляции кабеля находящегося на барабане.

**Ключевые слова:** кабели, частичные разряды, диагностирование, увлажнение изоляции, протекание масла.

Ежегодно при диагностировании кабельных линий путем измерения частичных разрядов электрические сети сталкиваются с проблемой появления частичных разрядов в абсолютно новых и недавно проложенных кабелях.

Как уже было описано в [1], уровень частичных разрядов в кабеле зависит от степени увлажнения. Данное предположение было подтверждено в ходе диагностирования кабельных линий в Гомельских и Могилевских распределительных сетях 6–10 кВ. При этом диагностирование проводилось как для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, так и с бумажно-масляной изоляцией.

Как показал анализ хранения и эксплуатации кабелей, бухты хранятся круглый год под открытым небом. Под воздействием переменной температуры окружающей среды из воздуха, находящегося в кабеле, постепенно образуются микроскопические капельки влаги (росы) [2]. Эти капли и являются причиной частичных разрядов. Кабели закладываются в землю уже с увлажненной изоляцией и при их диагностировании фиксировались частичные разряды.

Исходя из этого, актуальным является разработка способа сушки и восстановления изоляции кабельных линий для увеличения их срока эксплуатации.

**Постановка задачи.** В настоящее время в городских распределительных сетях появилась современная система диагностики кабельных линий путем измерения частичных разрядов фирмы Megger, которая позволяет определить наличие частичных разрядов в кабеле, следовательно, и возможное наличие воды в кабельной линии [3].

К большому сожалению, на данный момент нет действующего способа для сушки кабеля на барабане, кроме сушки в вакууме, которое возможно только на заводе изготовителе, и данное оборудование является очень дорогостоящим. Цель данной работы – разработка способа сушки изоляции путем прокачки масла через кабель.

**Предлагаемые решения проблем.** В качестве решения проблемы увлажненности кабеля предлагается прокачка масла через кабель. Для этого был проведен эксперимент по исследованию возможности протекания трансформаторного масла через кабель под давлением и подобраны образцы 7 марок кабелей (рис. 1): АПвПу2г, N2XSEY (Helukabel – Германия), NYCWY (Helukabel – Германия), N2XSEY (Helukabel – Германия), NY(FL)Y (Helukabel – Германия), N2XSY (Helukabel – Германия), ААШв (отечественного производства).

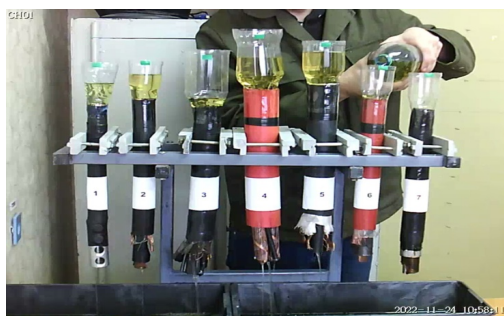


Рис. 1. Фото эксперимента протекания масла через кабель



В ходе эксперимента к 0,5 м кабеля данных образцов была примотана воронка, позволяющая пропустить через кабель трансформаторное масло объемом 0,5 л. Кроме этого на первом образце кабеля марки АПвПу2г был установлен соединитель термостойкой муфты для оценки возможности протекания масла через соединительную муфту. Для прохождения масла через соединитель в нем было проделано отверстие 6 мм в перегородке для лучшего его прохождения. Результаты протекания масла в ходе данного эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Результаты эксперимента протекания масла через образцы кабелей

Тип кабеля	Время появления масла на другом конце кабеля, с	Время протекания трансформаторного масла через кабель объемом 0,5 л
АПвПу2г	15	2 мин 39 с
N2XSEY	21	4 мин 16 с
NYCWY	8	1 мин 1 с
N2XSEY	4	1 мин 27 с
NY(FL)Y	6	50 с
N2XSY	29	2 мин 49 с
ААШв	> 30 мин	>1 сутки

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что данный способ восстановления изоляции возможен. Соответственно предлагается создание экспериментальной установки для прокачки масла через кабель, расположенный на барабане. Для ускорения протекания масла по концам кабеля необходимо установить вакуумный насос и бак под давлением. Кроме того, для улучшения эффекта сушки изоляции кабеля перед пропуском масла через кабель необходимо прокачать через него инертный газ (азот), как было предложено в [1].

Для выполнения натуральных экспериментов необходимо следующее оборудование:

1. Стальной бак для масла объемом  $15 \div 20$  л под давление  $4 \text{ кг/см}^2$ .
2. Баллон с азотом –  $P = 10 \text{ кг/см}^2$  объемом  $V = 50 \div 100$  л.
3. Редуктор (детандер) –  $10/1 \text{ кг/см}^2$ .
4. Манометры для измерения давления –  $0 \div 6 \text{ кг/см}^2$ .
5. Клапан со штуцером (4 шт.) для соединения кабеля с емкостями или уплотнительные манжеты по диаметру кабеля (4 шт.).
6. Емкость для подключения вакуумного насоса объемом  $10 \div 15$  л (1 шт.).
7. Манометры для измерения вакуума – 1 шт.
8. Клапан для соединения баллона с азотом и редуктором.
9. ТЭН для нагрева масла в баке до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  мощностью  $6 \div 10$  кВт;
10. Вакуумный насос – 1 шт.
11. Масло трансформаторное или кабельное –  $30 \div 40$  л.
12. Кабели двух марок  $100 \div 150$  м.
13. Диагностическая система Megger.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Выбирается новый кабель после долгого хранения из сшитогополиэтилена или АПвПу2г – 100–150 м; можно из кусков разного кабеля, тогда в соединителе необходимо сделать отверстие 5–6 мм.

2. В кабеле, находящемся на барабане, измеряется уровень частичных разрядов диагностической системой Megger.

3. Для удаления влаги кабель продувается теплым азотом или воздухом.

4. Измеряются частичные разряды в кабеле.

5. Через кабель пропускается трансформаторное масло.

6. Измеряются частичные разряды в кабеле.

7. При отсутствии частичных разрядов в кабеле концы кабелей герметизируют мастикой и пленкой или устанавливают концевые муфты. Кабель возвращается на барабан для хранения. Периодически один раз в три месяца регистрируются частичные разряды в кабеле.

В заключение отметим следующее:

1. Теоретически обосновано, что в результате сложившейся практики кабеля закладываются в землю уже с увлажненной изоляцией, так как бухты хранятся круглый год под открытым небом. В итоге частичные разряды в кабеле регистрируются в первые месяцы эксплуатации кабелей.

2. Проведены эксперименты по определению скорости истечения масла с использованием образцов 7 марок кабелей под атмосферным давлением, а также по определению видов кабеля, подходящих для данного способа восстановления изоляции.

3. Разработана экспериментальная схема для прокачки масла через кабель, расположенный на барабане.

#### Литература

1. Грунтович, Н. В. Способы восстановления изоляции высоковольтных кабелей // Н. В. Грунтович, М. Д. Астапенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – 2021. – № 4. – С. 58–66.
2. Физический энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Сов. энцикл, 1983. – Т. 4. – 451 с.
3. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2013. – 271 с.

### **ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ОРЕБРЕНИЯ ТЕПЛОТДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕСС ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ АЦЕТОНА**

**Д. С. Радюк**

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

Научный руководитель Н. А. Вальченко

*Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении ацетона на горизонтальных трубах, имеющих поперечное оребрение с различной геометрией ребра, в диапазоне тепловых потоков  $q = 2,9–30,1 \text{ кВт/м}^2$  при атмосферном давлении в кольцевом канале. Определены закономерности влияния профиля ребра на вид кривой кипения.*

**Ключевые слова:** интенсификация теплообмена, оребренная поверхность, кольцевой канал, энергосберегающая технология.

**Экспериментальная установка и методика проведения исследований.** Актуальность исследований определяется широким распространением оребренных поверхностей в промышленности, в связи с их универсальностью для различных теплоносителей, технологичностью изготовления и сборки, возможностью работы на загрязненных теплоносителях. К тому же до настоящего времени нет достаточных широкомасштабных исследований по процессу кипения жидкостей в условиях «стеснения» и затрудненного отвода паровой фазы, что затрудняет расчеты теплопередающей аппаратуры различных энергоустановок.

Экспериментальные исследования проводились на специально созданном экспериментальном стенде кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».

Геометрические параметры канала и исследованных образцов представлены в таблице, где  $d_o$  – диаметр образца по основной поверхности;  $D_o$  – наружный диаметр ребра;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр образца;  $S_p$  – шаг ребра;  $\delta_o$  – толщина основания ребра;  $\delta_b$  – толщина вершины ребра;  $L_o$  – длина образца;  $N_p$  – количество ребер;  $h_p$  – высота ребра;  $F_o$  – площадь основной поверхности;  $F_n$  – полная наружная площадь образца;  $D$  – диаметр кольцевого канала.

Тепловой поток к образцу подводился с помощью электронагревателя от стабилизированного источника постоянного тока. Жидкость в процессе проведения эксперимента подавалась через нижний патрубок в кольцевой канал, а паровая фаза отводилась через верхний патрубок в конденсатор. Необходимое давление в кольцевом канале обеспечивалось конденсатором, поддерживающим уровень давления за счет изменения расхода охлаждающей жидкости.

**Параметры исследованных образцов**

Тип экспериментального образца	$d_o$ , мм	$D_o$ , мм	$d_{вн}$ , мм	$S_p$ , мм	$\delta_o$ , мм	$\delta_b$ , мм	$L_o$ , мм	$N_p$ , шт.	$h_p$ , мм	$F_o$ , м <sup>2</sup>	$F_n$ , м <sup>2</sup>	$D$ , мм				
Полированная трубка	25	–	16	–	–	–	302	–	–	0,0237	0,0237	107				
Технически шероховатая трубка		–		–	–	–		–								
Параболический профиль ребра		50		4	4	2		36	12,5	0,0124	0,0592					
Прямоугольный профиль ребра										4	2		2	47	0,0163	0,0772
Треугольный профиль ребра										4	4		1	36	0,0124	0,0539

Экспериментальные образцы изготавливались из дюралюминия. На поверхности образцов для измерения температурного напора зачеканивались хромель-копелевые дифференциальные термодпары с диаметром проводников не более 0,5 мм. Экспериментальные данные регистрировались и обрабатывались с помощью автоматизированной системы измерений.

**Полученные результаты исследования и их анализ.** В качестве контрольных опытов, были проведены эксперименты по кипению ацетона при атмосферном давлении на технически шероховатой и полированной горизонтальных трубках в диапазоне

тепловых потоков 6–100 кВт/м<sup>2</sup>. Полученные опытные данные подтверждают положительное влияние условий «стеснения» [1, 2].

Экспериментальное исследование теплообмена при кипении ацетона на поперечно оребренных горизонтальных трубах с различной геометрией ребра проведено в диапазоне тепловых потоков  $q = 2,9\text{--}30,1$  кВт/м<sup>2</sup> при атмосферном давлении. Исследовались три типа оребренных поверхностей, со следующими профилями ребра: треугольный, параболический и прямоугольный. Полученные значения плотности теплового потока на оребренных трубах по сравнению с технически шероховатой и полированной трубками имеют меньшие значения. Это объясняется тем, что подводимый от электронагревателя тепловой поток относился к полной поверхности оребренной трубки, которая существенно больше, чем поверхность гладкой и шероховатой трубки:

$$q = \frac{Q}{F_o + F_p}, \quad (1)$$

где  $F_o$  – площадь основной поверхности без оребрения;  $F_p$  – полная площадь ребер.

Соответственно, рассчитывались и коэффициенты теплоотдачи – по среднему температурному напору по образцу:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T_{cp}} = \frac{q}{(\Delta T_o + \Delta T_p)/2}, \quad (2)$$

где  $\Delta T_o$  – средний температурный напор по основной поверхности, не занятой оребрением;  $\Delta T_p$  – средний температурный напор по ребру.

Необходимо отметить, что процесс парообразования (начало кипения) на оребренных поверхностях начинался при значительно более низких температурных напорах и плотностях теплового потока (1–2 и 5 °С, 3 и 6,5 кВт/м<sup>2</sup>, соответственно, рис. 1), что свидетельствует о достаточно высокой эффективности оребренных поверхностей. Средние коэффициенты теплоотдачи для них в 2–3,5 раза выше, чем для полированной трубки (рис. 2).

В то же время характер кривых кипения на оребренных трубках в значительной мере определялся геометрией поверхности [2]. При кипении на трубке с прямоугольным профилем ребра в области малых тепловых потоков 3–15 кВт/м<sup>2</sup> значения коэффициентов теплоотдачи выше нежели на поверхности с параболическим и треугольным профилем ребра. Это связано с уменьшением вертикальной скорости перемешивания жидкости у поверхности образца, более быстрым прогреванием объемов жидкости в межреберных зазорах, что приводит к стабилизации процесса парообразования.

Однако с ростом теплового потока  $q > 11$  кВт/м<sup>2</sup> картина меняется. В этом случае достаточно узкое поперечное сечение прямоугольного оребрения препятствует отводу образовавшейся паровой фазы, что приводит к снижению интенсивности теплоотдачи вследствие запаривания поверхности.

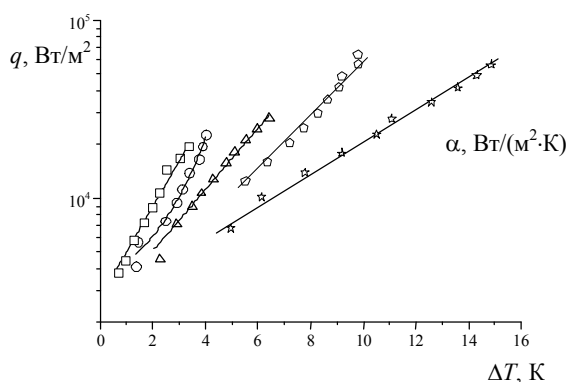


Рис. 1. Экспериментальные зависимости  $\Delta T = f(q)$  при кипении ацетона на трубках с поперечным оребрением при атмосферном давлении

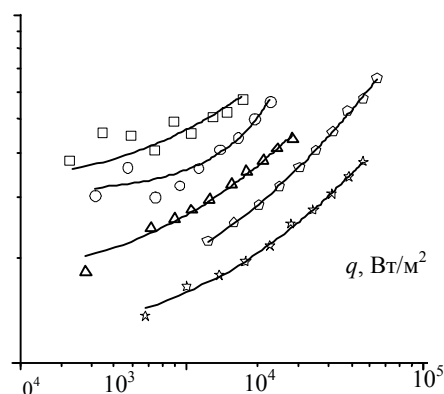


Рис. 2. Экспериментальные зависимости  $\alpha = f(q)$  при кипении ацетона на трубках с поперечным оребрением при атмосферном давлении

На рис. 1, 2 приняты следующие обозначения: ☆ – полированная трубка; ⬠ – технически шероховатая трубка; △ – треугольный профиль ребра; ○ – параболический профиль ребра; □ – прямоугольный профиль ребра

Более низкие значения коэффициентов теплоотдачи для трубки с треугольным оребрением можно объяснить, более слабым развитием поверхности теплообмена. К тому же при беспрепятственном отводе прогретой жидкости от оснований ребер значительную роль играет конвективная составляющая теплового потока, отводимого от образца. Действительно, процесс кипения на трубке с треугольным оребрением начинался при более высоких температурных напорах и плотностях теплового потока ( $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $4\text{ кВт/м}^2$ ).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально подтверждено положительное влияние условий «стеснения» на интенсивность теплоотдачи при кипении ацетона на горизонтальных трубках в кольцевом канале.

2. Проведены экспериментальные исследования процесса кипения на трубках с поперечным оребрением. Полученные значения коэффициентов теплоотдачи в 2–3,5 раза превышают аналогичные величины для гладкой поверхности, что говорит о достаточно высокой эффективности исследованного метода интенсификации теплоотдачи.

3. Выявлены закономерности влияния профиля ребра на вид кривой кипения. Определено, что в области малых тепловых потоков ( $2,9\text{--}11\text{ кВт/м}^2$ ) наиболее эффективным является прямоугольное оребрение, а при  $q > 11\text{ кВт/м}^2$  – параболическое.

4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке высокоэффективных теплообменных аппаратов, теплопередающие поверхности которых работают в условиях «стеснения».

#### Литература

1. Керн, Д. Развитие поверхности теплообмена : пер. с англ. / Д. Керн, А. Краус. – М. : Энергия, 1977. – 464 с.

2. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – М. : Высш. шк., 1977. – 352 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА И МИКРООММЕТРА

И. Ю. Микулич, М. С. Манюкевич

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

Научный руководитель Д. И. Зализный

*Рассмотрен лабораторный стенд, созданный на кафедре «Электроснабжение» и позволяющий выполнять измерения сопротивлений контактов и заземления высоковольтного разъединителя РЛНД-1-10П/200 с помощью микропроцессорного микроомметра, также разработанного на кафедре.*

**Ключевые слова:** лабораторный стенд, разъединитель, микроомметр, испытания, потери электроэнергии.

Измерение сопротивлений различных элементов электрических цепей является очень важным для задач энергетики. Особенно на значительных участках линий электропередач наличие даже небольшого сопротивления создает одну из крупнейших проблем передачи электроэнергии – энергетические потери, расходующиеся на нагревание проводников. Поэтому необходимо проводить контроль сопротивления на участках цепи и на различных элементах, например, таких, как высоковольтные разъединители. Для изучения студентами принципов работы и испытаний подобных элементов сети на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого был создан лабораторный стенд, имеющий название «Высоковольтный разъединитель» (рис. 1).

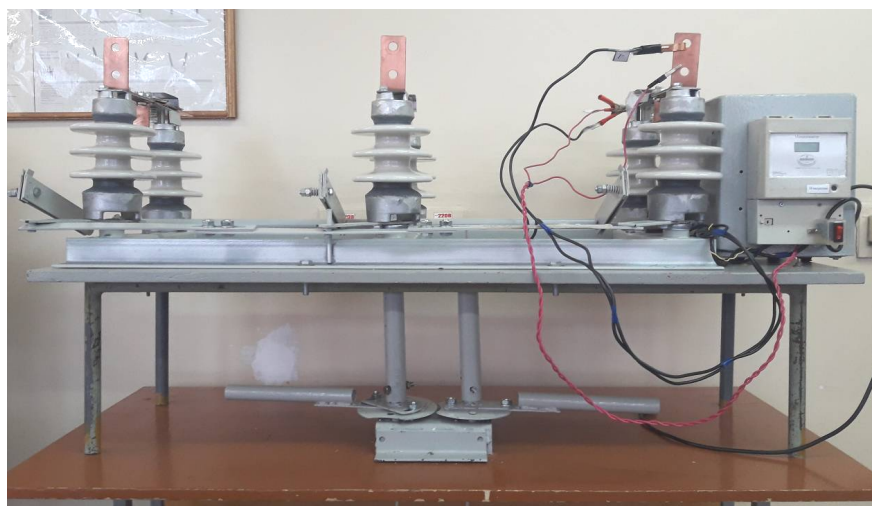


Рис. 1. Внешний вид лабораторного стенда

Основой разработанного стенда является высоковольтный разъединитель РЛНД-1-10П/200, рассчитанный на напряжение 10 кВ и номинальный ток 200 А. Поворот валов контактной системы разъединителя и его системы заземления осуществляется с помощью механического привода ПРНЗ-10.

Важным компонентом лабораторного стенда является микроомметр, разработанный на кафедре. В стенде микроомметр используется для контроля сопротивлений замкнутых контактов разъединителя. Диапазон измерений составляет от 10 до 1800 мкОм.

Внешне микроомметр состоит из источника тока и измерительного модуля. Измерения осуществляются по четырехпроводному методу Кельвина (рис. 2).



Рис. 2. Схема подключения измеряемого объекта к микроомметру

На измеряемый объект подается постоянный ток 6 А, после чего прибор измеряет падение напряжения, и затем программное обеспечение микроконтроллера по закону Ома выполняет расчет значения сопротивления. Для повышения точности микроомметр проводит 10 измерений подряд и выводит среднее значение результата на дисплей.

В процессе наладки лабораторного стенда была выполнена калибровка микроомметра на нескольких медных проводах разной длины. В результате получены значения абсолютных погрешностей в соответствии с формулой

$$\Delta R_i = R_{\text{изм}i} - R_{\text{расч}i}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер измерения;  $R_{\text{изм}i}$  – значения сопротивлений, измеренные микроомметром;  $R_{\text{расч}i}$  – расчетные значения сопротивлений использованных медных проводов.

Полученные значения приведены в таблице.

#### Результаты градуировки микроомметра

$R_{\text{расч}i}$ , мкОм	$R_{\text{изм}i}$ , мкОм	$\delta$ , %
94,8	94,8	0
158	153,7	-2,8
259,1	248,1	-4,4
290,7	279,8	-3,9
413,3	396,5	-4,2
685	687,7	0,4

Из таблицы следует, что максимальная относительная погрешность измерения сопротивления  $\delta$  не превышает 5 %. Это значит, что класс точности разработанного прибора приблизительно равен 5.

На разработанном лабораторном стенде были проведены измерения сопротивлений главных контактов разъединителя при помощи микроомметра. В результате для полностью замкнутых контактов сопротивление первого полюса составило 138,3 мкОм,

второго – 132,1 мкОм, третьего – 117,6 мкОм. Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемый разъединитель РЛНД-1-10П/200 не соответствует требованиям ГОСТ Р 52726–2007, по которым максимально допустимым является сопротивление замкнутых главных контактов, равное 120 мкОм.

Далее были рассчитаны потери в контактах разъединителя, которые наблюдались бы при протекании через него номинального тока  $I = 200$  А. Потери рассчитывались без учета повышения сопротивления при нагревании контактов из-за протекающего тока по формуле

$$P_{\text{потр}} = I^2(R_1 + R_2 + R_3), \quad (2)$$

где  $R_1 - R_3$  – значения сопротивлений главных контактов разъединителя.

В результате суммарные потери составили 15,5 Вт.

Тогда годовые потери электроэнергии вычисляются по формуле

$$W = P_{\text{потр}} t_{\text{г}} = 15,5 \cdot 8760 = 135,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{г}}$  – количество часов в году, равное 8760.

В финансовом выражении это эквивалентно 32,7 бел. руб. (при стоимости – 0,2459 бел. руб. за 1 кВт·ч. Исходя из данных расчетов можно сделать вывод о том, что разъединители имеют достаточно низкие энергетические потери, но это не отменяет важности контроля их сопротивлений.

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ В ОДНОФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Р. Ш. Шипецкий**

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

Научный руководитель Д. И. Зализный

*Рассмотрены два вида алгоритмов расчёта активной мощности в программном обеспечении современных измерительных приборов: с разложением в ряд Фурье и без этого разложения. Показано, что при выполнении условий теоремы Котельникова эти алгоритмы практически равноценны, однако второй тип алгоритма значительно менее требователен к вычислительным ресурсам измерительного прибора.*

**Ключевые слова:** активная мощность, алгоритм, ряд Фурье, период дискретизации, точность.

Существует два метода расчета активной мощности нагрузки электрической сети по измеренным значениям напряжения и тока:

– на основе действующих значений напряжения и тока с разложением в ряд Фурье;

– на основе мгновенных значений напряжения и тока.

В рамках первого метода расчет выполняется за один период напряжения сети  $T$  по формуле



$$P = \sum_{j=1}^k \frac{U_{m,j}}{\sqrt{2}} \frac{I_{m,j}}{\sqrt{2}} \cos(\Delta\varphi_j), \quad (1)$$

где  $j$  – номер гармонической составляющей;  $k$  – количество учитываемых гармонических составляющих;  $U_{mj}$ ,  $I_{mj}$  – амплитудные значения соответственно  $j$ -й гармонической составляющей напряжения и тока;  $\Delta\varphi_j$  – разность фаз  $j$ -х гармонических составляющих напряжения и тока.

По второму методу расчетная формула записывается следующим образом:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \quad (2)$$

где  $T$  – период напряжения электрической сети;  $u(t)$ ,  $i(t)$  – соответственно мгновенные значения напряжения и тока.

Для того чтобы использовать формулу (2) в программном обеспечении измерительного прибора, необходимо от интеграла перейти к приближенной сумме:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \approx \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n U_i I_i \Delta t = \frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^n U_i I_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i I_i, \quad (3)$$

где  $i$  – номер отсчета (выборки) в процессе дискретизации напряжения и тока;  $n$  – количество отсчетов (выборок) за период  $T$ ;  $\Delta t$  – период дискретизации;  $U_i$ ,  $I_i$  – соответственно отсчеты (выборки) напряжения и тока.

Для сравнения точности алгоритмов (1) и (3) выполним имитационное моделирование в пакете Mathcad. Будем задавать различные значения периода дискретизации  $\Delta t$  и сравнивать результаты расчетов по формулам (1), (3) с исходным значением, полученным по формуле (2).

В качестве исходных данных примем сумму трех гармонических составляющих (первой, третьей и седьмой) для напряжения и для тока в соответствии со значениями, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Параметры исследуемых сигналов

Частота гармоники, Гц	50	150	250
$U_m$ , В	300	10	5
$\varphi_U$ , град	0	0	0
$I_m$ , А	5	2	1
$\varphi_I$ , град	-30	-10	10

Параметры гармонических составляющих подбирались таким образом, чтобы полученные диаграммы напряжения и тока по форме соответствовали реальным: напряжение – близким к наблюдаемому в ГГТУ им. П. О. Сухого, а ток – приблизи-

тельно таким, который потребляют электронные приборы. Полученные диаграммы показаны на рис. 1.

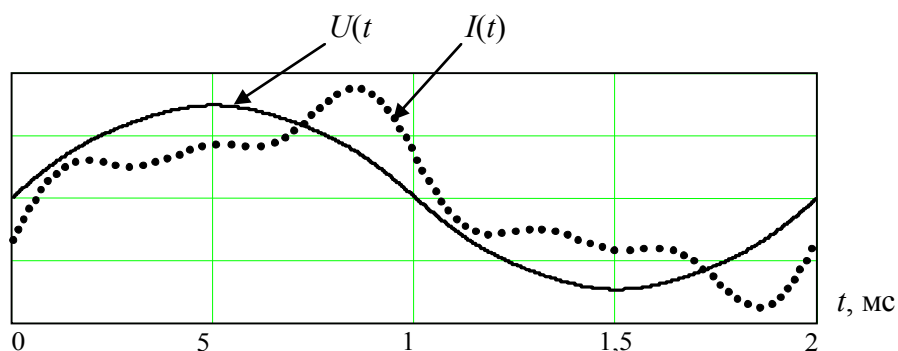


Рис. 1. Исследуемые сигналы тока и напряжения

Для исследований влияния значения периода дискретизации на результаты расчетов в программе Mathcad вначале были получены кривые, показанные на рис. 1, за период сети 20 мс. Затем при меньших значениях  $n$  выполнялись выборки значений напряжения и тока с требуемым периодом дискретизации, далее проводилось разложение полученных сигналов в ряд Фурье. После этого проводился расчёт активной мощности по алгоритмам (1) и (3). Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Результаты расчета активной мощности

$n$	10000	100	10	5	4
$P$ по алгоритму (1), Вт	661,823	661,817	659,306	1318	1481
$P$ по алгоритму (3), Вт	661,823	661,817	659,305	659,245	493,529

Из табл. 2 следует, что если выполняются требования теоремы Котельникова, т. е. количество точек на период  $n$  в процессе дискретизации в два раза и более превышает номер учитываемой высшей гармоники, то погрешности расчета незначительны по обоим алгоритмам. В рассматриваемом примере учитывается пятая высшая гармоника и достаточно получить только 10 точек на период, что и подтверждается данными в табл. 2. При снижении значения  $n$  ниже требований теоремы Котельникова алгоритм (3) оказывается более точным.

Итак, окончательно можно сделать выводы, что алгоритмы (1) и (3) практически равноценны по точности расчетов вне зависимости от значения периода дискретизации, если выполняются условия теоремы Котельникова. Однако несомненным преимуществом алгоритма (3) перед алгоритмом (1) является отсутствие необходимости выполнять разложение в ряд Фурье, что значительно повышает скорость расчетов и снижает требования к аппаратной части измерительного прибора.

#### Литература

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 638 с.

2. Зализный, Д. И. Микроэлектронные и микропроцессорные устройства в энергетике : учеб. пособие / Д. И. Зализный. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 194 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВЕТОДИОДОВ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

К. А. Агунович

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

Научные руководители: А. И. Кравченко, Т. Н. Савкова

*Получено выражение для расчета остаточного ресурса светодиодов осветительной установки. Проведен расчет остаточного ресурса светодиода для температур активной области в диапазоне 85–150 °С при токах инжекции от 0,35 до 0,7 А. Показано, что нормированное, гарантированное значение срока службы 50000 ч соответствует режиму работы светодиода при токе инжекции 0,375 А с температурой перехода около 91 °С.*

**Ключевые слова:** остаточный ресурс, срок службы, светодиод, температура активной области, ток инжекции, осветительное устройство.

Надежность и срок службы светодиодных осветительных устройств зависят от различных факторов. К наиболее важным из них следует отнести влажность, температуру, ток и напряжение питания, механическое и химическое воздействия, световое излучение. Один или несколько факторов могут привести к полному отказу осветительного устройства или повлиять на характеристики старения в долгосрочной перспективе и таким образом вызвать изменение надежности и срока службы светодиодных источников света. Определение остаточного ресурса светодиодной осветительной установки в реальном времени может повысить эксплуатационную надёжность систем освещения, а также позволит своевременно осуществлять их замену. Для оценки срока службы светодиодов (СД) на основе предложенной в [1–3] методики учета остаточного ресурса СД в осветительной установке рассматривались различные режимы работы СД ARPL-3W6000

Чтобы спрогнозировать остаточный ресурс светодиодов светодиодной осветительной установки (ОС), используем коэффициент оптического и теплового износа  $f_i$ , который находится по выражению

$$f_i = \frac{E_{\Delta t_i}}{E_{\text{норм}}}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{норм}}$  – нормированное значение срока службы СД;  $E_{\Delta t_i}$  – значение остаточного ресурса светодиодной осветительной установки за период дискретизации по закону Аррениуса для  $i$ -го измерения.

Тогда время выработки светодиодной осветительной установки за период дискретизации  $\Delta t_i$  равно:

$$E_{\text{выпр}i} = \frac{\Delta t_i}{f_i}. \quad (2)$$

Остаточный ресурс определяем по выражению

$$E_{\text{ост}} = E_{\text{норм}} - E_{\text{выр}}, \quad (3)$$

где  $E_{\text{выр}}$  – время выработки.

Таким образом, формула для расчета остаточного ресурса светодиодной осветительной установки будет иметь окончательное выражение:

$$E_{\text{ост}} = E_{\text{норм}} - \sum_{i=1}^n E_{\text{выр}i} = E_{\text{норм}} - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i E_{\text{норм}}}{A} e^{BT_i}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество периодов дискретизации;  $A$  и  $B$  – коэффициенты, характеризующие скорость теплового износа СД;  $T_i$  – средние температуры активной области СД для  $i$ -го измерения. Для определения остаточного ресурса СД осветительной установки воспользуемся законом Аррениуса. На основании закона составим систему уравнений:

$$\begin{cases} E_1 = Ae^{-BT_1}; \\ E_2 = Ae^{-BT_2}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты, которые необходимо рассчитать исходя из сроков службы СД  $E_1 = 250000$  ч и  $E_2 = 75000$  ч по уровню снижения светового потока на 50 % при температурах активной области СД  $T_1 = 61$  °С и  $T_2 = 84$  °С. Подставляя в выражение (5) численные значения  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $T_1$  и  $T_2$ , получим  $A = 6091235,45$  ч и  $B = 0,052346644$  1/°С. Затем, подставив в выражение (5) значения коэффициентов  $A$  и  $B$ , а также нормированное значение срока службы – 50000 ч и время дискретизации – 2500 ч, получим выражение для расчетов остаточного ресурса СД осветительной установки:

$$E_{\text{ост}} = 50000 - \sum_{i=1}^n \frac{2500 \cdot 50000}{6091235,45} e^{0,052346644 \cdot T_i}. \quad (6)$$

Как видно, остаточный ресурс СД и осветительной установки в конечном счёте определяется температурой активной области (АО) СД. Определение температуры активной области проводилось в работах [4, 5] калориметрическим способом с использованием экспериментальной установки, основными элементами которой являются: калориметр, микроконтроллер, блок питания и персональный компьютер. Температура активной области СД  $T_j$ , находилась исходя из того, что тепловая энергия, приходящая от активной области путем теплопередачи на поверхность линзы и корпус, или других элементов СД в условиях стационарного режима, рассеивается в окружающую среду тепловым излучением и конвекционными потоками. Температура АО СД определяет температуры элементов СД и ОС в целом, является основным параметром, от которого зависит надежность и срок службы светодиодных ОС.

Расчет остаточного ресурса проводился для светодиода ARPL-3W6000 для температур активной области в диапазоне 85–150 °С при токах инжекции от 0,35 до 0,7 А по формуле (6), а результаты расчета представлены в таблице. Для температуры  $T_j = 150$  °С остаточный ресурс оказался равным 2369 ч.

## Результаты расчета остаточного ресурса светодиода ARPL-3W6000

За время, ч	Остаточный ресурс, часов						
	$E_{ост}$ при $T_{j1} = 85\text{ °C}$	$E_{ост}$ при $T_{j2} = 90\text{ °C}$	$E_{ост}$ при $T_{j3} = 100\text{ °C}$	$E_{ост}$ при $T_{j4} = 110\text{ °C}$	$E_{ост}$ при $T_{j5} = 120\text{ °C}$	$E_{ост}$ при $T_{j6} = 130\text{ °C}$	$E_{ост}$ при $T_{j7} = 140\text{ °C}$
2500	48243,8	47396,3	47396,3	43499,8	39028,5	31481,5	18743,2
5000	46487,5	44792,6	44792,6	36999,5	28056,9	12963,0	–
7500	44731,3	43155,0	38446,5	30499,3	17085,4	–	–
10000	42975,0	40873,3	34595,4	23999,1	6113,8	–	–
12500	41218,9	38591,7	30744,2	12500,8	–	–	–
15000	39462,0	36310,0	26893,1	10998,6	–	–	–
17500	37706,4	34028,3	23041,9	5798,4	–	–	–
20000	35950,2	31746,7	19190,8	–	–	–	–
22500	34193,9	29465,0	15339,6	–	–	–	–
25000	32437,7	27183,3	11488,5	–	–	–	–
27500	30681,5	24901,7	7637,3	–	–	–	–
30000	28925,2	22620,0	3786,2	–	–	–	–
32500	27169,0	20338,3	–	–	–	–	–
35000	24412,8	18056,7	–	–	–	–	–
37500	23656,6	15775,0	–	–	–	–	–
40000	21899,6	13493,4	–	–	–	–	–
42500	20144,1	11211,7	–	–	–	–	–
45000	18387,9	8930,0	–	–	–	–	–
47500	16631,6	6648,4	–	–	–	–	–
50000	14875,4	4366,7	–	–	–	–	–

Из таблицы видно, что рассчитанные режимы работы светодиода и светодиодного осветительного устройства в целом подтверждают гарантированный срок службы, равный 50000 ч при температурах АО ниже 85 °С и около 90 °С. Как установлено, при токе инжекции 0,375 А (температура АО – 91,7 °С) срок службы будет соответствовать нормированному производителем времени срока службы около 50000 ч.

Таким образом, получена формула для расчета остаточного ресурса светодиода ARPL-3W6000. Рассчитан остаточный ресурс при работе светодиода в течение 2500–50000 ч для токов инжекции 0,35–0,7 А, что соответствует температуре АО в пределах 85–150 °С.

## Литература

1. Савкова, Т. Н. Автоматизация расчета остаточного ресурса светодиодных осветительных установок / Т. Н. Савкова / Вестн. Беларус.- Рос. ун.-та. – 2020. – № 4. – С.32–36.
2. Автоматическая система контроля остаточного ресурса светодиодного светильника/ Т. Н. Савкова [и др.] // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого,

- Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2020. – С. 198–200.
3. Савкова, Т. Н. Прогнозирование остаточного ресурса светодиодного светительного устройства / Т. Н. Савкова, Г. И. Селиверстов Ю. Н. Колесник // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., Прокопьевск, 13–14 апр. 2022 г. / КузГТУ. – Прокопьевск, 2020. – С. 166–169.
  4. Савкова, Т. Н. Калориметрический способ определения тепловых характеристик мощных светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Ю. Н. Колесник // Естеств. и техн. науки. – 2016. – № 11. – С. 152–155.
  5. Colorimetric method of determining the temperature of the active region of high-power leds / T. Savkova [et al.] // Danish scientific journal. – 2018. – Vol. 2, N 18. – P. 32–36.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА И ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

В. Ю. Шлегель

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Направлена на сравнение тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина и паросиловых установок. Разработанная схема полигенерации позволяет вырабатывать не только электричество, теплоту и холод, но и дополнительно производить углекислоту в жидком и газообразном состоянии. При помощи разработанной запатентованной программы по моделированию полигенерационных установок произведен эксергетический анализ когенерационного, тригенерационного и полигенерационного способов утилизации вторичных энергетических ресурсов. Получены экономические показатели исследуемых вариантов схем. Проведен их технико-экономический анализ. Наилучшими технико-экономическими показателями обладает полигенерационная установка на диоксиде углерода с динамическим сроком окупаемости 3,2 года при ставке дисконтирования 10 %.*

**Ключевые слова:** тригенерационная установка на органическом цикле Ренкина, паросиловая установка.

В работе предложены схемы тригенерационного и полигенерационного способов утилизации вторичных энергетических ресурсов на базе турбин на органическом цикле Ренкина с промежуточным перегревом и сверхкритическими параметрами рабочего тела. В качестве рабочих тел схем тригенерации и полигенерации рассматривались озонобезопасный хладагент R410A и диоксид углерода соответственно. Полезное использование полученной из продуктов сгорания углекислоты позволяет снизить выбросы диоксида углерода в атмосферу. Для сравнения предложена когенерационная схема с классическим циклом Ренкина на водяном паре. Получены экономические показатели исследуемых вариантов схем и осуществлен их технико-экономический анализ.

Все более широкое применение в малой энергетике находят схемы на органическом цикле Ренкина (ОЦР) (рис. 1), в котором в качестве рабочих тел используются органические вещества с более низкой, чем у воды температурой кипения.

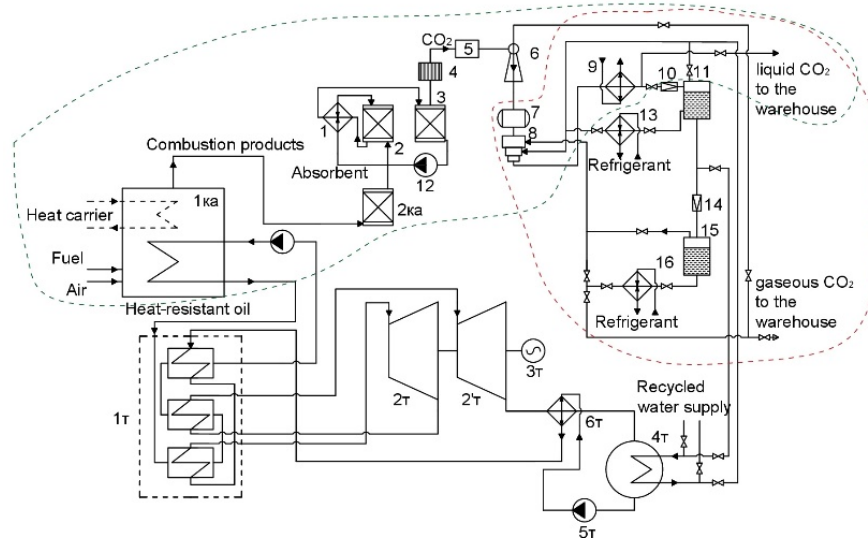


Рис. 1. Схема на органическом цикле Ренкина

Разработана схема полигенерационной установки (рис. 1), которая объединяет в себе ОЦР-установку и установки по производству углекислоты и холода: котлоагрегат  $1ka$ , турбина  $2t$ , где генератор  $3t$  – часть низкого давления турбины  $2't$ , теплообменный аппарат  $6t$ , конденсатор  $4t$ , насос  $5t$ , очистительная установка  $2ka$ , абсорбер  $2$ , затем десорбер  $3$ , инжектор  $6$ , ресивер  $7$ , компрессор  $8$ , теплообменник-конденсатор  $9$ , регулирующий вентиль  $10$ , сепаратор  $11$ , теплообменник-испаритель  $13$ , ступень дросселирования  $14$ , сепаратор  $15$ , теплообменник-испаритель  $16$ .

**Термодинамический и технико-экономический анализ.** Для проведение термодинамического анализа когенерационных, тригенерационных и полигенерационных турбоустановок разработана программа (рис. 2). Она позволяет рассчитывать все варианты схем и определять термодинамически оптимальные параметры рабочего тела для ОЦР.

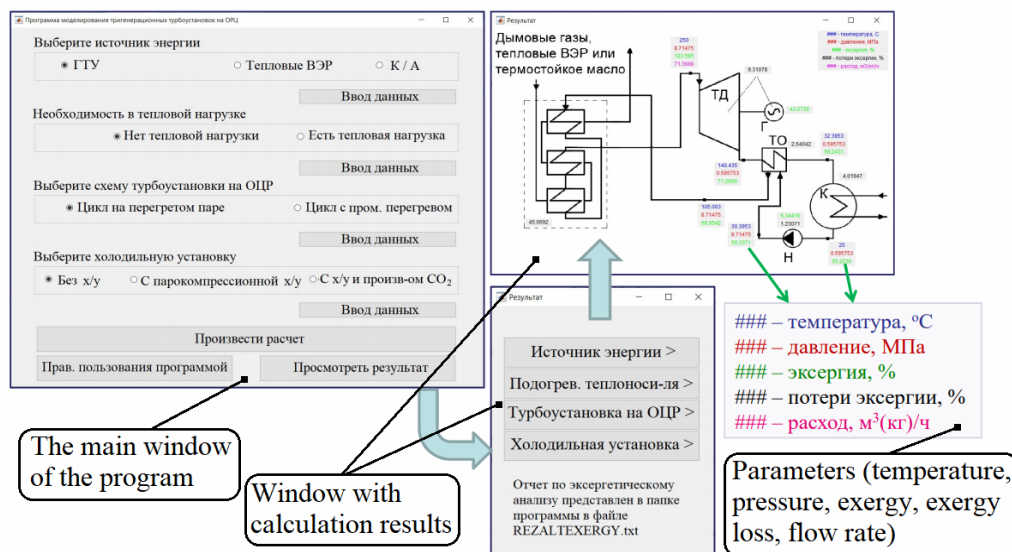


Рис. 2. Программа для проведение термодинамического анализа когенерационных, тригенерационных и полигенерационных турбоустановок

**Полученные результаты и их анализ.** Результаты термодинамического и технико-экономического анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты термодинамического и технико-экономического анализа**

Показатель	Способ утилизации вторичных энергетических ресурсов		
	Когенерация	Тригенерация	Полигенерация
Отпуск электрической энергии, $\times 10^3$ МВт · ч/год	11,3	13,7	11,8
Отпуск тепловой энергии, $\times 10^3$ МВт · ч/год	7,4	7,4	7,4
Отпуск холода (+4 °С), $\times 10^3$ МВт · ч/год	–	1,5	1,5
Отпуск холода (–18 °С), $\times 10^3$ МВт · ч/год	–	2,2	2,2
Отпуск жидкого CO <sub>2</sub> , $\times 10^3$ т/год	–	–	1,4
Отпуск газообразного CO <sub>2</sub> , $\times 10^3$ т/год	–	–	2,8
Экономический эффект, $\times 10^6$ \$/год	1,3	1,6	2,2
Стоимость установки, $\times 10^6$ \$	2,3	2,5	3,3
Расходы на эксплуатацию, $\times 10^6$ \$/год	0,2	0,2	0,3
Статический срок окупаемости, лет	4,9	3,5	2,6
Внутренняя норма доходности, %	19,7	28,5	37,9
Динамический срок окупаемости, лет	7,1	4,5	3,2
Чистый дисконтированный доход, $\times 10^6$ \$	1,6	3,7	7,3

Из табл. 2 следует, что все варианты схем утилизации вторичных энергетических ресурсов обладают приемлемыми технико-экономическими показателями и могут быть использованы на предприятиях. Наименьшая эффективность у когенерационной паросиловой установки на водяном паре с динамическим сроком окупаемости 7,1 года при ставке дисконтирования 10 %. Срок окупаемости установки (динамический срок окупаемости снижается с 7,1 до 4,5 года). Наилучшими показателями обладает полигенерационная установка на диоксиде углерода. Несмотря на снижение количества отпускаемой электрической энергии, такая компоновка схемы позволяет производить углекислоту в жидком и газообразном состоянии в объеме 4,2 тыс. т в год, что положительно сказывается на экологической безопасности предприятия и улучшает его экономические показатели, а динамическим сроком окупаемости установки снижается с 4,5 года (для тригенерации) до 3,2 года.

Таким образом, разработанная схема полигенерации является наилучшим из предлагаемых вариантов утилизации вторичных энергетических ресурсов, и не только обладает хорошими экономическими показателями эффективности (статический срок окупаемости – 2,6 года; динамический срок окупаемости – 3,2 года; чистый дисконтированный доход – 7,3 млн долл. США; внутренняя норма доходности – 37,9 %), но и дает возможность полезно использовать выбрасываемый в атмосферу диоксид углерода, тем самым снижая углеродный след предприятия.



## Литература

1. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. общ. СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.
2. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.
3. Ключинский, В. П. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2020. – С. 130–132.

## ТРИГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

И. О. Свидинский

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Рассмотрено изучение способов повышения энергетической эффективности тепло-энергоустановок и снижения их тепловых потерь. Исследования проведены для четырех схем турбодетандерного цикла. Были изучены принципы их работы, а также принцип работы тригенерационной турбодетандерной установки на сверхкритических параметрах тела.*

**Ключевые слова:** тригенерация, хладагент, энергоэффективность, исследование, фреон.

В настоящее время особое внимание уделяется поиску наиболее эффективных и безопасных рабочих тел для энергетических установок прямого и обратного циклов. Одними из таких рабочих тел являются природные хладагенты, в частности, диоксид углерода. Точка зрения о вреде фреонов и пользе натуральных хладагентов в настоящее время стала доминирующей как в ЕС, так и во всем мире.

На рис. 1 представлены теоретические циклы турбодетандерного и углекислотного контуров в диаграмме  $\lg p$ – $b$  с полным промежуточным охлаждением.

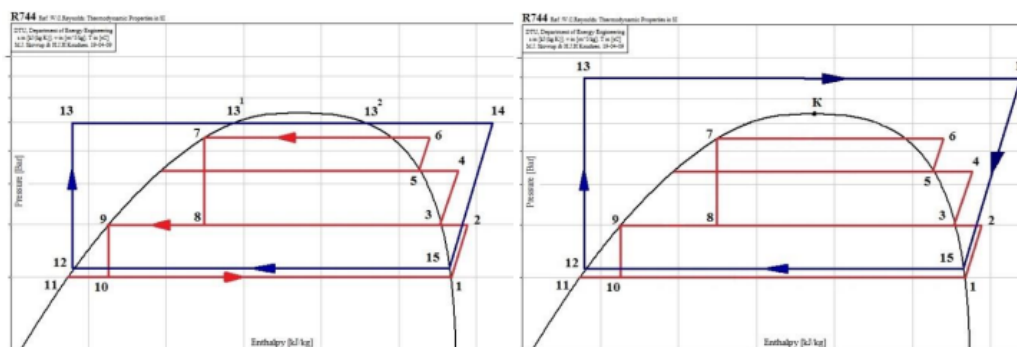


Рис. 1. Теоретические циклы турбодетандерного и углекислотного контуров в диаграмме  $\lg p$ – $b$  с полным промежуточным охлаждением

Циклы состоят из следующих процессов: *12–13* – повышение давления жидкого  $\text{CO}_2$  в насосе *16*; *13–131* – нагрев жидкого  $\text{CO}_2$  до температуры кипения в испарителе *11*; *131–132* – изобарно-изотермический процесс кипения  $\text{CO}_2$  в испарителе *11*; *13–14* – перегрев газообразного  $\text{CO}_2$  в перегревателе *10*; *14–15* – адиабатное расширение газообразного  $\text{CO}_2$  в турбодетандере *12*; *15–12* – изобарно-изотермический процесс конденсации диоксида углерода в конденсаторе *13*. Для холодильного цикла: процесс *1–2* – адиабатное сжатие газообразного  $\text{CO}_2$  в компрессоре первой ступени; *2–3* – охлаждение  $\text{CO}_2$  перед компрессором второй ступени; *3–4* – адиабатное сжатие  $\text{CO}_2$  в компрессоре второй ступени; *4–5* – промежуточное охлаждение  $\text{CO}_2$  перед компрессором третьей ступени; *5–6* – адиабатное сжатие  $\text{CO}_2$  в компрессоре третьей ступени; *6–7* – охлаждение и конденсация газообразного  $\text{CO}_2$  в конденсаторе *9*; *7–8* – первое адиабатное дросселирование жидкого диоксида углерода в дросселе *20* в сепараторе *22*; *9–10* – второе адиабатное дросселирование  $\text{CO}_2$  в дросселе *21* в сепараторе *23*; *11–1* – кипение жидкого  $\text{CO}_2$  в конденсаторе-испарителе *13*.

При расчете и анализе цикла турбодетандерной установки необходимо рассмотреть прямой цикл генерации тепловой и электрической энергии в теплофикационном контуре и в турбодетандерном контуре и обратный трехступенчатый цикл производства жидкой и газообразной углекислоты и генерации холода. Тригенерационная установка дополнительно включает в себя испарители *27* и *28*. Испаритель *27* работает при температуре кипения  $T_{01}$ , соответствующей давлению насыщения  $P_{01}$ , а испаритель *28* – при температуре кипения  $T_{02}$ , соответствующей давлению  $P_{02}$ . Газообразный  $\text{CO}_2$  из сепаратора *22* и испарителя *27* и из сепаратора *23* и испарителя *28* поступает соответственно на вторую и первую ступени компрессора *8*.

Совершенствование и повышение энергетической эффективности теплоэнергостановок связано с разработкой и внедрением парогазовых установок (ПГУ) утилизационного типа. При этом, в частности, достигается высокое значение КПД по отпуску электрической энергии. Кроме того, дополнительными преимуществами ПГУ с котлами-утилизаторами являются низкий уровень выбросов  $\text{NO}_x$  в атмосферу и малая потребность установки в охлаждающей воде [4, 5]. Одним из основных направлений совершенствования парогазовых энергоустановок является внедрение промежуточного перегрева пара (газа), частично отработавшего в турбодетандере [8, 9]. Это позволяет повысить КПД турбодетандера за счет подвода к газу дополнительного количества теплоты, в результате чего возрастает полезный теплоперепад в турбодетандере. Это приводит к росту электрической мощности турбодетандерной установки и увеличению отпуска электрической энергии. Кроме того, увеличивается степень сухости газообразного диоксида углерода на лопатках последней ступени турбодетандера, что повышает надежность и долговечность работы его лопаток [9].

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложены технологические схемы турбодетандерных тригенерационных установок с циклом на основе диоксида углерода и производством жидкой и газообразной углекислоты, работающие на докритических параметрах. Холод, произведенный на тригенерационных установках, может быть использован в летний период при хладоснабжении систем вентиляции и кондиционирования воздуха промышленных и общественных зданий и сооружений, а также для целей охлаждения, замораживания и хранения продукции различного назначения.

2. Приведена методика термодинамического расчета циклов установок и их эксергетический анализ. Эксергетический КПД тригенерационной установки с ПГУ с котлом-утилизатором больше эксергетического КПД установки на вторичных энер-

горесурсах за счет большего количества выработанной электроэнергии при одинаковых начальных и конечных параметрах.

#### Л и т е р а т у р а

1. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. – 2016. – № 6. – С. 36–43.
2. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 2. – С. 41–51.
3. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. А. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2019. – Т. 62, № 1. – С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>
4. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокиспящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.
5. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокиспящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2020. – Т. 63, № 6. – С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>
6. Трухний, А. Д. Стационарные паровые турбины / А. Д. Трухний. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.
7. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 295 с.
8. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек ; под ред. В. М. Бродянского. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
9. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1968. – 280 с.

### ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НА ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТАХ

Н. С. Грищенко

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Рассмотрено изучение способов повышения эффективности турбодетандерного цикла на низкокиспящих рабочих телах. Исследования проведены для четырех схем турбодетандерного цикла. Были изучены принципы их работы, а также принцип работы тригенерационной турбодетандерной установки на низкокиспящих рабочих телах.*

**Ключевые слова:** тригенерация, хладагент, низкокиспящие рабочие тела, исследование, фреон.

Тригенерация – эффективный способ удовлетворения потребителей электроэнергией, теплом и холодом, необходимыми в различных отраслях промышленности (для реализации технологических процессов), а также в сфере услуг и жилищно-коммунальном хозяйстве. В определенных условиях тригенерация позволяет снизить затраты топливно-энергетических ресурсов и улучшить экологические показатели генерирующих установок.

Целью данной работы является изучение способов повышения эффективности турбодетандерного цикла на низкокиспящих рабочих телах (НКРТ).

В зависимости от наклона линии насыщенного пара на  $T-s$ -диаграмме НКРТ можно разделить на «сухие», «влажные» и «изоэнтропные».

**Исследуемые схемы и принцип их работы.** Исследования проводились для четырех схем турбодетандерного цикла: без перегрева НКРТ (рис. 1, а); с однократным перегревом (рис. 1, б); с двукратным перегревом (рис. 1, в); с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах (рис. 1, г).

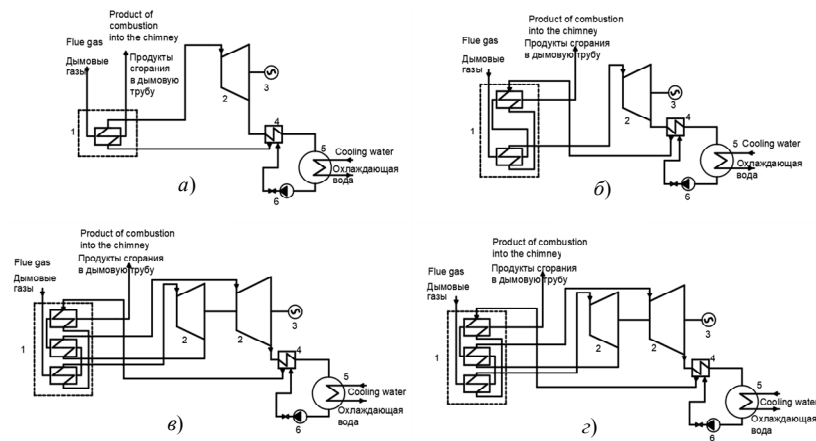


Рис. 1. Исследуемые схемы турбодетандерного цикла

В качестве НКРТ принят озонобезопасный фреон R236EA, имеющий «сухую» характеристику линии насыщения, нулевой потенциал разрушения озонового слоя и потенциал глобального потепления, равный 1370 за 100 лет.

Схема тригенерационной турбодетандерной установки дана на рис. 2.

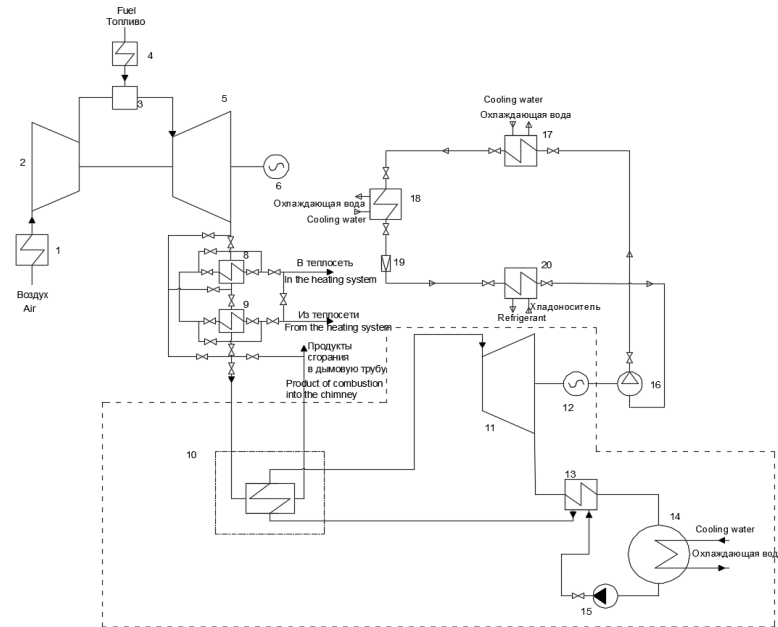


Рис. 2. Схема тригенерационной турбодетандерной установки на озонобезопасных хладагентах:

1, 4, 13 – теплообменник; 2 – компрессор газотурбинной установки; 3 – камера сгорания; 5 – газовая турбина; 6, 12 – генератор; 8, 9 – подогреватель сетевой воды; 10 – котел-утилизатор; 11 – турбодетандер; 14 – конденсатор; 15 – насос; 16 – компрессор; 17 – конденсатор парокompрессионной холодильной машины; 18 – переохладитель; 19 – дроссель; 20 – испаритель

**Результаты исследований.** Приняв эксергию продуктов сгорания, поступающих в котел-утилизатор, за единицу, можно найти относительное распределение потерь эксергии по элементам исследуемых циклов [2].

Для удобства анализа полученных данных представим результаты в виде диаграммы Грассмана–Шаргута (рис. 3) [1].

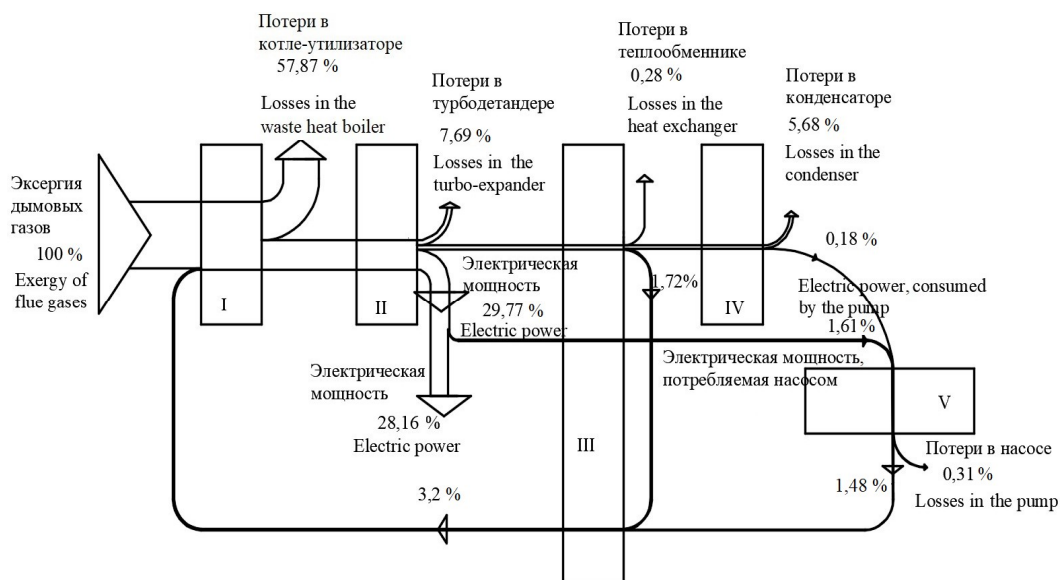


Рис. 3. Диаграмма Грассмана–Шаргута для турбодетандерного цикла без перегрева низкокипящего рабочего тела:

I – котел утилизатор; II – турбодетандер; III – теплообменник; IV – конденсатор; V – насос

Как видно из диаграмм на рис. 3, однократный и вторичный перегрев НКРТ в конечном итоге приводят к увеличению эксергетического КПД с 28,16 до 36,22 % и с 36,22 до 37,20 % соответственно. Это связано, в первую очередь, со снижением потери эксергии в котле-утилизаторе и увеличением эксергии, превращаемой в электрическую энергию в турбодетандере [4]. Увеличение параметров рабочего тела приводит и к увеличению регенерации эксергии в теплообменнике.

Таким образом, основные потери, оказывающие существенное влияние на эксергетический КПД, происходят в котле-утилизаторе. Повышение параметров низкокипящих рабочих тел, а также использование промежуточного перегрева приводят к снижению потерь в котле-утилизаторе и, как следствие, к повышению эксергетического КПД турбодетандерного цикла. Наибольшим эксергетическим КПД из исследуемых схем обладает турбодетандерный цикл с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах НКРТ.

#### Литература

1. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. – 2016. – № 6. – С. 36–43.
2. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 2. – С. 41–51.
3. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. А. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2019. – Т. 62, № 1. – С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>

4. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкотемпературной газотурбодетандерной установки / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вест. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОЛОЧНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ С ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ И СВЕТОДИОДНЫМИ ЛАМПАМИ

Е. В. Акулова, А. В. Ванкович

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

Научный руководитель Л. И. Евминов

*Представлены результаты экспериментального исследования потолочных светильников с газоразрядными и светодиодными лампами. Определены электрические и световые характеристики и выполнено их сравнение.*

**Ключевые слова:** источники света, газонаполненные лампы, светодиодные лампы, электрические и световые характеристики.

Эффективное использование электроэнергии – одна из главных задач энергосистемы Республики Беларусь. В этих целях реализуется Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. В рамках подпрограммы 1 «Повышение энергоэффективности» [1] предусмотрена модернизация систем освещения мест общего пользования жилых домов с внедрением энергоэффективных осветительных устройств, в том числе светодиодных, и автоматических систем управления освещением.

Целью данной работы является сравнительный анализ электрических показателей двух видов светильников: люминесцентного и светодиодного для выявления более экономичного варианта.

Для каждого светильника в соответствии со схемой эксперимента (рис. 1) были выполнены измерения следующих величин: напряжения  $U$ , тока  $I$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$ . На основании полученных данных рассчитаны значения активной мощности  $P$ .

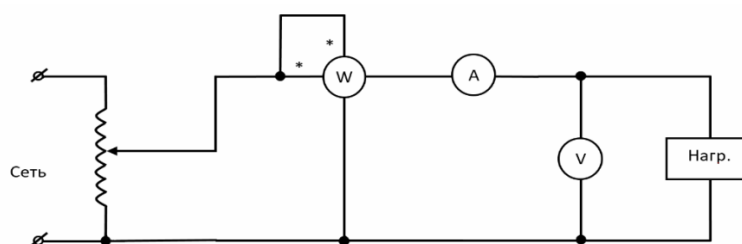


Рис. 1. Схема эксперимента

Регулирование напряжения сети производилось с помощью ЛАТРа. Измерения производятся от значения напряжения 220 В до напряжения угасания светильника. Для газоразрядного светильника оно равно 162 В, для диодного – 84 В. Предпоследнее напряжение в табл. 1, 2 – минимальное напряжение, при котором лампы светильника не гаснут. Остальные значения напряжений соответствуют 220 – (5–50) % В,

в зависимости от выбранного диапазона. Результаты эксперимента приведены в табл. 1, 2 и на рис. 2.

Таблица 1

### Электрические параметры газоразрядного светильника

$U, В$	220	209	198	187	176	165	162
$I, А$	0,375	0,370	0,350	0,335	0,320	0,310	0
$\cos\varphi$	0,999	0,993	0,969	0,906	0,809	0,656	0
$P, Вт$	82,42	76,79	67,15	56,76	45,56	33,55	0

Таблица 2

### Электрические параметры светодиодного светильника

$U, В$	220	198	176	154	132	110	94	84
$I, А$	0,215	0,210	0,185	0,175	0,125	0,095	0,085	0
$\cos\varphi$	0,939	0,941	0,927	0,879	0,853	0,848	0,866	0
$P, Вт$	44,41	39,13	30,18	23,69	14,07	8,86	6,92	0

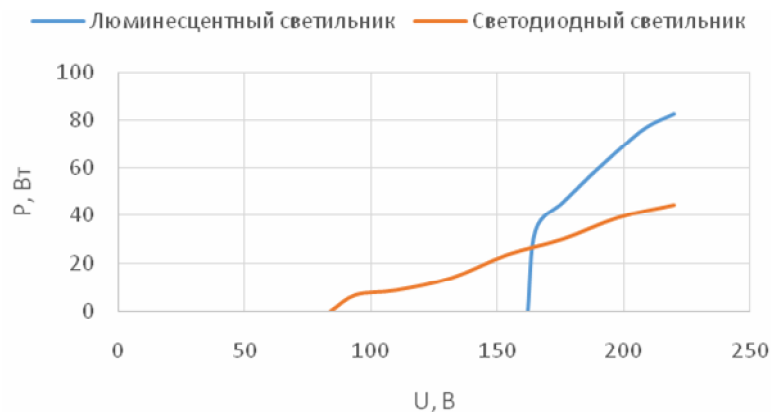


Рис. 2. Зависимость мощности от напряжения

Из анализа полученных результатов следует, что диапазон рабочих напряжений светодиодного светильника вдвое превышает диапазон газоразрядного. Величина потребляемого тока светодиодного светильника выше, чем у газоразрядного при совпадающих значениях напряжений (220, 198, 176 В). Как следствие, – величина мощности светодиодного светильника также выше.

Измерение освещенностей и коэффициентов пульсации производилось в зависимости от напряжений и высот подвеса светильников методом пошаговой фиксации. В опыте применялись метр, вольтметр и ТКА-ПКМ 08 – люксметр, пульсметр. На основании полученных данных построены графики зависимостей  $E = f(v)$  и  $K_{п} = f(v)$  (рис. 3 и 4).

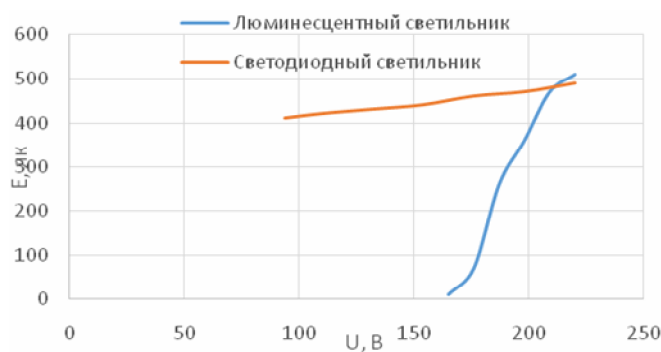


Рис. 3. Зависимость освещенности от напряжения на расстоянии 1 м от светильника

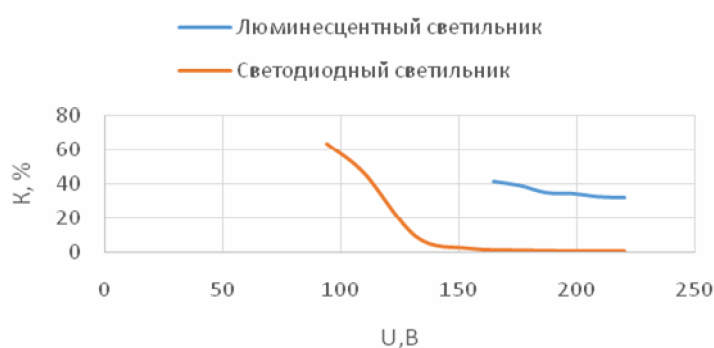


Рис. 4. Зависимость коэффициента пульсации от напряжения на расстоянии 1 м от светильника

Из анализа рис. 3 и 4 можно сделать вывод, что по мере уменьшения напряжения освещенность уменьшается, а коэффициент пульсации увеличивается. При изменении напряжения значения освещенности светодиодного светильника (СД) изменяются меньше, чем значения освещенности люминесцентного светильника. Коэффициент пульсации СД светильника малоподвижен в пределах напряжения от 220 до 150 В, а затем резко возрастает. Коэффициент пульсации люминесцентного светильника более зависим от напряжения, чем светодиодного – при тех же значениях напряжения.

На рис. 5, 6 приведены графики зависимостей напряженности и коэффициента пульсации от расстояния до светильника.

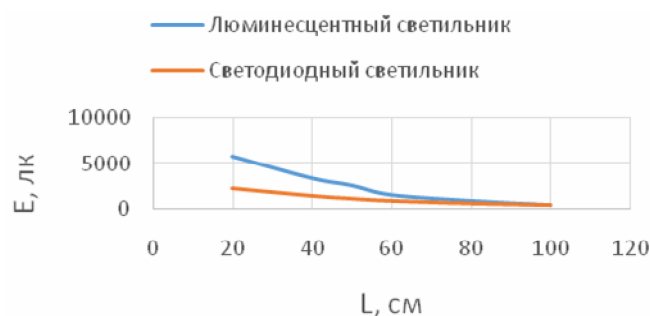


Рис. 5. Зависимость освещенности от расстояния до светильника при  $U = 220$  В



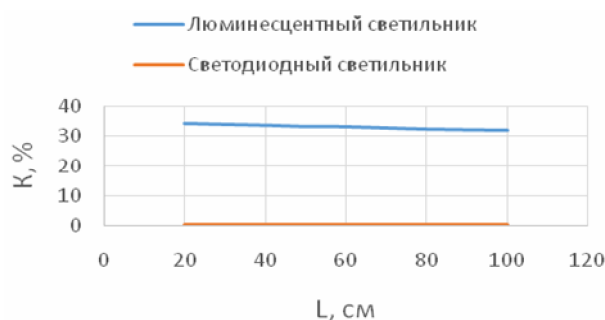


Рис. 6. Зависимость коэффициента пульсации от расстояния до светильника при  $U = 220$  В

Из анализа рис. 5 и 6 следует, что освещенность более 300 лк достигается на всём исследуемом промежутке для обоих светильников. Светодиодный светильник обеспечивает требуемое значение освещенности на всем исследуемом расстоянии при любых значениях напряжения. Люминесцентный светильник перестает обеспечивать требуемое значение освещенности на расстоянии более 80 см при  $U = 187$  В и ниже. Коэффициент пульсации светодиодного светильника одинаков на всем исследуемом расстоянии и равен 0,3 %. Коэффициент пульсации люминесцентного светильника имеет незначительное изменение в пределах от 32 до 34,3 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что светодиодный светильник превзошел люминесцентный как по электрическим, так и по световым характеристикам. Светодиодный светильник потребляет меньшую мощность, обеспечивает равномерную освещённость на всем пути протекания света и имеет низкое значение коэффициента пульсации. Люминесцентный светильник потребляет почти в два раза большее количество мощности, имеет большую зависимость освещенности от напряжения сети и от расстояния до светильника. Исследуемый люминесцентный светильник имеет недопустимое значение коэффициента пульсации, вредное для здоровья человека.

Литература:

1. О государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы : Постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 24 февр. 2021 г., № 103.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

П. А. Батан

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

Научный руководитель С. Г. Жуковец

*Процесс использования электроэнергии является непостоянным во времени, поскольку зависит от желаний потребителей. Мощность нагрузки изменяется в зависимости от технологических процессов, расписания работы предприятий, времени суток и желаний людей воспользоваться электроприборами. Производство энергии осуществляется в режиме, который должен соответствовать потребностям в электроэнергии конечных потребителей. Исходя из этого возникает проблема неравномерности графика нагрузки энергосистемы.*

**Ключевые слова:** неравномерность графиков нагрузки, энергосистема, гравитационный накопитель, его преимущества и недостатки.

Проблема неравномерных графиков электрической нагрузки и связанный с ней перерасход топлива характерны для большинства энергосистем. Сложилась основная пути решения указанной задачи, среди которых можно указать создание оптимальной структуры энергогенерирующих мощностей, использование накопителей, а также привлечение потребителей электроэнергии к выравниванию графиков нагрузки.

Рассмотрим использование накопителей для выравнивая графиков нагрузки энергосистемы.

Накопители энергии предлагается использовать для аккумуляции электроэнергии в ночное время, в часы провала нагрузки энергосистемы, а после отдавать накопленную электроэнергию в сеть в часы пика энергосистемы.

Преимущества накопителей энергии:

- 1) выравнивание дневного и ночного графиков нагрузки – разряд накопителя во время пика нагрузки и зарядка в ночное время;
- 2) помощь установкам, использующим возобновляемые источники энергии – выравнивание графика подачи мощности;
- 3) возможность быстрого замещения вышедшего из работы крупного генератора в энергосистеме;
- 4) питание местных нагрузок, когда с этим не справляется энергосистема.

Одним из способов регулирования графиков нагрузки энергосистемы является использование ГАЭС (гидроаккумулирующие электростанции). Из-за отсутствия необходимого ландшафта в Республике Беларусь потенциал развития такого типа накопителей невелик. Исходя из этого предлагается рассмотреть использование гравитационной батареи.

Гравитационная батарея представляет собой устройство для хранения электроэнергии, которое обладает потенциальной энергией, хранящейся в объекте в результате изменения высоты из-за гравитации.

Принцип ее действия таков. Установка работает, используя избыточную энергию сети, чтобы поднять груз на высоту. В этом случае происходит накопление, когда в сети возникает дефицит электроэнергии груз опускается вниз, тем самым вращая ротор генератора. При этом происходит преобразование механической энергии в электрическую.

Также для накопления энергии можно использовать заброшенные шахты.

Здесь принцип действия следующий. При опускании груза происходит выработка электроэнергии и ее выдача в сеть в моменты пикового потребления. Цилиндрический груз определённой массы размещается в специальной шахте под поверхностью земли с помощью системы тросов, каждый из которых соединен с лебедкой. Приводом лебедки служит обратимая электрическая машина, способная поглощать или вырабатывать электрическую энергию при подъеме или опускании груза соответственно. Груз удерживается в стволе шахты системой тросовых направляющих, которые предотвращают его от раскачивания и повреждения всей установки. Привод подъема и спуска груза имеет высокоточное управление мощностью потребления и генерации энергии.

Коэффициент полезного действия накопителя может достигать 90 %, а срок эксплуатации – 30–40 лет. Из-за большого срока службы установки показатель нормированной стоимости хранения энергии для гравитационной батареи оказался

на 16 % меньше, чем у литий-ионных аккумуляторов, и на 72 % ниже, чем у ГАЭС (согласно данным компании EnergyVault). В отличие от емкостных у гравитационного накопителя энергии не ограничено количество циклов «заряд/разряд» и не снижается номинальная энергоемкость в процессе эксплуатации.

Основные преимущества гравитационного накопителя:

- 1) длительный срок эксплуатации;
- 2) относительно низкая стоимость хранения электроэнергии;
- 3) потери при «разрядке» и «зарядке» – 85 % на цикл;
- 4) нулевые потери электроэнергии при хранении.

Для того чтобы накопить электроэнергию в размере 35 МВ · ч, необходима конструкция высотой 120 м (согласно данным компании EnergyVault), что делает установку громоздкой конструкцией. При поднятии груза на высоту на него будут действовать аэродинамические нагрузки. С целью их исключения необходима постройка дополнительного сооружения, что ведет к удорожанию конструкции. На данный момент непонятно, как можно улучшить технологию. Для примера можно попробовать улучшить характеристики тросов для подъема груза или снизить капиталовложения путем использования более дешевых материалов для создания груза, но это все – на стадии разработки. И последнее – к сожалению, на данный момент в нашей стране нет проектов по созданию гравитационных накопителей.

Основные недостатки гравитационного накопителя:

- 1) громоздкие размеры;
- 2) воздействие аэродинамических нагрузок на систему;
- 3) низкие темпы развития технологии;
- 4) отсутствие исследований данной технологии в Республике Беларусь.

Таким образом, для внедрения такого типа накопителей необходимо существенное субсидирование со стороны государства, а также привлечение зарубежных специалистов.

По сравнению с химическими аккумуляторами производство гравитационных накопителей характеризуется отсутствием вредного влияния на окружающую среду.

### **РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЕРЕКРЕСТКОВ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕНОСНОГО СВЕТОФОРА С ЭЛЕМЕНТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**М. А. Вегера, К. Е. Коршунов, И. Д. Костюченко**

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

Научный руководитель А. А. Капанский

*Представлен альтернативный способ регулирования перекрестков, при плановом и внеплановом отключении электроэнергии. Описаны принцип его действия, применение, достоинства.*

**Ключевые слова:** безопасность, светофор, солнечная панель.

Как пешеходы, так и водители часто сталкиваются с такой проблемой, как непонимание сигналов регулировщика, поэтому одним из приоритетных направлений общего пользования дорожными путями и пешеходными переходами является обеспечение безопасности граждан. Проблема непонимания сигналов регулировщика ведет к повышенной опасности на дорожных участках. В связи с этим мы предлагаем

разработку установки, которая упростит работу регулировщика и соответственно снизит опасность на дорожных участках.

Цель нашей разработки – повышение эффективности системы аварийного регулирования перекрестков за счет внедрения автономного светофора, именуемого «Дорожное регулирующее устройство города» (ДРУГ).

Данная установка представлена на слайде, а именно, ее секционная часть. Она обеспечивает интуитивно понятную подачу сигналов, как для пешеходов, так и для водителей. Принцип действия отталкивается от принципа действия обычного светофора, несмотря на его нестандартный внешний вид. Также следует отметить, что установка будет располагаться в центре перекрестка и по конструктивным особенностям обеспечивать хорошую видимость сигналов для всех участников дорожного движения.

Основным источником питания ДРУГА является литий-ионный аккумулятор. Также установка предполагает вторичный источник энергии в виде солнечной панели, которая, в свою очередь, во время эксплуатации устройства заряжает основной питающий элемент. Литий-ионный аккумулятор широко распространен в современной бытовой электронной технике и находит свое применение в качестве источника энергии в электромобилях.

Существуют ситуации, в которых пересечение проезжих частей небезопасно. Такой ситуацией является отключение питания регулирующих устройств (светофоров), причем как плановое, так и внеплановое. В данной ситуации предусмотрено участие сотрудника ГАИ, который выезжает на участок повышенной опасности и заменяет регулирующее устройство. В ходе работы регулировщика возникают затруднения движения, что задерживает всех участников дорожного движения. Применение ДРУГа позволит снизить загруженность перекрестков, тем самым сохранит время, а самое главное, жизни людей.

Наша установка предусматривает индивидуальное программное обеспечение (ПО), в котором будет устанавливаться тип перекрестка и время задержки сигналов. Тип перекрестка будет выбираться перед включением установки.

Управление автономного светофора предполагается посредством устройства, работающего с этим ПО.

Например, T-образный перекресток, на нем необходимо включить только 3 стороны светофора, следовательно, программно можно отключить ненужную сторону, чтобы она не потребляла энергию. И в любой момент сотрудник ГАИ, находясь в патрульном автомобиле, может с помощью специального оборудования регулировать время задержки сигналов в зависимости от дорожной обстановки. Это необходимо для того, чтобы регулировать загруженность перекрестка.

Передачу информации в систему диспетчерского управления предполагается осуществлять при помощи специализированного канала связи узкополосной сети Интернета вещей по развивающейся технологии NB-IoT, которая активно развивается в Республике Беларусь операторами сотовой связи, к примеру, А1. Данный стандарт имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными, такими, как 2G-4G – низкие энергозатраты и дальность передачи информации.

Нами были проработаны ГОСТ 25695–91 и СТБ 1300–2014. На основе этих документов были установлены такие параметры, как диаметр секции, расстояние между геометрическими осями светофильтров и высота установки от нижней точки корпуса до поверхности проезжей части.

В перспективе после завершения разработки проекта мы хотим донести эту информацию об установке до сотрудников ГАИ для одобрения и принятия ее в законо-

дательно, потому что она будет хорошей альтернативой во время планового и внепланового отключения питания основных светофоров.

#### Литература

1. Sinha, R. S. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT / R. S. Sinha, Y. Wei, S. H. Hwang // Ict Express. – 2017. – Vol. 3, N 1. – P. 14–21.

### КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПРОГРАММА ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ

**М. А. Вегера, К. Е. Коршунов, И. Д. Костюченко**

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

Научный руководитель Н. В. Грунтович

*Представлена компьютерная программа для выявления дефектов в подшипниках качения, рассмотрен принцип действия и преимущества.*

**Ключевые слова:** подшипники, вибродиагностика, спектрограмма, программный комплекс.

Для обеспечения надежности оборудования в республике существует около 190 лабораторий в области технической диагностики, а по вибродиагностики – только 5 лабораторий. Такая наука, как техническая диагностика не изучается при подготовке инженеров-электриков, механиков, энергетиков согласно учебным планам. Специалисты заводских лабораторий обучаются на краткосрочных курсах в республике или за рубежом в зависимости от того, в какой стране приобретается вибродиагностическое оборудование. Поэтому ставятся сложные задачи перед специалистами заводских лабораторий при организации диагностических работ. Прежде всего, это оказывает влияние на качество и достоверность результатов диагностирования.

Подшипники используются во всех устройствах, связанных с электричеством, в транспортных средствах, промышленном оборудовании – присутствуют именно подшипники качения, особенности которых определяют работу узлов вращения. Установка некачественного подшипника может привести к непоправимым последствиям. Ещё до ввода в эксплуатацию необходимо определить степень риска наличия дефекта у нового подшипника. Для этого нужно определить такие параметры, как внутренний диаметр  $d$ , мм, внешний диаметр  $D$ , мм, радиус тел качения  $R$ , мм, число тел качения  $N$ , шт, начальную частоту  $f_0$ , Гц, частоту вращения  $f_1$ , об/мин.

По спектрам вибрации можно определить заводские дефекты подшипников качения в процессе эксплуатации: перекос внутреннего кольца; перекос наружного кольца; трещины на внутреннем кольце; износ сепаратора; неоднородный радиальный натяг; износ тел качения; загрязнение смазки.

Таким образом, была разработана программа для снятия анализа и расчета степени риска подшипников качения, основанная на преобразовании Фурье.

Для работы с программой «Таямніца-2» пользователь должен иметь представление о работе с базами данных, обладать необходимой технической подготовкой в области вибрационной диагностики.

Внешний вид программы «Таямніца-2» представлен на рис. 1. Все функции программы доступны через соответствующие кнопки.

После выбора диагностируемого оборудования программа переходит в банк данных и после нажатия кнопки «Выбрать для диагностики», программа автоматически рассчитает и выведет на экран форму с диагностической моделью оборудования (рис. 2).

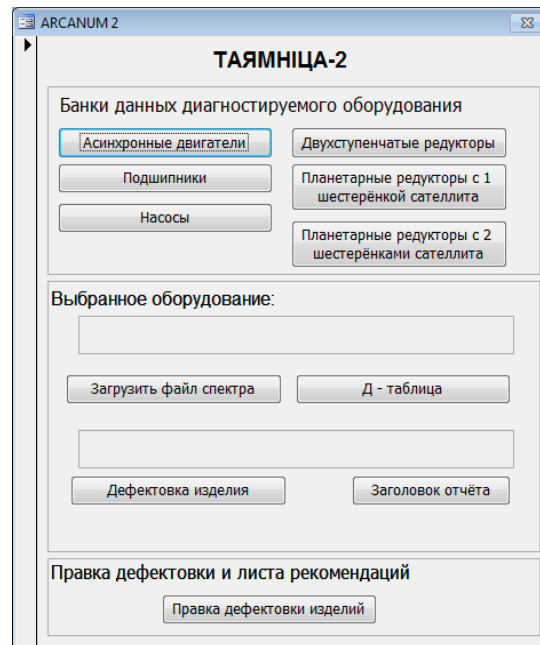


Рис. 1. Интерфейс программы «Таямница-2»

Parameter	Value	Amin:	Amax:	Amax:
f0:	50	75,690702	Amax:	79,717703
f1:	0,407833322	Amin: 71,801413	Amax:	77,014868
f2:	10,48714256	Amin: 34,869841	Amax:	39,277319
f3:	36,70499897	Amin: 29,7409	Amax:	38,216986
f4:	256,9349928	Amin: 32,092772	Amax:	55,570204
f5:	73,40999794	Amin: 30,062193	Amax:	47,824697
f6:	146,8199959	Amin: 29,910986	Amax:	52,655409
f7:	13,98285675	Amin: 30,272928	Amax:	37,917768
f8:	97,87999725	Amin: 43,320036	Amax:	64,515371
f9:	45,88124871	Amin: 63,870153	Amax:	67,938635
f10:	321,168741	Amin: 31,996191	Amax:	59,341795
f11:	47,19214153	Amin: 63,870153	Amax:	67,938635
f12:	26,21785641	Amin: 31,564238	Amax:	67,668447
f13:	2248,181187	Amin: 24,094847	Amax:	43,734083
f14:	330,3449907	Amin: 29,326422	Amax:	57,331121
f15:	0	Amin: 0	Amax:	0
f16:	0	Amin: 0	Amax:	0
f17:	100	Amin: 43,320036	Amax:	64,515371

Рис. 2. Вид формы с диагностической моделью оборудования

Как только диагностическая таблица заполнена и сохранена в базе, либо выбрана из базы, проводится дефектовка изделия по имеющемуся файлу со спектром вибраций. Для этого необходимо нажать на кнопку «Загрузить файл спектра» и выбрать необходимый файл.

Для получения отчета нужно нажать кнопку «Дефектовка изделия». После обработки данных программа сохранит файл в виде документа электронной таблицы Excel (рис. 3).

Объект: ГГТУ								
Диагностируемое оборудование: 307								
Результаты вибрационного диагностирования: (по эксперименту, радиальная)								
Номер	Частота	A_мин	A_тек	A_макс	Износ	Дефект	Степень риска	Рекомендации
0	0.408	71,801	76,760	77,015	Максимальный	Нарушение балансировки	0,951	
1	10.487	34,870	36,551	39,277	Нормальный	Дефект сепаратора	0,381	
2	36.705	29,741	36,648	38,217	Максимальный	Дефект тел качения	0,815	
3	256.935	32,093	55,570	55,570	Максимальный	Дефект тел качения	1,000	
4	73.410	30,062	44,090	47,825	Максимальный	Раковины на НК; неравномерность зазоров между кольцами и телами качения	0,790	
5	146.820	29,911	43,369	52,655	Средний	Перекус наружного кольца	0,592	
6	13.983	30,273	33,528	37,918	Нормальный	Дефекты внутреннего кольца	0,426	
7	97.880	43,320	61,000	64,515	Максимальный	Дефекты внутреннего кольца	0,834	
8	45.881	63,870	67,780	67,939	Максимальный	Дефекты внутреннего кольца	0,961	
9	321.169	31,996	56,484	59,342	Максимальный	Дефекты внутреннего кольца	0,896	
10	47.192	63,870	67,780	67,939	Максимальный	Дефекты сепаратора	0,961	
11	26.218	31,564	59,327	67,668	Максимальный	Дефекты сепаратора	0,769	
12	2248.181	24,095	32,425	43,734	Нормальный	Дефекты сепаратора	0,424	
13	330.345	29,326	50,283	57,331	Средний	Дефекты сепаратора	0,748	
14	0.816	71,801	76,760	77,015	Максимальный	Овальность внутреннего кольца	0,951	

Рис. 3. Вид файла отчета

Таким образом, программа «Гаямница-2» позволяет производить вибродиагностирование подшипников качения на специальном стенде перед установкой на механизм. Полученное заключение позволит убедиться в исправности или наличии дефектов на подшипниках качения.

#### Литература

1. Грунтович, Н. В. Типовые ошибки при вибродиагностировании энергетического оборудования / Н. В. Грунтович, А. А. Алферов, П. М. Колесников // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2010. – №. 1 (40). – С. 72–081.
2. Панфилов, А. М. Применение компьютерных программ в исследовании подшипников качения / А. М. Панфилов, И. В. Петров, Н. В. Грунтович. – 2018.
3. Грунтович, Н. В. Повышение безотказности подшипников качения в условиях эксплуатации / Н. В. Грунтович. – 2019.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

М. А. Вегера, Н. В. Пузан

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

Научный руководитель В. В. Бахмутская

*Выполнен сравнительный анализ достоинств и недостатков асинхронных и вентильно-индукторных двигателей. Показана целесообразность применения энергосберегающих вентильно-индуктивных двигателей с микропроцессорным управлением в системах электроснабжения.*

**Ключевые слова:** вентильно-индукторный двигатель, микропроцессорное управление, энергосбережение.

Вентильно-индукторный двигатель (ВИД) – это относительно новый тип электромеханического преобразователя энергии, который сочетает в себе свойства и электрической машины, и интегрированной системы регулируемого электропривода. Как всякий электродвигатель, он обеспечивает преобразование электрической энергии, которая поступает от питающей сети в механическую энергию, передаваемую в нагрузку. Как система регулируемого электропривода, ВИД дает возможность осуществлять управление этим процессом в соответствии с особенностями конкретной нагрузки. На рис. 1 представлен ВИД в разборке и в собранном виде.

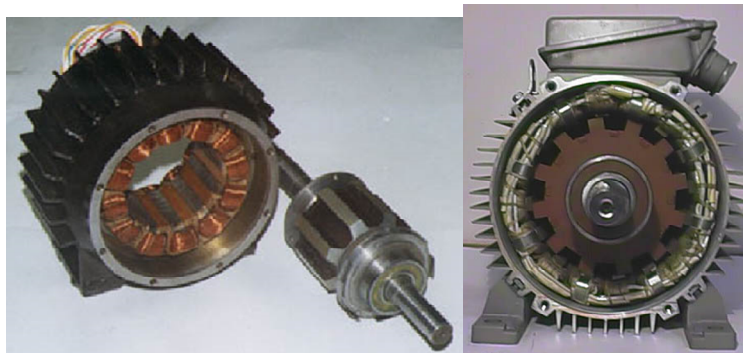


Рис. 1. Конструктивные особенности вентильно-индукторных двигателей

Отличительными особенностями ВИД являются двойная зубчатость с разными полюсными делениями статора и ротора; катушечные обмотки без пересечения лобовых частей; ротор без обмоток; реактивный момент за счет изменения при вращении ротора магнитной проводимости участка «зубец статора – воздушный зазор – зубец ротора»; отсутствие магнитной связи между фазами; дискретность работы в режиме непрерывного вращения.

Наиболее эффективно использовать ВИД в качестве электропривода механизмов, в которых по условиям работы требуется осуществление регулирования в широком диапазоне частоты вращения, например, электроприводы станков с числовым программным управлением и промышленные роботы. Этот электропривод имеет КПД = 0,92÷0,95 при высокой эксплуатационной надежности.



В качестве примера рассмотрим замену асинхронного двигателя (АД) дробилок зерна ММ-140 ВИД на ОАО «Новобелицкий комбинат хлебопродуктов».

В настоящее время в комбикормовом цехе предприятия на дробилках зерна установлены электроприводы с  $N_n = 90$  кВт, в количестве 6 шт. Реально потребляемый ток при измерениях может доходить до 90 А, измеряемый  $\cos \varphi$  – в пределах 0,5, что свидетельствует о том, что завышены установленные мощности электродвигателей.

В качестве энергосберегающего мероприятия предлагаем провести замену электродвигателей с электроприводом на ВИД.

При работе привода в режиме до 75 % номинальной мощности в течение половины срока эксплуатации при прочих равных условиях использование ВИД даёт экономию электроэнергии до 5,5 %.

Величина потребления электроэнергии АД определяется по формуле:

$$W = \sqrt{3UI_n \cos \varphi_n T n}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год},$$

где  $T$  – время работы электроприемника 6000 ч в год;  $n$  – количество электродвигателей:

$$W_1 = \sqrt{3 \cdot 0,38 \cdot 90 \cdot 0,5 \cdot 6000 \cdot 6} = 1066250,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Определяем мощность, потребляемую АД:

$$N_1 = \sqrt{3UI \cos \varphi};$$

$$N_1 = \sqrt{3 \cdot 0,38 \cdot 90 \cdot 0,5} = 29,6 \text{ кВт}.$$

Определяем реальную мощность на валу двигателя по формуле

$$N_2^\phi = N_1 \eta, \text{ кВт},$$

где  $\eta = 87$  % – КПД двигателя %, (рис. 2) при коэффициенте загрузки  $K_3 = 0,3$ .

$$N_2^\phi = 29,6 \cdot 0,87 = 25,8 \text{ кВт}.$$

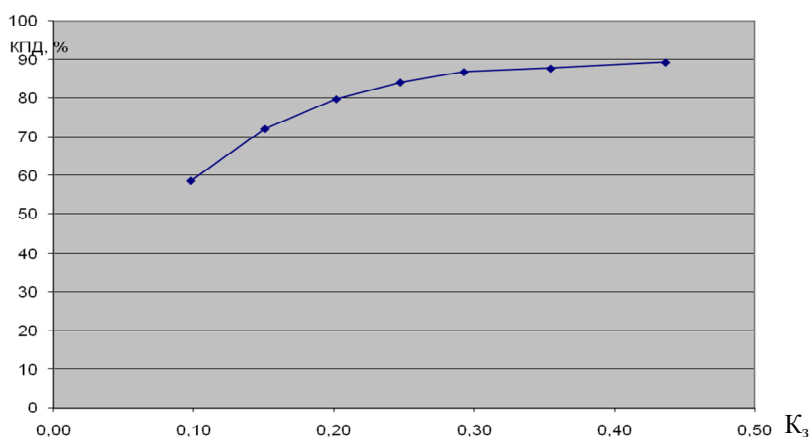


Рис. 2. Характеристика зависимостей КПД % от  $K_3$  для АД

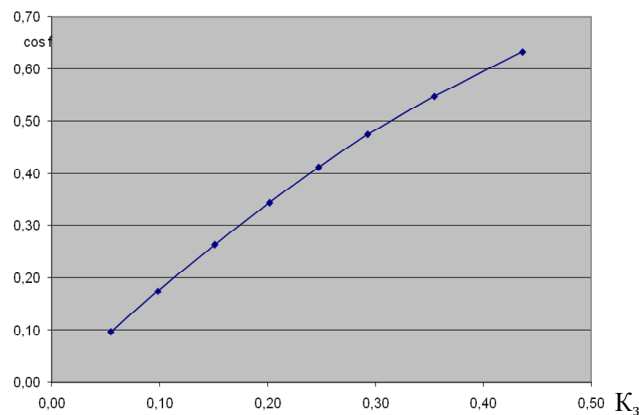


Рис. 3. Характеристика зависимостей  $\cos \varphi$  от  $K_3$  для АД

Находим мощность ВИД по формуле

$$N_2^H = N_2^\Phi \cdot 1,1, \text{ кВт};$$

$$N_2^H = 25,8 \cdot 1,1 = 28,38 \text{ кВт}.$$

Выбираем ВИД мощностью 30 кВт;  $\eta = 93 \%$ .

Определяем расход электроэнергии для ВИД:

$$W_2 = \left( \frac{N_2^\Phi}{\eta_2} \right) nT, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год};$$

$$W_2 = \left( \frac{25,8}{0,93} \right) 6 \cdot 6000 = 998709,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Таким образом, ожидаемая экономия электроэнергии составит:

$$\Delta W_2 = W_1 - W_2 = 1066250 - 966315,8 = 67540,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

В промышленности существует большой класс устройств и механизмов, использующих нерегулируемый электропривод, где энергетическая эффективность существенно возрастает при использовании регулируемого электропривода. К таким устройствам, прежде всего, относятся компрессоры, насосы и вентиляторы. Следовательно, использование ВИД является весьма перспективным. В системах электропитания промышленных предприятий ВИД могут также использоваться в приводе высоковольтных выключателей и разъединителей.

#### Литература

1. Грунтович, Н. В. Стратегия и тактика развития отраслей экономики: динамичность, эффективность, экспортоориентированность / Н. В. Грунтович, Т. В. Алфёрова // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сб. науч. тр. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под ред. В. В. Кириенко. – Гомель, 2021. – С. 6–15.

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ: МУСОРОСЖИГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

И. Д. Костюченко

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

Научный руководитель В. В. Бахмутская

*Рассмотрена мусоросжигательная электростанция как инновационная технология производства электроэнергии, ее принцип действия и достоинства. Приведен пример современной мусоросжигательной электростанции и оценка степени ее влияния на здоровье человека.*

**Ключевые слова:** инновационные технологии, мусоросжигающие станции, экология, отходы, безопасность.

К инновационным технологиям производства электроэнергии относятся мусоросжигающие электрические станции.

Мусоросжигательные электростанции являются одним из способов утилизации бытовых отходов. Опыт Европейского сообщества свидетельствует, что таких способов три: сортировка и компостирование; сжигание; захоронение на полигонах. В некоторых странах Европы, таких, как Швеция, Дания, Финляндия, доля сжигания мусора превышает 50 % [3]. Наибольшее количество мусоросжигающих электростанций находятся во Франции (126 станций, 14,7 млн т мусора в год), Германии (99 станций, 25 млн т).

Мусоросжигательный завод – предприятие, использующее технологию утилизации промышленных и твердых бытовых/коммунальных отходов посредством термического разложения (сжигания) в котлах или печах. Побочной функцией мусоросжигательных заводов является выработка тепловой и электроэнергии за счет использования теплоты сгорания.

Современные мусоросжигательные заводы планируется возвести в рамках проекта «Энергия из отходов», реализацией которого занимается «РТ-Инвест» Госкорпорации Ростех. Новая технология позволит без ущерба для экологии навсегда решить проблему мусорных полигонов и свалок [2].

Один из основных принципов, заложенных в основу мусоросжигательного завода нового поколения, – экологичность и безопасность. Мусоросжигающий завод выполняют важную задачу – вовлечение во вторичный оборот отходов, не пригодных к классической переработке. Все это приведет к снижению объемов захоронения отходов, что позволит избежать ущерба, наносимого окружающей среде свалками и полигонами.

На заводы поступают только те отходы, что остались после сортировки и непригодны для вторичного использования. Заезжающие на территорию завода мусоровозы проходят обязательный радиационный контроль, процедуру взвешивания и учета, после чего отходы выгружаются в приемный бункер-накопитель. Здесь отходы могут накапливаться до двух недель, а затем поступают в котел, который рассчитан на 7 тыс. т отходов и представляет собой 7-этажную конструкцию. На заводе их три, и в каждом из них – по две зоны.

В первой – отходы термически обрабатываются при температуре 1260 °С. Такие критические температуры сжигают абсолютно все, даже ядовитые диоксины. В этой зоне экстремального высокотемпературного сжигания исчезают все вредные элементы.

Вторая зона – камера дожига газовых выбросов. Сюда поступают дымовые газы, образующиеся в процессе сжигания. Даже если допустить, что какие-то вредные вещества прошли первую зону, то при вторичном дожиге, где температура превышает 850 °С, они точно будут уничтожены. Кроме того, в камеру дожига впрыскивается специальный раствор карбамида, чтобы полностью убрать органические соединения и обезвредить дымовые газы.

Затем дымовые газы и шлак попадают в реактор. Там происходит обработка активированным углем и аммиаком, добавляются химические элементы для дополнительного обезвреживания.

Из реактора выходят уже очищенные дымовые газы, они попадают в рукавные фильтры, где очень тонкие трубки отбирают любую фракцию, вплоть до микрочастиц, которые просто витают в воздухе. Как уверяют специалисты, если взять замеры воздуха в городе и воздуха после рукавного фильтра, то на заводе он намного чище.

Итак, тонна мусора через 15 мин после поступления в котел превращается в пар. Этот пар направляется в турбогенератор для производства электроэнергии. При этом на собственные нужды завода расходуется всего 5–10 % производимой энергии, остальное поступает в сеть.

*Обработка шлака и золы.* После сжигания отходы уменьшаются на 90 % в объеме. После термической переработки мусора остаются зола и шлак.

Шлак – это пятый класс опасности отходов, такой же класс опасности имеют несортированные отходы. Он может сразу применяться для отсыпки дорог. Предварительно из шлака отбираются черные и цветные металлы, которые впоследствии направляются на переработку.

Летучая зола составляет примерно 3–5 % от перерабатываемых отходов и относится к более высокому, третьему, классу опасности.

Для решения проблем с золой может быть использована технология Carbon8.

Carbon8 представляет собой химическое обезвреживание золы методом ускоренной карбонизации. Из третьего класса опасности зола обезвреживается до сырья для производства строительных материалов. Зола успешно превращается в различные блоки, бордюры, плитку и даже может заменить цемент. Таким образом, новые технологии предоставляют уникальную возможность – не зарывать под землю ни одного килограмма мусора.

По сравнению со складированием твердых биологических отходов (ТБО) на полигонах, термическая утилизация позволяет уменьшить объем ТБО в 10 раз:

- полное уничтожение бактерий, вирусов и грибков при сжигании ТБО;
- сжигание ТБО позволяет уловить и обезвредить опасные химические вещества, содержащиеся в ТБО, и предотвратить их попадание в почву и воду по сравнению с захоронением ТБО на полигонах;
- исключается образование парникового газа – метана, которое имеет место при захоронении ТБО на полигонах;
- возможность получения тепловой и электрической энергии: из 1 т несортированных ТБО возможно получить (в зависимости от калорийности ТБО и режима работы энергетического оборудования):
  - 200–860 кВт · ч электрической энергии;
  - 0,6–1,7 Гкал тепловой энергии;
- значительная доля полученной из ТБО энергии является возобновляемой ввиду содержания в ТБО биологически разлагаемых веществ;

• термическая утилизация ТБО на мусоросжигающей электростанции (МСЭ) позволяет получить:

- тепловую и электрическую энергию;
- воду (при конденсации влаги дымовых газов);
- металлы (извлекаемые из донной золы);
- отсыпчный материал для дорожного строительства – донную золу [1].

Концепция мусоросжигающей электростанции по технологии «Babcock&WilcoxVølund» на примере реализованного проекта «Copenhill» (Дания) представлена на рис. 1.



Рис. 1. Реализованный проект «Copenhill»

В теплые летние месяцы на крыше «Copenhill» работает полноценный парк развлечений, который предоставляет посетителям пешеходные тропы, игровые площадки, тренажеры для фитнеса, беговые дорожки, стены для скалолазания и смотровые площадки с захватывающим видом на город. Зимой здесь есть лыжные трассы длиной 500 м, оборудованные подъемниками. Склоны проходят от вершины 90-метрового здания к его основанию с поворотом на 180° на полпути вниз по трассе.

*Оценка влияния современных МСЭ на здоровье человека.* Научный консультативный совет Федеральной медицинской ассоциации (Scientific Advisory Council of the Federal Medical Association) (Германия) исследовал потенциальные риски для здоровья, вызванные выбросами от мусоросжигательных электростанций, и в 1993 г. сделал заключение: «Проведенная оценка показывает, что работающие в настоящее время мусоросжигательные электростанции, соответствующие техническим стандартам, оказывают очень незначительные риски для здоровья, которые таким образом могут быть классифицированы как пренебрежительно малые риски для населения, проживающего вблизи от мусоросжигательных электростанций».

С тех пор экологические требования к МСЭ ужесточались, а технологии газоочистки и экологические показатели МСЭ постоянно совершенствовались.

#### Литература

1. Обзор мирового опыта реализации проектов строительства экологически чистых мусоросжигающих электростанций. Перспективы и условия реализации коммерческих проектов

- мусоросжигательных электростанций в Украине. – Режим доступа: <https://vse.energy/docs/OEW-ranov.pdf>. – Дата доступа: 11.03.23.
2. Энергия из отходов: новейшие технологии против мусора. – Режим доступа: [https://rostec.ru/news/energiya-iz-otkhodov-zelenye-tekhnologii-protiv-musora/?sphrase\\_-id=492-6878](https://rostec.ru/news/energiya-iz-otkhodov-zelenye-tekhnologii-protiv-musora/?sphrase_-id=492-6878). – Дата доступа: 11.03.23.
  3. Европейская конфедерация заводов по преобразованию мусора в энергию. Confederation of European Waste-to-Energy Plants. – Режим доступа: <http://www.sewer.eu/>. – Дата доступа: 11.03.23.

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ЗАМКНУТЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

О. А. Кныш

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

Научный руководитель А. В. Шаповалов

*Рассмотрены способы интенсификации теплообмена путем модификации двухфазного термосифона. Разработана и запатентована конструкция пародинамического термосифона с организованной циркуляцией теплоносителя. Создана экспериментальная установка для исследования эффективности работы замкнутых двухфазных теплопередающих устройств. Экспериментально исследован процесс теплообмена в замкнутых теплопередающих устройствах, заправленных дистиллированной водой, этиловым спиртом и озонобезопасными хладагентами.*

**Ключевые слова:** термосифон, интенсификация теплообмена, тепломассообмен.

Для успешной работы современного энергетического оборудования важное значение имеет отвод теплоты от отдельных тепловыделяющих элементов и поверхностей [1–3].

Замкнутые двухфазные термосифоны многими авторами [4–6] рассматриваются как достаточно перспективные, высокоэффективные, надежные теплопередающие теплообменные устройства за счет автономности, конструкционной гибкости, простоты изготовления, отсутствия движущихся частей, высокой интенсивности внутренних процессов теплопереноса, отсутствия насосов для перекачки теплоносителя и др. [7]. В связи с этим актуальным является исследование возможности применения термосифонов как основного элемента системы охлаждения приборов, устройств и оборудования [8–9].

Известны различные методы интенсификации теплообмена [10, 11]:

**1. Способы интенсификации теплообмена путем модификации теплообменных поверхностей:**

- Применение коммерческих интенсифицирующих поверхностей и авторских поверхностей, полученных механической обработкой.

В работе [12] описаны результаты экспериментального исследования пузырькового кипения хладона R123 на интенсифицирующей поверхности – горизонтально ориентированной трубе с трехмерной микроструктурой, произведенной «Wolverine Tube, Inc» (рис. 1).

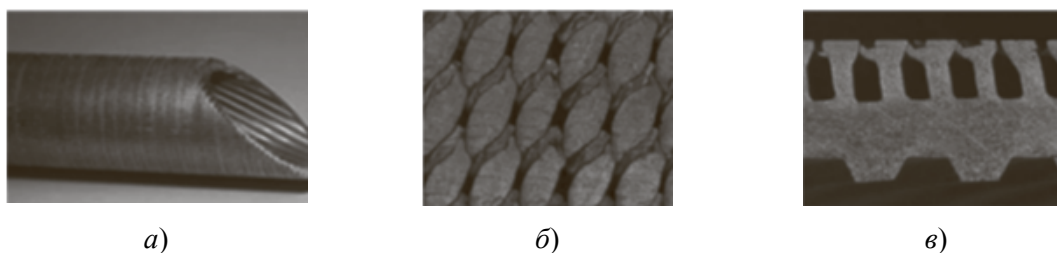


Рис. 1. Снимки экспериментальной трубы:  
 а – сегмент трубы; б – увеличенное изображение наружной микроструктурированной поверхности; в – увеличенное изображение поперечного разреза стенки трубы

• Интенсификация кипения и испарения с помощью проволочных покрытий. Развитие данного метода в современных экспериментальных работах [13–15] позволяет добиваться результатов, сопоставимых с применением специализированных коммерческих поверхностей кипения или авторских микроструктурированных поверхностей, полученных более сложными методами.

В [16] исследовалась интенсификация теплообмена при применении тонких металлических сеток с различным количеством слоев (1–4). Рабочей жидкостью служил спирт. Авторами достигнута значительная интенсификация теплоотдачи в режиме кипения – около восьми раз, продемонстрировано значительное снижение температурного напора. Показано, что применение четвертого слоя сетки ухудшает теплоотдачу.

С целью интенсификации кипения в [17] применялись многослойные медные сеточные покрытия с градиентной пористостью. Максимальные увеличения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи получены авторами при использовании градиентного покрытия из трех мелких и трех более грубых сеток (наложенных сверху) и составили 6,6 и 3 раза соответственно.

Применение оребрения, изменение шероховатости, влияние материала. В [18] исследовалось кипение хладона R134a на гладкой и микроорбренной поверхностях в диапазоне давлений 6,1–12,2 бар (рис. 2). Авторами показано, что теплоотдача для микроорбренной трубы с канавками треугольной формы несколько выше, чем для гладкой. Однако интенсификация заметна только при относительно высоких тепловых потоках и лишь на нижней части трубы, что связано с ростом крупных пузырей с «сухими пятнами» в основании трубы, тогда как в случае микроорбренной поверхности часть жидкости продолжает удерживаться в канавках, затягивая развитие кризиса пузырькового кипения.

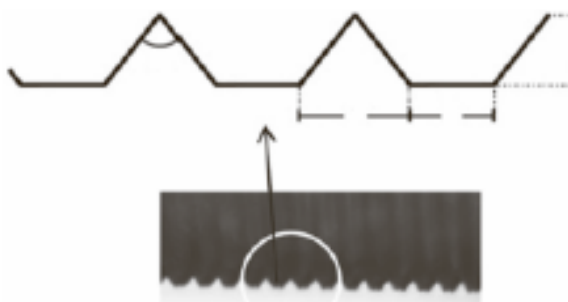


Рис. 2. Микроорбренная поверхность с канавками треугольной формы [18]

**2. Способы интенсификации теплообмена в стесненных условиях.** В работах [17–21] экспериментально изучались теплогидродинамические характеристики при кипении воды, R134a в мини-микросканалах с гидравлическим диаметром от 0,2 до 1 мм.

Процессы кипения хладагентов изучались в [18]: R134a, R410A и водо-воздушные смеси в миниканалах с гидравлическим диаметром канала 1 мм. В работе [17] исследовалось кипение хладагента R134a в канале с гидравлическим диаметром  $Dh = 0,5$  мм при положительных температурах. В этих работах были отмечены следующие преимущества миниканальных технологий: высокий коэффициент теплоотдачи; высокая коррозионная стойкость, надежность. При этом в основном результаты исследований относятся к решению отдельных вопросов теплообмена либо гидродинамики.

В работах [19–22], основываясь на изучении процессов кипения хладагентов в трубах [17], были разработаны основы комплексного подхода к исследованию и моделированию теплогидродинамических процессов в трубах и миниканалах.

На основании проведенного обзора существующих методов интенсификации теплообмена теплопередающих поверхностей были определены варианты модернизации экспериментальной установки, созданной на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого [23, 24]:

а) в зоне конденсации выполнено наружное поперечное оребрение поверхности конденсатора (рис. 3). Материал ребра – латунь, толщина – 15 мм. Количество ребер – 202 шт.; шаг оребрения – 2 мм; высота ребер – 16 мм;

б) в зоне парообразования изменен кольцевой зазор за счет изменения диаметров внутренней трубки (материал трубки – медь, диаметр – 20 и 15 мм, длина – 1 м).



Рис. 3. Экспериментальный стенд

Посредством изменения ширины парового канала планируется увеличить теплообмен в зоне парообразования.



Рис. 4. Экспериментальный образец двухфазного замкнутого термосифона с улучшенными тепломассообменными характеристиками



## Литература

1. Garimella, S. V. On-chip thermal management with microchannel heat sinks and integrated micropumps / S. V. Garimella, V. Singhal, D. Liu // *Proceedings of the IEEE*. – 2006. – Vol. 94, N 8. – P. 1534–1548.
2. Investigation of a long term passive cooling system using two-phase thermosyphon loops for the nuclear reactor spent fuel pool / W. Fu [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*. – 2015. – Vol. 85. – P. 346–356.
3. Xue, Z. H. High performance loop heat pipe with flat evaporator for energy-saving cooling systems of supercomputers / Z. H. Xue, W. Qu, M. H. Xie // *J. Heat Transfer*. – 2020. – N 142 (3). – P. 7.
4. Пародинамические термосифоны и их применение в тепловом оборудовании различного назначения / Леонард Л. Васильев [и др.] // *Тепло- и массоперенос – 2013 : сб. науч. тр. / ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2014. – С. 12–16.*
5. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. – К. : Факт, 2005. – 704 с.
6. Накоряков, В. Е. Тепломассообмен при фазовых переходах и химических превращениях в микроканальных системах / В. Е. Накоряков, В. В. Кузнецов // *Тр. 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену, Москва, 23–27 окт., 2006 г. : в 8 т. / РАН [и др.]. – М., 2006. – Т. 1. – С. 33–37.*
7. Шаповалов, А. В. Результаты экспериментального исследования пародинамического термосифона / А. В. Шаповалов, А. В. Родин, Р. Н. Жихарев // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого*. – 2015. – № 3. – С. 58–64.
8. Васильев, Л. Л. Перспективы применения тепловых насосов в Республике Беларусь / Л. Л. Васильев // *Инженер.-физ. журн.* – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 23–34.
9. Безродный, М. К. Двухфазные термосифоны в промышленной теплотехнике / М. К. Безродный, С. С. Волков, В. Ф. Мокляк. – К. : Вища школа, 1991. – 75 с.
10. Бессонный, А. Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения : справочник / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш ; под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессоного. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.
11. Дзюбенко, Б. В. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б. В. Дзюбенко, Ю. А. Кузма-Китча, А. И. Леонтьев. – М. : ФГУП «ЦНИИАТОМИН-ФОРМ», 2008. – 539 с.
12. Chen, T. An Experimental Investigation of Nucleate Boiling Heat Transfer from an Enhanced Cylindrical Surface / T. Chen // *Appl. Therm. Eng.* – 2013. – Vol. 59, iss. 1-2. – P. 355.
13. Chien, L. H. An Experimental Study of Pool Boiling and Falling Film Vaporization on Horizontal Tubes in R-245fa / L. H. Chien, Y. L. Tsai // *Appl. Therm. Eng.* – 2011. – Vol. 31, iss. 17-18. – P. 4044.
14. Dąbek, L. Ethyl Alcohol Boiling Heat Transfer on Multilayer Meshed Surfaces AIP Conference Proceedings / L. Dąbek, A. Kapjor, J. Orman // *AIP Publ. LLC*. – 2016. – Vol. 1745, iss. 1. – P. 020005.
15. Extraordinary Boiling Enhancement through Micro-Chimney Effects in Gradient Porous Micromeshes for High-Power Applications / S. Zhang [et al.] // *Energy Convers. Manage.* – 2020. – Vol. 209. – P. 112665.
16. Nucleate Pool Boiling of R-134a on Plain and Micro-Finned Tubes / S. P. Rocha [et al.] // *Int. J. Refrigeration*. – 2013. – Vol. 36, N 2. – P. 456.
17. Khovalyg, D. M. Two phase flow dynamics during boiling of R134a refrigerant in minichannels / D. M. Khovalyg, A. V. Baranenko // *Technical Physics*. – 2015. – Vol. 85, N 3. – P. 34–41.
18. Niño, V. G. Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels / V. G. Niño, P. S. Hrnjak, T. A. Newell // *ACRC TR-202*. – 2002. – October.
19. Кузнецов, В. В. Режимы течения и теплообмена при кипении движущегося хладагента R318с в кольцевом миниканале / В. В. Кузнецов, А. С. Шамирзаев // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 57–65.
20. Исследование теплообмена и гидродинамики при кипении недогретой воды в канале малого диаметра / К. Сузуки [и др.] // *Тепловые процессы в технике*. – 2012. – № 7. – С. 307–311.
21. Ховалыг, Д. М. Неустойчивости двухфазного течения веществ при кипении в микроканалах / Д. М. Ховалыг, А. В. Бараненко // *Холодильн. техника*. – 2013. – № 10. – С. 45–47.
22. Малышев, А. А. Новые методы прогнозирования режимов течения кипящих хладагентов в макро- и миниканалах / А. А. Малышев, К. В. Киссер, А. С. Филатов // *Вестн. Междунар. акад. холода*. – 2016. – № 2. – С. 67–70.

23. Экспериментальное исследование пародинамического термосифона с кольцевыми каналами в испарителе и конденсаторе / Л. Л. Васильев [и др.] // Тепло- и массообмен – 2015 : сб. науч. тр. / ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2016. – С. 18–23.
24. Экспериментальное исследование работы термосифонов, заправленных хладагентами R404A, R407C, R410A / А. В. Шаповалов [и др.]. // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 87–93.

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ: ЦИФРОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ

**В. А. Маркевич**

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

Научный руководитель Т. В. Алфёрова

*Рассмотрены преимущества и целесообразность применения цифровой подстанции как одной из инновационных технологий в области цифровизации электроэнергетики.*

**Ключевые слова:** инновационные технологии, цифровая подстанция, логические уровни, интеллектуальная сеть, GOOSE-сообщения, безопасность, надежность.

Инновационными технологиями в области цифровизации электроэнергетики (цифровая подстанция) можно считать «интеллектуальные» технологии управления объектами электросетевого комплекса в рамках международного стандарта «МЭК 61850. Цифровые подстанции»: «цифровой переход» в электроэнергетике.

Цифровая подстанция (ЦПС) – это объект энергетического хозяйства, выполняющий основные технологические функции передачи, преобразования, распределения и снабжения электроэнергией потребителей, состоящий из интеллектуального первичного и вторичного оборудования, использующего унифицированный цифровой информационный обмен данными для организации внутренних (вторичных) систем энергообъекта с целью поддержания его работоспособности и выполнения основных функций.

Цели внедрения ЦПС и причины, по которым нужно внедрять технологии:

- снижение ошибок и повышение, надежности на ПС. Как следствие повышение обоснованности и своевременности принятия управленческих решений;
- повышение функциональной совместимости устройств – переход на новый уровень;
- сокращение времени на проектирование и наладку;
- сокращение затрат на проектирование и строительство;
- сокращение затрат на эксплуатацию ЦПС.

Проблемы, мешающие внедрению ЦПС:

- технические вопросы, требующие дополнительной стандартизации. Нужно время для выработки и применения определенных стандартизированных решений;
- необходимо разрабатывать ПО для проектирования ЦПС. Разработка ПО в соответствии с МЭК 61850-4;
- применение новых технологий. Оборудование и ПО должно проходить опытную эксплуатацию для определения явных преимуществ;
- повышение квалификации наладочных, эксплуатирующих и проектных организаций. Создание и проведение курсов по ЦП на базе сформированных стандартов по ЦПС.

Существуют две полярные архитектуры цифровой подстанции: централизованная и децентрализованная.

Централизованная архитектура представляет собой реализацию функций защиты, управления, измерений и т. д. для распределительного устройства или подстанции в целом в одном вычислительном устройстве (сервере) с резервированием. Для реализации данной концепции необходимы значительные вычислительные мощности сервера, реализующего алгоритмы защиты и управления. Такой производительностью обладают мощные серверные платформы общего назначения с многоядерной архитектурой, способные обрабатывать большое количество SV потоков и решать множество алгоритмических задач в режиме реального времени.

Однако применение аппаратных платформ общего назначения имеет ряд существенных недостатков:

- стоимость оборудования привязана к курсу USD, так как используется иностранное оборудование;
- узкий температурный диапазон эксплуатации (в среднем – 10–35 °С);
- вентиляторное охлаждение (как следствие – снижение надежности, чувствительность к наличию в воздухе частиц пыли, сервер работает как «пылесос»);
- необходимость обслуживания;
- ограниченный срок эксплуатации (в среднем – 5 лет).

Конечно, ограничения по условиям эксплуатации можно обойти, устанавливая серверы в специализированных помещениях (серверных комнатах), оборудованных системой поддержания климата и защищенных от электромагнитных помех. Однако данные помещения существуют далеко не на каждой подстанции. В основном серверные помещения имеются на крупных подстанциях магистральных сетей, что делает недоступной технологию цифровой подстанции для сегмента distribution, а технология должна быть масштабируемой.

Децентрализованная архитектура подразумевает сохранение традиционной структуры систем защиты и управления, когда за отдельную функцию отвечает отдельное устройство. Придерживаться децентрализованной архитектуры при построении цифровой подстанции довольно «удобно», так как структурная схема объекта автоматизации имеет привычный заказчику и проектировщику вид. Например, на каждый фидер устанавливаются цифровой терминал РЗА и контроллер присоединения. При этом большинство разработчиков оборудования РЗА и АСУ ТП «превращают» обычный терминал или контроллер в «цифровой» IED, заменяя блок аналогового ввода и дискретного ввода/вывода на цифровой интерфейс. При этом концептуально устройство остается традиционным, изменился лишь метод обмена данными этого устройства с «внешним миром».

Для реализации данной архитектуры цифровой подстанции подразумевается применение большого числа устройств, т. е. количество терминалов, контроллеров и других IED остается прежним относительно «традиционной» архитектуры, но к их числу добавляются аналоговые и дискретные устройства сопряжения (AMU, DMU), а также сетевые коммутаторы. Безусловно ЛВС, образующая шину процесса, требует резервирования, так как является критической точкой отказа всей системы. При этом, если устройства, подключаемые в шину процесса, не поддерживают протокол резервирования PRP, то необходимо применение большого числа устройств RedBox. Также если устройства AMU не поддерживают синхронизацию по шине процесса посредством протокола PTP, то для их синхронизации по 1PPS или IRIG-B возникает необходимость построения отдельной сети.

Применение подобной архитектуры ведет к многократному удорожанию систем автоматизации, построенных по принципам цифровой подстанции, относительно «традиционных». Конечно, две рассмотренные выше архитектуры (централизованная и децентрализованная) являются противоположными крайностями, и как большинство радикальных подходов не могут быть оптимальными с точки зрения технико-экономических показателей [1].

Стандарт МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях», описывающий форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов энергообъекта и свод правил для организации событийного протокола передачи данных, включает в себя описания технологий передачи данных по сетям связи Ethernet, требования к системам управления, а также требования к физическому исполнению коммуникационных устройств.

Стандарт МЭК 61850 предназначен в том числе и для применения в системах релейной защиты и автоматики (РЗА), что позволяет проектировать распределенные и гибкие системы, отвечающие современным тенденциям. Гибкость системы подразумевает применение одного физического устройства для выполнения тех или иных функций в зависимости от существующих задач. Распределенность позволяет физически разнести функциональность системы, которая прежде содержалась в едином микропроцессорном устройстве РЗА, на различные устройства, которые объединены единой информационной шиной и могут быть удалены друг от друга. В соответствии с указанными требованиями систему РЗА предлагается формировать из функциональных модулей. Например, для применения в комплектном распределительном устройстве (КРУ) могут быть использованы промышленные модули (устройства), устанавливаемые как в непосредственной близости от объекта контроля в ячейке для осуществления аналого-цифровых преобразований контролируемых величин, так и вне ее для приема этих данных, их функциональной обработки и принятия решений.

Подстанции, соответствующие стандарту МЭК 61850-3 «Основные требования», принято делить на три логических уровня: уровень станции, присоединения и процесса.

1. На *уровне станции* происходит протоколирование нарушений работы, защита шин, определение последовательности действий, а также архивация данных, диспетчерский контроль и синхронизация времени.

2. На *уровне присоединений* осуществляется релейная защита и мониторинг линий, протоколирование нарушений (сбор данных), работает локальная противоаварийная автоматика.

3. На *уровне процессов* осуществляется сбор данных, протоколирование нарушений и выдача команд управления.

На уровне процесса данные с оптических или электронных датчиков напряжения и тока, а также данные состояния собираются и в цифровом виде преобразуются объединяющими микропроцессорными устройствами.

Передача мгновенных значений от измерительных трансформаторов производит наибольшую нагрузку на информационную сеть шины процесса. В традиционной схеме подключения устройств РЗА цепи от измерительных трансформаторов тока и напряжения, находящихся на ОРУ или в КРУЭ, прокладываются до терминалов РЗА, размещенных в ОПУ.

Использование концепции шины процесса для передачи данных (рис. 1) предполагает, что все сигналы, включая мгновенные значения токов и напряжений, оцифровываются непосредственно в аппарате и передаются устройствам защиты и автоматики в виде цифрового потока данных по информационной сети, называемой шиной процесса [2].

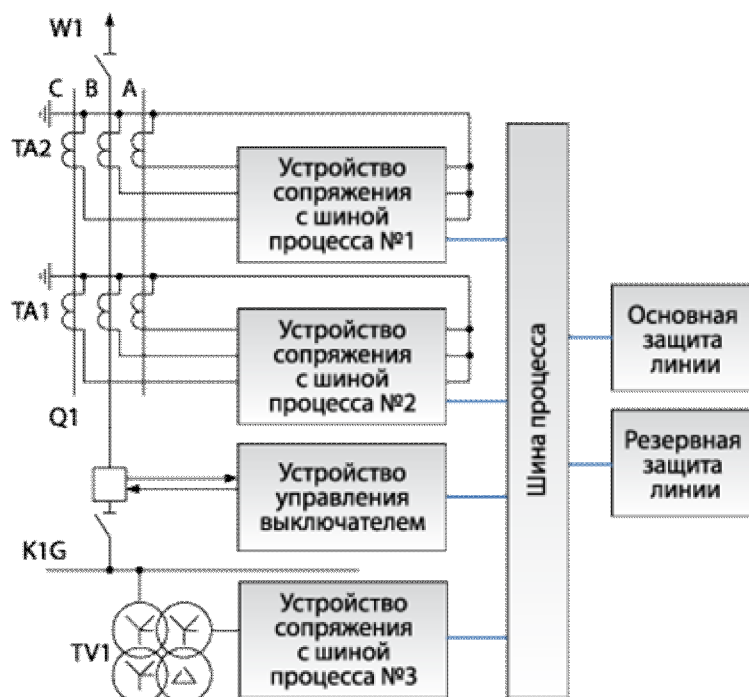


Рис. 1. Использование шины процесса для передачи данных

Если давать характеристику передаче мгновенных значений тока и напряжения, то можно сформулировать следующие требования:

- необходима передача данных с высокой частотой, что ведет к появлению больших объемов информации, передаваемых по сети. При этом должна быть обеспечена возможность выбора различных частот;
- необходимо обеспечить минимальную задержку при передаче данных по сети шины станции;
- измерения, получаемые из различных источников одним приемником (например, значения тока и напряжения от разных устройств сопряжения), должны быть синхронизированы. В противном случае возможна некорректная работа устройств РЗА;
- требуется обеспечить возможность выявления потерь и искажений данных при передаче данных с целью исключения возможных излишних и ложных срабатываний РЗА, а также сигнализации в случае отказа канала связи или устройства сопряжения;
- необходима возможность многоадресной передачи данных;
- требуется гибкость при формировании кадров данных, поскольку измерения могут поступать как от группы трехфазных ТТ или ТН, так и от комбинированных измерительных преобразователей [2].

Протокол GOOSE, описанный частью МЭК 61850-8-1 «Описание специфического сервиса связи (SCSM)», является одним из наиболее широко известных протоколов, предусмотренных стандартом МЭК 61850.

Для разработки альтернативы цепям передачи сигналов между устройствами релейной защиты была дана общая характеристика информации, передаваемой между устройствами РЗА посредством дискретных сигналов:

- малый объем информации: между терминалами фактически передаются значения «да» и «нет» (или логический «ноль» и «единица»);

– требуется высокая скорость передачи информации. Большая часть дискретных сигналов, передаваемых между устройствами РЗА, прямо или косвенно влияет на скорость ликвидации ненормального режима, поэтому передача сигнала должна осуществляться с минимальной задержкой;

– требуется высокая вероятность доставки сообщения для реализации ответственных функций, таких, как подача команды отключения выключателя от РЗА, обмен сигналами между РЗА при выполнении распределенных функций. Необходимо обеспечение гарантированной доставки сообщения как в нормальном режиме работы цифровой сети передачи данных, так и в случае ее кратковременных сбоев;

– возможность передачи сообщений сразу нескольким адресатам. При реализации некоторых распределенных функций РЗА требуется передача данных от одного устройства сразу нескольким;

– необходим контроль целостности канала передачи данных. Наличие функции диагностики состояния канала передачи данных позволяет повысить коэффициент готовности при передаче сигнала, тем самым повышая надежность функции, выполняемой с передачей указанного сообщения.

Перечисленные требования привели к разработке механизма GOOSE-сообщений, отвечающих всем предъявляемым требованиям [3].

Передаваемый пакет GOOSE-сообщения содержит все текущие значения атрибутов данных, внесенных в набор данных. При изменении какого-либо из значений атрибутов устройство моментально инициирует посылку нового GOOSE-сообщения с обновленными данными. Принцип передачи GOOSE-сообщений приведен на рис. 2.

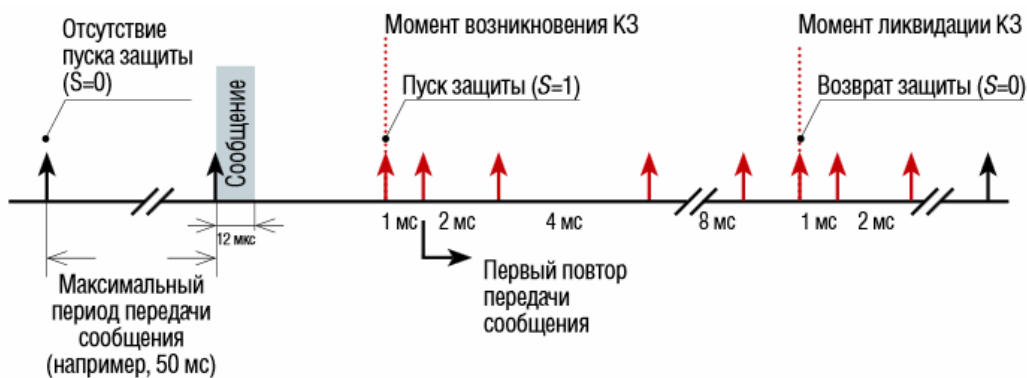


Рис. 2. Принцип передачи GOOSE-сообщений

Следует отметить, что в рамках одного GOOSE-сообщения может отправляться как одно значение (например, сигнал пуска МТЗ), так и одновременно несколько значений (например, сигнал пуска и сигнал срабатывания МТЗ и т. д.). Устройство-получатель при этом может извлечь из пакета лишь те данные, которые ему необходимы [3].

Таким образом, можно сделать выводы о целесообразности использования технологий ЦПС: цифровые подстанции исключают электрические связи между высоковольтным оборудованием и панелями релейной защиты и управления, что создает более безопасные условия работ и в то же время снижает требования к занимаемой площади, затраты на строительство, монтажные и пусконаладочные работы, обслуживание всей системы и эксплуатационные затраты. Цифровые подстанции являются ключевым компонентом интеллектуальной сети, в которой появляется все большее количество непостоянных возобновляемых источников электроэнергии, и помогают

повысить безопасность и надежность за счет нового качества предоставляемых данных и сокращения времени принятия решений при авариях.

#### Литература

1. Анисимов, А. И. Цифровая подстанция. Эффективные решения / А. И. Анисимов // Информатизация и системы упр. в пром-сти. – 2019. – № 1 (79).
2. Аношин, А. О. Стандарт МЭК 61850. Протокол передачи мгновенных значений тока и напряжения / А. О. Аношин, А. В. Головин // Новости электротехники. – 2013. – № 2 (80).
3. Аношин, А. О. Стандарт МЭК 61850. Протокол GOOSE / А. О. Аношин, А. В. Головин // Новости электротехники. – 2012. – № 6 (78).

## ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕГОНКИ НА СВОЙСТВА ПЕЧНОГО БЫТОВОГО ТОПЛИВА И ЕГО СМЕСИ С ЭТАНОЛОМ

А. А. Ковальчук

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

Научный руководитель Е. Н. Макеева

*Исследованы свойства печного бытового топлива и его смеси с этанолом до и после вторичной перегонки. Определена оптимальная концентрация этанола в смеси с печным бытовым топливом, при которой получены наилучшие показатели.*

**Ключевые слова:** печное бытовое топливо, этанол, вторичная перегонка, кривая разгонки.

В статье рассматриваются виды и особенности печного бытового топлива (ПБТ) и его смеси с этанолом, а также свойства топлива до перегонки и полученного дистиллята. Экспериментально исследуется фракционный состав топлива. Определяется эффективность использования этанола в качестве добавки и его оптимальная концентрация.

Печное бытовое топливо – это продукт нефтепереработки, который получают из дизельных фракций нефти вторичной перегонки. Такой способ изготовления обуславливает относительно невысокие затраты на его производство [3].

Классификация печного топлива проводится по ряду критериев. По характеристикам вязкости, теплоотдачи и температуре застывания печное топливо делится на следующие марки: легкое, среднее, тяжелое [2].

Кроме того, печное бытовое топливо может быть темным или светлым. Темное топливо используется в основном для бытовых нужд. Оно отлично подходит, когда нужно обогреть небольшой дом или подсобное помещение, а также используется в небольших энергоустановках. Также оно обладает целым комплексом преимуществ – очень экономично и энергоэффективно за счет того, что имеет высокую калорийность. Можно еще добавить, что этот вид топлива обладает низкой температурой замерзания, – начинает замерзать только при температурах  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже [2].

Экспериментальное исследование фракционного состава и температуры вспышки проводилось на установках АРН-ЛАБ-03 и ТВО-ЛАБ-01 (рис. 1).



Рис. 1. Схема установки АРН-ЛАБ-03 и ТВО-ЛАБ-01

По полученным экспериментальным данным были построены кривые разгонки для печного бытового топлива и его смеси с этанолом, показывающие зависимость объема дистиллята (в процентах) от температуры кипения.

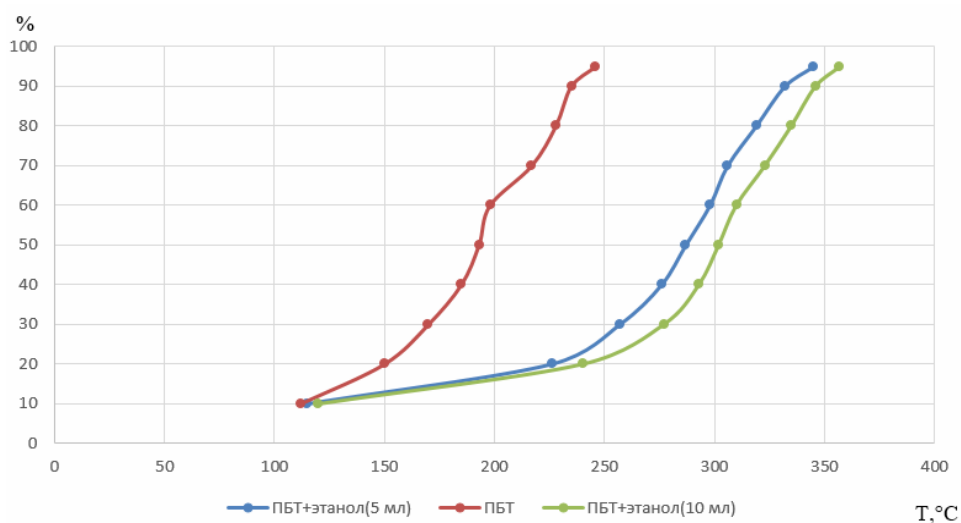


Рис. 2. Кривые разгонки

Из рис. 2 видно, что имеются значительные отличия в температурах кипения для данных видов топлива. Температура 50 % объема выкипания оказывает влияние на быстроту прогрева холодного двигателя. Температура 90, 97,5 % объема и конец кипения характеризуют полноту испарения топлива.

Были определены основные свойства топлив до перегонки и полученного дистиллята (рис. 4) [1].



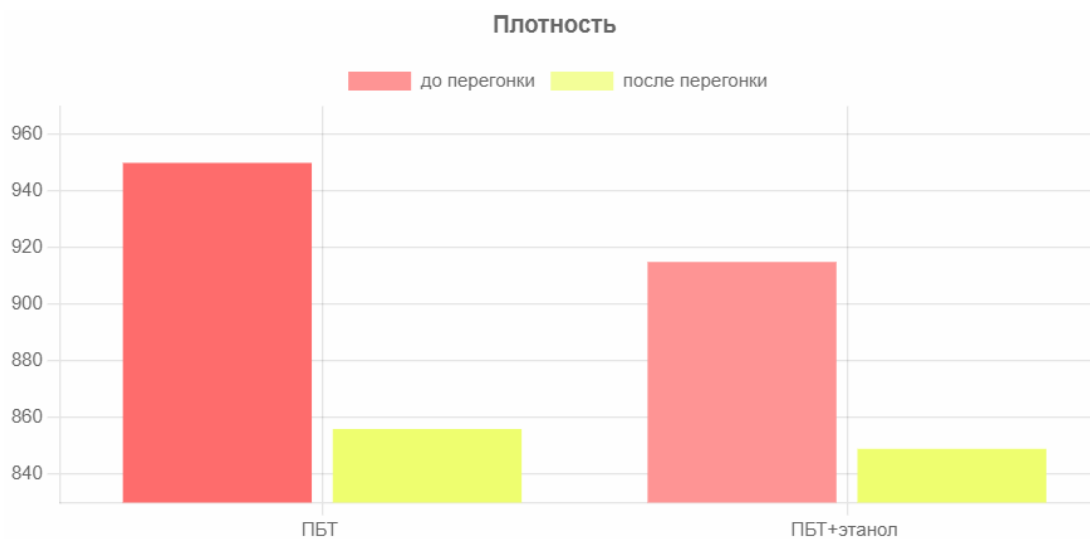


Рис. 3. Плотность

Диаграммы показывают незначительное изменение плотности печного бытового топлива после добавления 5 мл этанола.

Основными характеристиками печного бытового топлива являются коксующесть, кислотность, зольность, кинематическая вязкость, температура вспышки, плотность [4].

#### Характеристики печного бытового топлива

Показатели	Значения		
	ПБТ	ПБТ + этанол	ПБТ + этанол (дистиллят)
Фракционный состав: 10 % перегоняется при температуре, °С, не ниже	205	5 мл – 230 10 мл – 112	– –
90 % перегоняется при температуре, °С, не выше	360	5 мл – 380 10 мл – 354	– –
Кинематическая вязкость при 20 °С, м²/с	8,0	–	–
Температура застывания, °С, не выше	–15	–	–
Температура вспышки, °С	45	5 мл – 38,2 10 мл – 33,2	5 мл – 49,6 10 мл – 44,7
Цвет	Красновато-коричневый	Красновато-коричневый	Желтоватый
Плотность, кг/м³	930	922	849
Содержание механических примесей	отсутствует	отсутствует	отсутствует

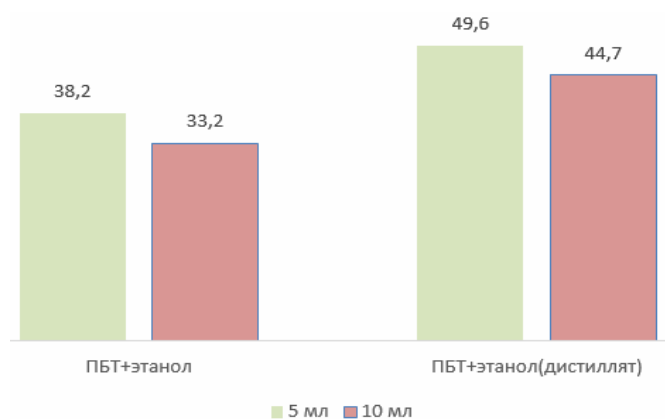


Рис. 4. Температуры вспышки

Важным показателем, характеризующим взрывопожароопасность веществ, является температура вспышки. Температурой вспышки называется наименьшая температура горячей жидкости, при которой образовавшиеся над ее поверхностью пары и газы вспыхивают от источника зажигания, при этом сама жидкость не воспламеняется. Из опыта следует, что ПБТ является легковоспламеняющейся жидкостью. Добавление в качестве присадки этанола различной концентрации снижает температуру вспышки, что указывает на повышение взрывоопасности вещества.

#### Литература

1. Вторичные процессы перегонки нефтепродуктов. Топливо. – Режим доступа: [http:// earchive.tru.ru/bitstream/11683/29848/1/TPU199250.pdf](http://earchive.tru.ru/bitstream/11683/29848/1/TPU199250.pdf). – Дата доступа: 29.01.2023.
2. Классификация печного бытового топлива. – Режим доступа: <https://oilselling.ru/2016/10/21/klassifikacia-pechnogo-topliva/>. – Дата доступа: 29.01.2023.
3. Печное бытовое топливо. – Режим доступа: <https://www.ngpedia.ru/id518408p1.html>. – Дата доступа: 29.01.2023.
4. ТУ 38.101656–99. Топливо печное бытовое.

## ТЕПЛОБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ И ИХ МАСЛОФРЕОНОВЫХ СМЕСЕЙ

В. П. Никитенко

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Для обеспечения эффективного теплообмена в конденсаторах теплоэнергоустановок важным становится проведение исследований теплообмена с установлением связи между теплотехническими характеристиками при конденсации, тепловой нагрузкой, давлением насыщения, теплофизическими характеристиками, влияющими на КТО при передаче теплоты.*

**Ключевые слова:** озонобезопасные хладагенты, маслофреоновые смеси, теплообмен, конденсация.

В настоящее время вновь выпускаемое оборудование для холодильных, теплонасосных установок и систем кондиционирования воздуха должно работать на озонобезопасных с низким потенциалом глобального потепления хладагентах (R404A,

R407C, R410A). Однако при их использовании в установках образуется маслофреоновая смесь, которая приводит к изменению не только интенсивности теплоотдачи при конденсации, но и к изменению механизма этих процессов. Изменение состава хладагента в процессе эксплуатации установки затрудняет также регулирование режимных параметров и ведет к изменению коэффициентов теплоотдачи в испарителе и конденсаторе. В связи с этим становится актуальным проведение теоретических и экспериментальных исследований процессов теплообмена при фазовых переходах чистых хладагентов и их маслофреоновых смесей на гладких и развитых поверхностях различного типа, а также получение обобщенных зависимостей для расчета интенсивности теплоотдачи процесса конденсации. Это возможно только на основе проведения теоретических и экспериментальных исследований с последующим применением их для расчета и разработки теплообменных аппаратов холодильных, теплонасосных установок и систем кондиционирования воздуха.

Исследование процесса теплообмена при конденсации озонобезопасных хладагентов (R404A, R407C, R410A) и их маслофреоновых смесей (с концентрацией масла 0, 5, 10 %) проводились на экспериментальной установке, представленной на рис. 1, при плотностях теплового потока в диапазоне  $1,027\text{--}17,123\text{ кВт/м}^2$  и при давлениях насыщения  $p_n = 0,96\text{--}1,1\text{ МПа}$ .

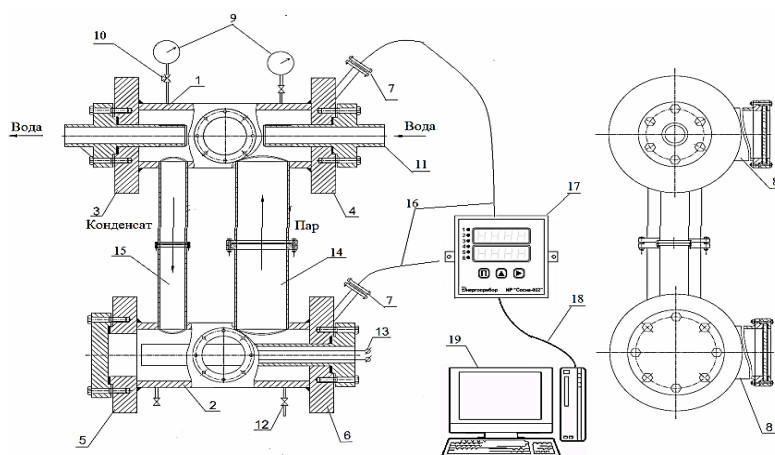


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Расположение термопар, фиксирующих изменение температуры при заданной тепловой нагрузке, на исследуемом образце изображено на рис. 2.

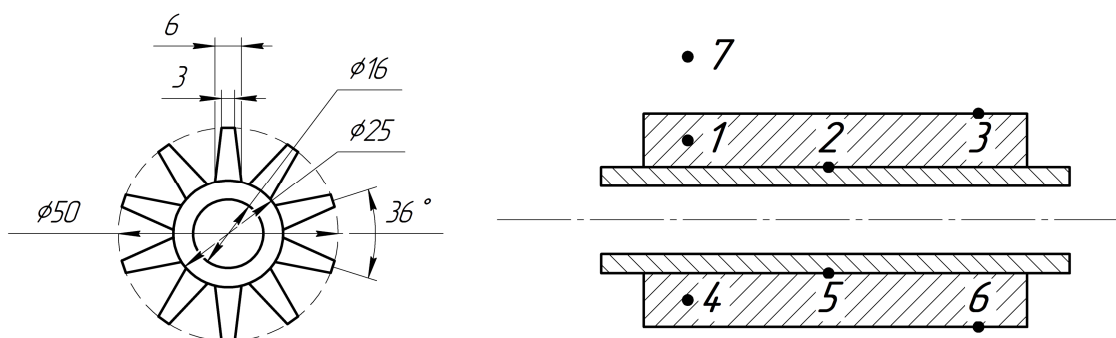


Рис. 2. Расположение термопар на исследуемом образце

Оребрение труб пучка позволяет, во-первых, увеличить общую площадь поверхности конденсации, а во-вторых – использовать силы поверхностного натяжения, которые стягивают образующуюся пленку конденсата к основанию ребер. Оба фактора приводят к существенной интенсификации процесса теплопереноса в горизонтальных конденсаторах с оребренными трубами.

Экспериментальные исследования теплофизических свойств фреонов при конденсации их паров в конденсаторах холодильных машин проводились как для чистых фреонов, так и для фреонов в смеси с компрессорным маслом. В отличие от хладагента масло не подвергается фазовым изменениям, происходящим в теплообменниках. Концентрация масла составляет 5 и 10 % от общей массы рабочего тела.

Плотность теплового потока  $q$  принималась в расчете на площадь несущей (основной) поверхности образца. Плотность теплового потока определяется по формуле

$$q = \frac{Q}{F},$$

где  $Q$  – количество тепловой энергии, подводимое к образцу в установившемся стационарном режиме теплообмена;  $F$  – площадь тепловоспринимающей поверхности [1].

Результаты экспериментальных исследований по конденсации чистых озонобезопасных хладагентов R404a, R407c, R410a и их маслофреоновых смесей на исследуемом образце даны на рис. 3, 4 соответственно. Графические зависимости описывают изменение коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, подводимого к поверхности, в межреберном пространстве и на ребре исследуемого образца.

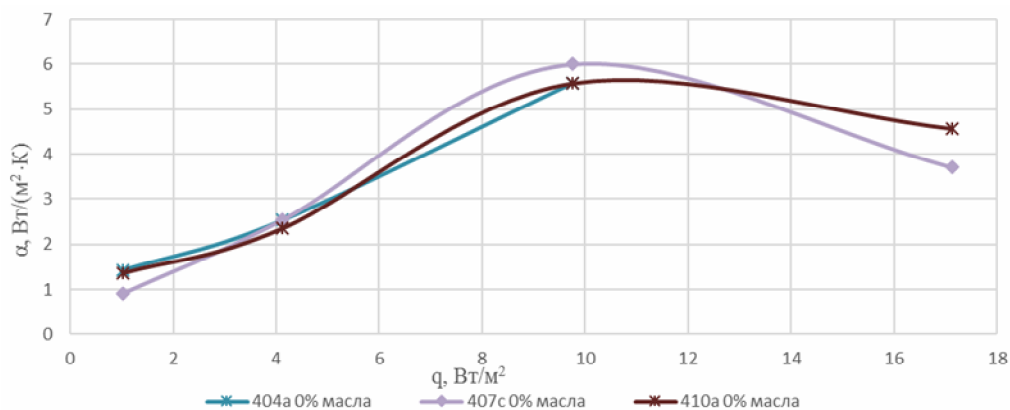


Рис. 3. Графические зависимости  $\alpha = f(q)$  в среднем по поверхности образца

Графические зависимости, представленные на рис. 3, описывают процесс теплообмена при конденсации паров исследуемых хладагентов на всей поверхности образца.

Степень влияния масла на процесс теплоотдачи при конденсации описана графическими зависимостями, для конкретного стационарного режима течения процесса конденсации, приведенными на рис. 4.

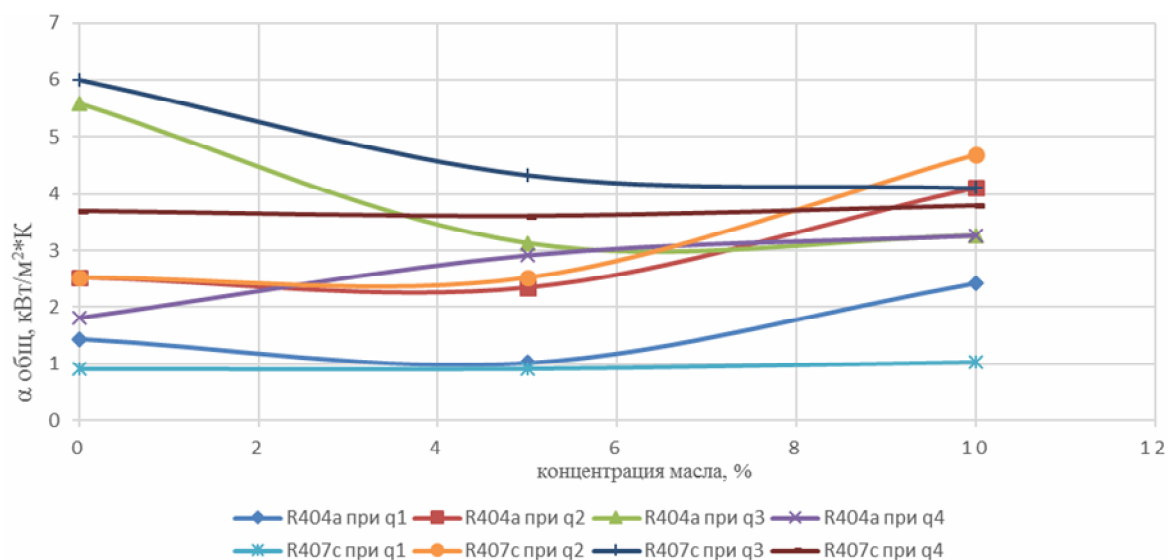


Рис. 4. Графические зависимости  $\alpha = f(\omega_{\text{масла}})$  для фреонов R404a, R407c

Добавление масла негативно сказывается на процессе конденсации паров рассмотренных фреонов, уменьшение коэффициента теплоотдачи связано с увеличением толщины пленки конденсата за счет дополнительного термического сопротивления масляной пленки. Масло захватывается парами хладагента и уносится из камеры кипения в камеру конденсации. Визуально было замечено наличие масляного тумана при исследовании процесса конденсации маслофреоновой смеси рассмотренных фреонов.

С увеличением интенсивности парообразования в камере конденсации на первых этапах начнет конденсироваться масло, уносимое парами фреона из камеры кипения, при этом на исследуемом образце образуется масляная пленка. На поверхности масляной пленки при дальнейшей интенсификации парообразования образуется слой конденсата фреона. Масло несущественно влияет на коэффициент теплоотдачи в рассмотренном диапазоне тепловых нагрузок, связано это с тем, что данный тип масла хорошо растворяется в парах фреона и не образует существенного термического сопротивления пленки конденсата.

#### Литература

1. Кутателадзе, С. С. Теплопередача при конденсации и кипении / С. С. Кутателадзе. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. – Л. : Машгиз, 1952. – 232 с.
2. Бабакин, Б. С. Хладагенты, масла, сервис холодильных систем : монография / Б. С. Бабакин. – Рязань : Узоречье. – 470 с.
3. Цветков, О. Б. Свойства холодильных масел и маслофреоновых растворов : учеб. пособие / О. Б. Цветков, О. Н. Цветков, Ю. А. Лаптев. – СПб. : СПбГУНиПТ, 2010. – 188 с.
4. Овсянник, А. В. Теплообмен и моделирование при кипении на теплоотдающих поверхностях / А. В. Овсянник. – Lambert Academic Publishing, 2018. – 348 с.

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ГРАДИРНИ****В. В. Чернявская, М. В. Стрельцов***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Н. В. Широглазова

*Проанализированы и определены методы повышения эффективности работы градирни.*

**Ключевые слова:** градирня, ороситель, водоуловитель, водораспределительное устройство, обледенение, поворотные щиты, водяная завеса.

Градирня – это промышленная установка, предназначенная для охлаждения оборотной воды, используемой для отведения тепла от технологического оборудования в системах оборотного водоснабжения.

На сегодня градирни – наиболее эффективные охлаждающие устройства в промышленности.

Данные устройства применяют на промышленных предприятиях, атомных электростанциях и ТЭЦ для отвода тепла от технологического оборудования и увеличения выработки продукции.

В зависимости от температуры, предназначения охлажденной воды и способа отдачи тепла градирни подразделяют на испарительные, сухие и гибридные. С учетом области применения выделяют: испарительные, сухие, гибридные, открытые, закрытые, башенные (в том числе с естественной тягой воздуха), вентиляторные, поперечноточные, противоточные, эжекционные, пленочные.

Преимуществом вентиляторных градирен является легкость ремонта, что не скажешь про башенные градирни.

Новые башенные градирни не строятся в связи с запуском Белорусской АЭС, поэтому требуется реконструкция старых.

С целью повышения эффективности работы градирен необходим комплексный подход при их реконструкции, а также всех взаимосвязанных с ними технологических узлов, оказывающих влияние на изменения эксплуатационных характеристик системы технического водоснабжения.

Главной задачей реконструкции является не только замена устаревшего оборудования, но и повышение охлаждающей способности градирни – главной характеристики ее работы.

При реконструкции градирни необходимо проведение следующих работ: реконструкция водораспределительной системы, замена оросительного устройства, монтаж системы зимнего обогрева.

Наиболее важный узел градирни – это блоки оросителя. Тепло и массообменные свойства оросителя наряду с аэродинамическими определяют в основном эффективность градирни, т. е. влияют на выбор необходимого размера новой градирни или оценку возможностей теплосъема существующей градирни. Для оросителей используются различные материалы: дерево, цемент, пластмасса. Раньше широко были распространены деревянные оросители. Но деревянные бруски в процессе работы быстро разрушаются, что является их существенным недостатком и ограничивает их применение. Происходит это потому, что древесина чувствительна к химическому и биологическому воздействию. Некоторое применение нашли асбошиферные оросители, но из-за канцерогенности асбеста они постепенно были запрещены во многих странах.

В последние годы широкое распространение получили пластмассовые оросители. Их преимущество заключается в том, что изделиям из них можно придать любую форму.

В таблице представлены характеристики оросителя типа NC20-25.

Характеристика материала	Значение характеристики/количество баллов от 1 до 5		
	Поливинилхлорид	Полиэтилен	Полипропилен
Механическая прочность	Высокая 5 баллов	Низкая 2 балла	Высокая 5 баллов
Стойкость к низким температурам	Низкая (хрупкий) 2 балла	Высокая 5 баллов	Высокая 5 баллов
Пожаробезопасность	Высокая 5 баллов	Низкая 2 балла	Высокая 4 балла
Толщина стенки	Не более 0,3–0,5 мм 2 балла	1,5–2 мм 5 баллов	1,5–2 мм 5 баллов
Возможность сваривать	Склеиваются клеем 2 балла	Имеется 5 баллов	Имеется 5 баллов
Экологические показатели	Ядовит при горении (разложении) 0 баллов	Высокие 5 баллов	Высокие 5 баллов
Плотность	1,4–1,6 г/см <sup>3</sup> 2 балла	1,0 г/см <sup>3</sup> 4 балла	0,9 г/см <sup>3</sup> 5 баллов
<b>Сумма баллов</b>	<b>18 баллов</b>	<b>28 баллов</b>	<b>34 балла</b>

В зависимости от способа охлаждения воды в результате контакта с воздухом различают три типа оросителя.

1. Плёночные ТМУ – асбоцементные, деревянные. Охлаждение происходит в результате контакта воздуха с водяной плёнкой, образующейся на элементах при обтекании их падающей сверху водой. Применялись до 90-х гг.

2. Капельно-плёночные 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 плёнки и малой степени дробления капель.

3. Капельные ТМУ – оросители решетчатой структуры. Структура и величина поверхности охлаждения, образующейся при раздроблении воды в решетнике, активная поверхность охлаждения определяются свободной поверхностью капель, падающих с одних элементов на другие. 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.

Мировой практикой установлено, что по экономическим, тепловым и аэродинамическим показателям максимальный эффект в полимерных конструкциях достигается в оросителях, имеющих решетчатую структуру.

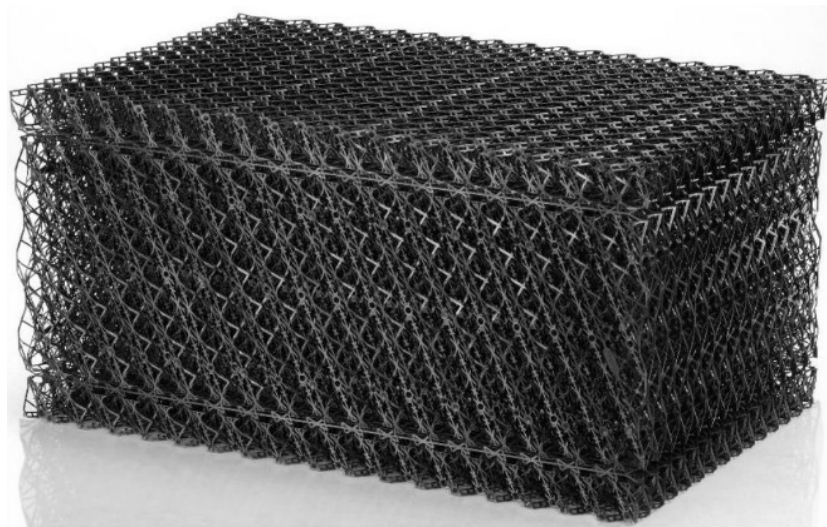


Рис. 1. Ороситель типа NC20-25

Немаловажную роль в градирнях выполняют водораспределительные устройства. Водораспределительные устройства градирен можно разделить на три основные группы: разбрызгивающие, без разбрызгивания и подвижные. Разбрызгивающие устройства, в свою очередь, подразделяются на безнапорные, представляющие собой системы открытых желобов или труб с соплами разбрызгивателями, к которым вода подводится с большим или меньшим напором. В промышленных современных градирнях в нашей стране в последнее время применяются, как правило, разбрызгивающие напорные водораспределительные устройства с направлением водораспределительных сопел вниз, что позволяет металлу менее корродировать и подавать воду с меньшим напором в целях экономии энергии.

Конструкция и размещение блоков водоуловителя обеспечивает: равномерное распределение потоков воздуха по площади градирни, отсутствие сквозных щелей и отверстий по площади градирни, включая места вокруг колонн и места примыкания к обшивке градирни, максимальное использование существующей опорной конструкции под установку водоуловителя с минимальными затратами на дополнительные конструкции под его установку, механическую обработку блоков для изменения их геометрических размеров при размещении их на месте во время монтажа, сохранение геометрических размеров и формы блоков водоуловителя с учетом воздействия на них потока воздуха, собственного веса и возможных отложений.

Снижение температуры охлажденной воды в градирне приводит к ее обледенению. Интенсивному обледенению наиболее подвержена периферийная часть градирни, кроме того, появляется опасность образования шуги в циркуляционной воде.

Наиболее эффективным методом предотвращения обледенения и регулирования температуры охлажденной воды после градирни является комбинированный метод – одновременное создание водяной завесы и установка на воздухоходных окнах градирни поворотных или съемных щитов.

Поворотные щиты обеспечивают возможность в широком диапазоне регулировать расход воздуха, поступающего в градирню.

Создание водяной завесы при комбинированном методе исключает обмерзание технологических и конструктивных элементов по периферии градирни от потоков холодного воздуха, который прорывается через зазоры в щитах.



Водяная завеса создает дополнительное сопротивление на входе воздуха в подросительное пространство градирни, снижает тягу и уменьшает расход воды через ороситель градирни примерно на 25 %. Это приводит к ухудшению охлаждающей способности градирни и увеличению температуры охлажденной воды в ней, что препятствует обмерзанию периферийной части градирни.

Реконструкция водоохлаждающих устройств градирни позволит добиться повышения охлаждающей способности, что, в свою очередь, даст возможность вырабатывать дополнительную энергию и получить экономию топлива.

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ ГОМЕЛЬСКОЙ ТЭЦ-1

А. Г. Кулеш, А. М. Пархомович

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

Научный руководитель П. В. Лычѳ

*Процесс электроснабжения неизбежно связан с материальными издержками, обусловленными как технологическими факторами: холостой ход трансформаторов, потери в сопротивлениях линии; так и случайным: недоотпуск электроэнергии вследствие, например, аварийного выхода из строя элемента сети. Недостаток надежности способен привести к издержкам много большим, чем потери в сети. Рассмотрен конкретный пример схемы и дано предложение по повышению надежности.*

**Ключевые слова:** схема выдачи электроэнергии, надежность, экономичность, реконструкция.

Предложена к рассмотрению существующая система выдачи электроэнергии (ЭЭ) Гомельской ТЭЦ-1, представленная на рис. 1.

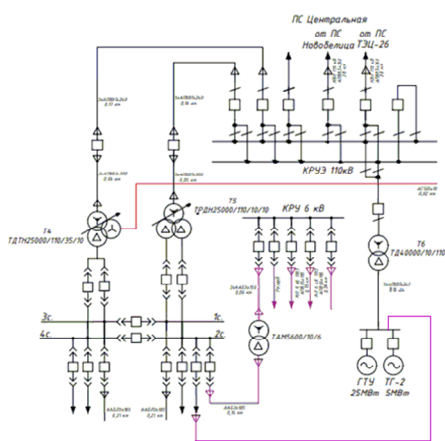


Рис. 1. Существующая схема выдачи электроэнергии

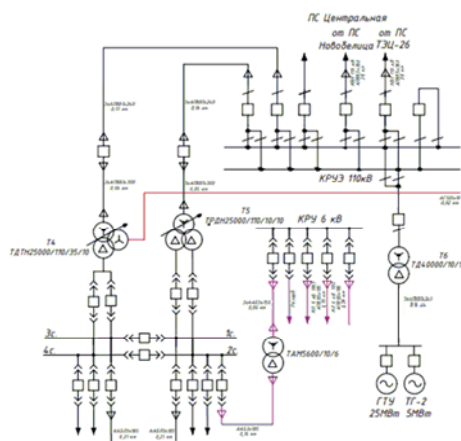


Рис. 2. Реконструированная схема выдачи электроэнергии

На данный момент ЭЭ от генерирующих агрегатов ТТУ и ТГ-2 (мощностью 25 и 5 МВт соответственно) передается к нагрузкам на секциях шин КРУ 10 кВ единственным способом, проходя через ТД-40000/110/110, 3 × АПВЗ × 240 (длиной 500 м от машинного зала к ТД), ТРДН-25000/110/10.

Предложено внедрить следующее мероприятие: проложить кабельную перемычку от машинного зала непосредственно к комплектному распределительному устройству (КРУ) 10 кВ.

Мероприятие обеспечит нагрузку доступом к ЭЭ двумя возможными путями.

В рамках мероприятия в реконструируемой схеме можно в качестве кабельной перемычки использовать кабель 10 кВ марки  $3 \times \text{АПВВНГ } 3 \times 240$  длиной 200 м и проложить его в существующей кабельной эстакаде, а также в бетонном кабельном канале до КРУ 10 кВ.

Кроме повышенной надежности схема отличается от предшествующей экономичностью выдачи ЭЭ. Необходимо оценить экономичность посредством сравнения потерь ЭЭ в схемах, представленных на рис. 1, 2.

Источники и величины потерь электроэнергии в существующей схеме выдачи электроэнергии Гомельской ТЭЦ-1 даны в таблице.

**Источники и величины потерь электроэнергии  
в существующей схеме выдачи электроэнергии Гомельской ТЭЦ-1**

Оборудование	Параметр	Величина	Потери э/э до реконструкции	Потери э/э после реконструкции
ТРДН-25000/110	$\Delta W_{\text{ХХ}}$	МВт · ч/год	236,52	236,52
	$\Delta W_{\text{обм}}$	МВт · ч/год	304,819	–
$3 \times \text{АПВПЗ} \times 300 (500/200 \text{ м})$	$\Delta W_{\text{Л}}$	МВт · ч/год	96,8	38,72
ТД-40000/110	$\Delta W_{\text{ХХ}}$	МВт · ч/год	245	–
	$\Delta W_{\text{обм}}$	МВт · ч/год	158,76	–
<i>Итого</i>			1041,899	275,24

Значения потерь в ТРДН-25000/110, ТД-40000/110 и кабеле получены при передаваемой мощности, равной 18 МВА, времени холостого хода  $T_{\text{ХХ}} = 8760$  и  $4900$  ч, времени наибольших потерь  $T = 4900$  и  $4900$  ч соответственно.

Трансформатор ТД будет выведен в резерв, по трансформатору ТРДН мощность из машинного зала поступать не будет, тогда источники потерь ЭЭ в новой схеме станет кабельная линия длиной 200 м и холостой ход трансформатора ТРДН. В нынешней схеме электроснабжения суммарные потери ЭЭ составляют  $1041,899$  МВт · ч/год, в реконструированной составят  $275,24$  МВт · ч/год.

Расчет потерь электроэнергии в кабельной линии 200 и 500 м для обеих схем производился по формуле 1:

$$\Delta W = \left( \frac{S_p}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}} \right)^2 \left( \frac{r_0 \cdot l}{n} \right) T. \quad (1)$$

Расчет потерь в обмотках трансформатора – по формуле (2):

$$\Delta W = \Delta P_x \left( \frac{S_p}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2 T. \quad (2)$$

Значение  $\Delta P_x$  для ТРДН-25000/110, ТД-40000/110 – 120 и 160 кВт соответственно.

Расчет потерь холостого хода – по формуле (3):

$$\Delta W = \Delta P_x T. \quad (3)$$

Значение  $\Delta P_x$  для ТРДН-25000/110, ТД-40000/110 – 27 и 50 кВт соответственно.

Таким образом, приведенное мероприятие повысит надежность электроснабжения данной схемы: суммарные потери ЭЭ до реконструкции составляли 1041,899 МВт · ч/год, после – 275,24 МВт · ч/год. Количественно эффективность мероприятия можно оценить как разницу потерь ЭЭ до и после реконструкции. Она составит  $1041,899 - 275,24 = 766,659$  МВт · ч/год.

#### Л и т е р а т у р а

1. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.

## ЦИФРОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

**М. В. Деделко, Д. А. Ганущак**

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

Научный руководитель В. А. Панасик

*Рассмотрена тема развития энергетики: внедрение цифровых подстанций, достоинства и недостатки. Приведена типовая структура цифровой подстанции и пример ее реализации в Республике Беларусь.*

**Ключевые слова:** цифровые подстанции, современные технологии, дистанционный мониторинг, автоматизация.

Одной из главных задач сетевых предприятий и организаций является бесперебойное снабжение потребителей электрической энергией надлежащего качества. Новые технологии производства современных систем управления перешли из стадии научных исследований и экспериментов в стадию практического использования. Разработаны и внедряются современные коммуникационные стандарты обмена информацией. Широко применяются цифровые устройства защиты и автоматики. Появление новых международных стандартов и развитие современных информационных технологий открывает возможности инновационных подходов к решению задач автоматизации и управления энергообъектами, позволяя создать подстанцию нового типа – цифровую подстанцию.

Цифровая подстанция, – это подстанция, оснащенная комплексом цифровых устройств, обеспечивающих функционирование систем релейной защиты и автоматики, учета электроэнергии, АСУ ТП, регистрации аварийных событий по протоколу МЭК 61850. Цифровая подстанция обладает многочисленными преимуществами по сравнению с традиционной подстанцией.

Достоинства построения оптимального цифровой ПС являются:

– значительно меньшее общее количество и номенклатура оборудования в составе ПТК, что снижает объем профилактического обслуживания, сокращает время восстановления работоспособности и требуемые объемы ЗИП;

– значительное снижение количества кабельных связей в составе комплекса и их полная диагностируемость, что ускоряет поиск неисправности и сокращает время восстановительного ремонта;

– сокращение времени поставки и затрат на поставку ЗИП за счет использования вычислительных и коммуникационных средств общего назначения (серверов) в составе системы, которые имеют более низкую стоимость по сравнению со специальными, при более высокой производительности;

– снижение объемов и частоты периодических проверок за счет организации более оптимального планирования профилактических и необходимых восстановительных работ.

Недостатки применения ЦПС могут быть в случае использования неоптимального ПТК с дублированием, что приведет к увеличению стоимости оборудования.

Кроме того, «остро» встает вопрос кибербезопасности.

Существует 3 иерархических уровня подстанции:

1. **Уровень процесса.** Уровень процесса находится в нижней части иерархии. Он включает в себя все первичные устройства, такие, как распределительные устройства высокого напряжения или среднего напряжения и трансформаторы. Он также содержит устройства интерфейса процесса, такие, как модули объединения и блокирующие устройства (интеллектуальные электронные устройства).

2. **Уровень присоединения.** Этот уровень включает все контрольные и защитные СВУ. Электронное оборудование для контроля, защиты, связи и других функций, таких, как мониторинг и диагностика, часто упоминается как вторичное оборудование.

3. **Станционный уровень.** Уровень станции включает в себя главным образом оборудование для управления и защиты станции, станцию НМИ, регистраторы помех и способы передачи данных, например, в центр управления сетью. Другие важные функции, такие, как питание вспомогательной станции, не упоминаются в явном виде.

Подробная структурная схема организации уровней цифровой подстанции представлена на рис. 1.

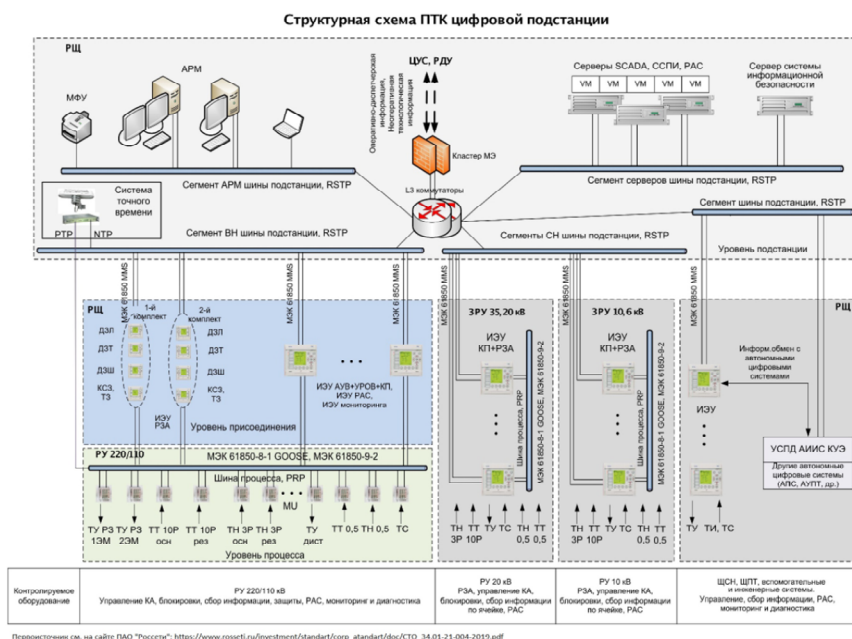


Рис. 1. Структурная схема ПТК цифровой подстанции

В данной работе детально разобрана концепция цифровой подстанции, реализованная на ПС-110 «Приречная». В 2015 г. в РУП «Гомельэнерго» было выполнено расширение ПС 110 кВ «Приречная» со строительством модульного здания ЗРУ 10 кВ, ОПУ, одного комплекта ячеек КРУН 6 кВ и установкой двух трансформаторов мощностью 25 МВА каждый. Однако главной особенностью нового энергетического объекта стала система релейной защиты, построенная на шине процесса Hard Fiber. Реконструированная подстанция находится в микрорайоне «Шведская горка».

Система «Hard Fiber Process Bus» была применена при реализации проекта на ПС-110 «Приречная». Произведена она компанией «General Electric» (США) и представляет собой совокупность выносных модулей ввода/вывода с передачей данных при помощи оптоволоконного кабеля. Выносные модули получили название «Bricks» (с англ. – «кирпичи»). Схема открытого распределительного устройства (ОРУ) 110 кВ подстанции реализована в виде двойной системы шин с обходной с семью присоединениями: две ВЛ 110 кВ, три трансформатора, ШСВЭ, ОВЭ. В качестве устройств релейной защиты присоединений 110 кВ были применены микропроцессорные терминалы РЗА GEMultilin серии UR, в которых платы аналоговых входов были заменены на платы ввода МЭК 61850 (оптический Ethernet). На каждом присоединении 110 кВ установлено по два Brick, подключенных к разным кернам трансформаторов тока. Также на них заведены вторичные цепи трансформаторов напряжения. Переключение с одного ТН на другой производится вручную испытательными блоками. Операции отключения и включения выключателя выполняются контактами Brick по командам устройств РЗА. В каждом Brick имеется 4 независимых цифровых ядра и, таким образом, к одному Brick можно подключить до четырех устройств защиты по схеме «точка – точка». Для защиты каждого присоединения используется два одинаковых терминала защиты, каждый из которых может общаться с каждым Brick, установленным на выключателе. Следовательно, неисправность любого компонента системы не приводит к отказу релейной защиты. Все оптические кабели, приходящие с ОРУ от Brick, собираются в шкафах дифзащит сборных шин. Оттуда через панель кросс-коммутации соединяются с устройствами защиты присоединений. Все сигналы блокировок либо пусков между терминалами защит (пуск устройства резервирования отказа выключателей, запрет автоматического повторного включения, внешнее отключение и т. п.) передаются по оптическим линиям связи через виртуальные входы и выходы Brick. Поэтому при организации взаимодействия терминалов защит между собой пришлось применить решения по передаче этих сигналов. Особенно это коснулось взаимодействия с терминалами дифференциальной защиты шин, у которых отсутствуют дискретные входы и выходы.

Цифровая подстанция – это будущее энергетики. Их использование должно позволить в будущем существенно сократить затраты на проектирование, строительство, монтажные и пусконаладочные работы, на обслуживание всей системы и эксплуатационные затраты и т.д. Цифровые технологии дают возможность полного дистанционного контроля, что повысит уровень бесперебойной работы подстанций за счет нового качества предоставляемых данных и сокращения времени принятия решений при авариях, а также более высокую безопасность для самого человека и экологии в целом благодаря уменьшению расходуемого материала и площади, необходимой для строительства подстанции.

#### Литература

1. Энергетика Беларуси. / реконструкция и развитие. – Режим доступа: <https://www.energo.by/upload/iblock/a5b/a5b66e9fd20bcb10a0a7a222ced7df7a.pdf>. – Дата доступа: 04.04.2023.
2. Elensis.ru / цифровые подстанции. – Режим доступа: <https://clck.ru/Xx9Jg>. – Дата доступа: 04.04.2023.

## ТИПОВЫЕ ПРОЕКТЫ МИНИ- И МИКРОЭЛЕКТРОСЕТЕЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИЗОЛИРОВАННЫХ РАЙОНАХ

М. А. Султанов

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Научный руководитель А. Я. Джумаев

*Представлены разработанные типовые проекты мини и микро электросетей для использования в изолированных районах, в частности, для населенных пунктов в регионах Туркменистана.*

**Ключевые слова:** мини- и микросети, система энергоснабжения, фотоэлектрическая солнечная станция, удельная выработка фотоэлектрической солнечной станции.

Туркменистан характеризуется высоким уровнем энергетической самостоятельности и относительно более низкой диверсификацией энергетических ресурсов. Одним из направлений диверсификации топливно-энергетических ресурсов и долгосрочного устойчивого развития энергетики является развитие возобновляемой энергетики страны.

«Национальная стратегия Туркменистана по развитию возобновляемой энергетики до 2030 года» разрабатывался 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 (Постановление Президента Туркменистана от 4 декабря 2020 г.) [1]. Национальная стратегия содержит перечень мер поддержки развития возобновляемых источников энергии, который состоит из следующих разделов: стратегическое планирование; экономическое стимулирование; обучение и информирование; наука и исследования; электроэнергетика (солнечная и ветровая энергетика; строительство промышленных солнечных и ветроэлектрических станций; строительство мини- и микро-солнечных и ветроэлектрических станций для собственных нужд с подключением к государственным электрическим сетям; строительство локальных изолированных солнечных и ветроэлектрических станций; прочие виды ВИЭ); развитие мини- и микроэлектросетей в удаленных районах; системная интеграция; развитие «умных электросетей» (Smart Grid); пропускная способность электросетей; предоставление услуг по передаче и распределению электроэнергии); отопление и охлаждение (использование гелиоколлекторов для горячего водоснабжения; использование тепловых насосов; теплоснабжение промышленных объектов с использованием ВИЭ; чистое приготовление пищи в удаленных районах (при необходимости)). Согласно этой Национальной стратегии в разделе «Развитие мини- и микроэлектросетей в удаленных районах» планируется реализация следующих мероприятий:

– определение целевых показателей электрификации удаленных районов с использованием автономных систем, мини- и микроэлектросетей;

– разработка нормативных правовых актов, определяющих порядок землеотвода под линии электропередач (опоры линий электропередачи);

– разработка типовых проектов мини- и микро- электросетей для использования в изолированных районах;

– разработка и производство модульных решений для строительства мини- и микроэлектросетей в изолированных районах;

– разработка упрощенного порядка получения разрешения на строительство мини- и микроэлектросетей в изолированных районах в случае использования типовых проектов и модульных решений;

– определение налоговых льгот, включая льготы на землю, при строительстве мини- и микроэлектросетей в удаленных районах.

С целью реализации этих мероприятий нами были разработаны типовые проекты мини- и микроэлектросетей для использования в изолированных районах. Рассмотрим некоторые типовые проекты энергоснабжения удаленных населенных пунктов. Для строительства фотоэлектрической солнечной станции (ФСС) мощностью 900 кВт в селе Кирпили Бахерденского этрапа Ахалского веляята (количество домов – 177) и фотоэлектрической солнечной станции (ФСС) мощностью 1200 кВт в селе Бори Гокдепинского этрапа Ахалского веляята (количество домов – 238) были выбраны следующие компоненты системы для базового блока: фотоэлектрические солнечные модули – выбраны из базы данных PVsyst [2] и приняты (типа SPR-415-WHT-D) от производителя Sunpower, центральный трехфазный инвертор – выбран из базы данных PVsyst – Bosch BPT-C300 производства Bosch Power Tec. Расчет и оптимизация были выполнены с использованием программы PVsyst, так как в этом ПК имеется встроенный модуль, который позволяет оптимизировать количества модулей в каждом ряде, и по количеству рядов на основе выбранных компонентов.

В результате расчетов основного базового блока ФСС мощностью 300 кВт обладает следующими характеристиками, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные характеристики основного базового блока ФСС мощностью 300 кВт

Показатели	Значения
Мощность ФСС	300 кВт
Мощность фотоэлектрического модуля	415 Вт
Количество фотоэлектрических модулей	720
Количество фотоэлектрических модулей соединенных последовательно в ряде	10
Количество рядов	72
Площадь фотоэлектрических модулей	1557 м <sup>2</sup>
Количество инверторов	1

Рассмотрим районы Ахалского веляята на предмет возможностей и целесообразности установки солнечных электростанций в частном секторе, а также рассмотрим возможность использования ФСС в населенных пунктах, изолированных от центрального энергоснабжения. В табл. 2 приведены данные среднегодовых значений интенсивности солнечного излучения падающая на наклонную поверхность солнечной батареи при различных углах наклона к горизонту для районов Ахалского веляята [3].

Определяем общее количество электроэнергии, которое может выработать один солнечный модуль. Для солнечного модуля с мощностью 415 Вт величина  $W_{пан}$  составит 35,029 кВт · ч для Гокдепинского этрапа, 35,3 кВт · ч – для Бахерденского этрапа, 35,875 кВт · ч – для Тедженского этрапа и 35,607 · кВт · ч – для г. Ашгабата соответственно (месяц сентябрь).

Таблица 2

**Среднегодовая суммарная радиация, поступающая  
на наклонную поверхность солнечного модуля**

Велаят в Туркменистане	Город или этрап	Географические координаты, градусы		Среднегодовая суммарная радиация, поступающая на наклонную поверхность солнечного модуля, кВт · ч/м <sup>2</sup>	
		Северная широта	Восточная долгота	Угол наклона $\beta = 36^\circ$	Угол наклона $\beta = 38^\circ$
Ахал	Гокдепе	38,2	58,0	1803,932	1802,125
	Бахерден	38,4	57,4	1789,887	1785,711
	Ашгабат	37,9	58,3	1825,455	1816,144
	Теджен	37,4	60,5	1844,2	1827,226

При среднесуточном потреблении электроэнергии 2655 кВт · ч (Ахалский велаят, Бахерденский этрап, село Кирпили) и 3570 кВт · ч (Ахалский велаят, Гокдепинский этрап, село Бори), необходимая полная мощность ФСС составит около 936 и 1269 кВт соответственно. Для энергоснабжения выбран ФСС с мощностью 900 и 1200 кВт (табл. 3).

Таблица 3

**Основные характеристики ФСС мощностью 900 кВт в селе Кирпили  
и мощностью 1200 кВт в селе Бори**

Показатели	Значение	
	900 кВт	1200 кВт
Мощность ФСС	900 кВт	1200 кВт
Количество основных базовых блоков	3	4
Мощность основного базового блока ФСС	300 кВт	300 кВт
Мощность фотоэлектрического модуля	415 Вт	415 Вт
Количество фотоэлектрических модулей	2160	2880
Количество фотоэлектрических модулей, соединенных последовательно в ряду	10	10
Количество рядов	216	288
Площадь фотоэлектрических модулей	4671 м <sup>2</sup>	6228 м <sup>2</sup>
Количество инверторов	3	4

Сравним выработку электроэнергии ФСС с необходимым для энергоснабжения сельской местности, т. е. для сел Кирпили и Бори. Приход солнечной энергии на оптимально ориентированную площадку с углом наклона  $\beta = 36^\circ$  на широтах расположения ФСС  $E_\beta$  показан в табл. 2. Потери  $\eta_p$  на ФСС составляют до 25 %, а КПД  $\eta_{inv}$  преобразования из постоянного в переменный ток – 98,95 %, принятый КПД  $\eta_m$  солнечного модуля – 19,25 %. В этих условиях удельная выработка ФСС определяется по формуле



$$E_{udel,\beta} = E_{\beta} \eta_{\beta} \eta_{inv} \eta_m. \quad (1)$$

В нашем случае удельная выработка ФСС с учетом наклона  $\beta$  в течение года составляет 254,538 и 256,537 кВт · ч/м<sup>2</sup> год соответственно, а ФСС в течение года будет производить 1188950,32 и 1597712,44 кВт · ч энергии соответственно. Если считать, что каждый дом в сутки потребляет 15 кВт · ч энергии, то годовое потребление энергии сел Кирпили и Бори составит соответственно 969075 и 1303050 кВт · ч.

#### Литература

1. Türkmenistanda 2030-njy ýyly çenli gaýtadan dikeldilýän energetikany ösdürmek boýunça Milli Strategiýa : Türkmenistanyň Prezidentiniň Karary bilen tassyklanan, Aşgabat, 2020ý.
2. PVsyst Contextual Help (Built in Software). – Режим доступа: <https://files.pvsyst.com/help/>. – Дата доступа: 12.04.2019.
3. Джумаев, А. Я. Возможности использования солнечной энергии в регионах Туркменистана / А. Я. Джумаев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 74–80.

### ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫРАЩИВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ДРЕНАЖНЫХ ВОДАХ ДЛЯ БИОЭНЕРГЕТИКИ

М. Оразбердиева<sup>1</sup>, Г. Гурбанова<sup>2</sup>, Т. Мамедова<sup>1</sup>, Р. Оразбердиев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственный центр «Возобновляемые источники энергии»  
Государственного энергетического института Туркменистана, г. Мары

<sup>2</sup>Туркменский государственный педагогический институт имени  
Сейитназара Сейди, г. Туркменабад

<sup>3</sup>Туркменский государственный университет имени Махтумкули,  
г. Ашхабад

*Выращивание микроводорослей представляется как утилизация дренажных вод, сформированных на орошаемых полях и негативно влияющих на окружающую среду, и трансформация возобновляемой энергии с целью получения энергетического сырья. Энергетическое сырье из микроводорослей окажет во многом меньшее воздействие на окружающую среду и обеспечит продовольственную безопасность, чем из масличных культур. Таким образом, создается возможность совмещения технологий очистки от загрязнений дренажных вод с получением водорослевой биомассы для задач биоэнергетики и защиты окружающей среды.*

**Ключевые слова:** микроводоросли, дренажные воды орошаемых земель, загрязняющие вещества, утилизация дренажных вод, жизнеспособность микроводорослей, питательная среда, биомасса.

Туркменистан, обладая богатейшими запасами нефти и газа, тем не менее уделяет огромное внимание поиску новых экологически чистых источников энергии. В стране принята Национальная стратегия развития возобновляемой энергетики до 2030 г., а в целях усиления правовой базы для ее реализации – Закон Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии» (2021 г.). Реализация Национальной стратегии будет способствовать устойчивому экономическому развитию страны [1].

Биоэнергия является одним из экологически чистых видов возобновляемых источников энергии. Для производства биоэнергии в настоящее время в некоторых странах в качестве сырья используются различные масличные культуры. Наиболее широко применяемыми в мире являются рапсовое, кукурузное, пальмовое масла и соевые бобы [2]. Однако в условиях Туркменистана выращивание масличных

культур для энергетических целей, требующее большого количества воды, экономически нецелесообразно.

Сельское хозяйство – это наиболее важный сектор экономики страны. Сельскохозяйственное производство в стране является важнейшим фактором любого аспекта землепользования, водного хозяйства, защиты окружающей среды и национального развития в целом. Поэтому сельское хозяйство сейчас рассматривается не только как вид экономической деятельности, но и как фактор, воздействующий на окружающую среду [3].

В настоящее время небольшая часть минеральных удобрений, вносимых под сельскохозяйственные культуры, выращиваемые на орошаемых землях, вымывается из почвы и попадает в грунтовые воды [4]. При этом основными загрязнителями воды в открытой дренажной сети являются ионы кальция, магния, натрия, гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды. Дренажные воды содержат и основные биогенные элементы – N, P, S, Mg, K, Ca. Количественный и качественный анализ ионного состава этих вод показал, что они могут быть использованы для выращивания микроводорослей. Установлена жизнеспособность микроводорослей в дренажных водах, поэтому их можно рассматривать в качестве источника получения биоэнергии.

Технологии производства возобновляемого энергии из биомассы микроводорослей также находятся на начальной стадии. Продолжается поиск путей для более полной и дешевой практической реализации энергетического потенциала биомассы микроводорослей при производстве биоэнергии.

В настоящее время в Туркменистане формируется около 6 млрд м<sup>3</sup> коллекторно-дренажных вод, а с учетом транзитных КДВ сопредельных государств – 11 млрд м<sup>3</sup>. Объем используемых в настоящее время коллекторно-дренажных вод незначителен, хотя в Туркменистане проведены многочисленные и многолетние исследования и разработаны рекомендации по использованию этих вод для орошения солеустойчивых кормовых культур.

Разработка конкретных мероприятий по использованию коллекторно-дренажных вод для выращивания микроводорослей в энергетических целях и их практическая реализация позволят существенно уменьшить дефицит водных ресурсов, улучшить состояние окружающей среды путем утилизации загрязняющих веществ, имеющих в составе дренажных вод. Обычно дренажные воды по химическому составу хлоридно-сульфатно-натриевые и хлоридно-натриевые. Минерализация дренажных вод Мургабского оазиса изменяется в пределах 2–6 г/л.

Целью научных исследований является очистка и повторное использование сточных вод, неизбежно образующихся в орошаемых землях в стране, для энергетических целей. Для оптимизации питательной среды на основе дренажных вод проведен эксперимент в пяти вариантах. Для определения физико-химических характеристик различных питательных сред использован кондуктометр. Были определены пять параметров, а именно – водородный показатель pH, электропроводность, соленость и окислительно-восстановительный потенциал суспензии микроводорослей. Электропроводность суспензии микроводорослей коррелируется ростом и развитием клетки водорослей. Электропроводность суспензии микроводорослей как биологическая система увеличивается при увеличении числа клеток. Окислительно-восстановительный потенциал суспензии микроводорослей уменьшается, когда синтезируются биологические ценные вещества за счет загрязняющих веществ содержащихся в составе дренажных вод. Результаты измерений показаны в таблице.

## Результаты измерений

Варианты питательной среды	Показатели	Возраст клеток				
		1 неделя	2 неделя	3 неделя	4 неделя	5 неделя
Пресная вода (Контрольная)	pH	8,3	7,3	7,1	7,0	7,1
	mS	0,82	2,94	3,1	3,36	3,5
	TDS	0,98	3,62	3,81	4,13	4,4
	mV	156,1	148,9	132,8	166	85
Грунтовая вода	pH	7,1	7,8	7,8	7,8	7,8
	mS	4,65	5,0	5,19	5,4	5,6
	TDS	5,82	6,2	6,48	6,75	7,0
	mV	108	110	108	95	55
Главный Мургабский коллектор	pH	8,3	8,1	6,5	6,0	6,0
	mS	4,89	5,14	5,25	7,31	7,83
	TDS	6,09	6,41	6,56	9,28	9,98
	mV	145	168,9	179,9	130	75,5

Окончание

Варианты питательной среды	Показатели	Возраст клеток				
		1 неделя	2 неделя	3 неделя	4 неделя	5 неделя
Межхозяйственный дренаж	pH	7,4	7,8	7,7	7,8	7,5
	mS	3,46	4,23	4,38	4,65	4,81
	TDS	4,27	5,24	5,43	5,78	6,0
	mV	114	248,8	181,1	221	104
Внутрихозяйственный дренаж	pH	7,7	7,9	6,9	6,8	6,7
	mS	6,53	6,49	6,59	7,46	8,81
	TDS	8,23	8,19	8,21	9,47	9,95
	mV	126,8	192,4	197,7	197	102

Таким образом, использование коллекторно-дренажных вод для выращивания микроводорослей в условиях Туркменистане является одной из ключевых задач на пути широкомасштабного применения микроводорослей в качестве возобновляемого биоэнергетического ресурса и утилизации загрязняющих веществ. Проведенные лабораторные исследования показали жизнеспособность микроводорослей в дренажных водах образующихся орошаемых земель.

## Литература

1. Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 года. – А., 2020.
2. Анализ развития производства биоэнергетического топлива / Н. Ю. Курнакова [и др.] // Фундам. исслед. – 2016. – № 9–2. – С. 268–272.
3. Овезбердиева, А. Основные принципы интеграции сельского и водного хозяйства в национальные планы по адаптации / А. Овезбердиева // Проблемы освоения пустынь. – 2022. – № 1-2.

4. Ёллыбаев А. Оценка мелиоративного состояния орошаемых земель : науч.- произв. пособие для землевладельцев и дехканов / А. Ёллыбаев, Я. Сейиткулиев, О. Джумадурдыев. – Ашхабад : Ылым, 2019. – 25 с. – Режим доступа: <https://www.tohi.edu.tm/usulygollanma/ru/file/15.pdf>.

## МЕТОДЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ, ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ КОМБИНИРОВАННЫМИ СТАНЦИЯМИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

К. Сарыев

*Научно-производственный центр «Возобновляемые источники энергии»  
Государственного энергетического института Туркменистана, г. Мары*

*Рассмотрены вопросы, связанные с бесперебойным обеспечиванием электроэнергией потребителей, удаленных от центральной электрической станции в климатических условиях Туркменистана. Объяснен способ подключения к электроэнергетической системе и описана актуальность проектирования комбинированных систем для производства электроэнергии. На научной основе изучено подключение комбинированных систем фотоэлектрических солнечных и ветряных электростанций к энергосистеме.*

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, комбинированная станция, подключение к энергосистеме, Туркменистан.

На сегодняшний день во всем мире вопросы по энергосбережению и защите окружающей среды от вредных выбросов (CO<sub>2</sub>) становятся все более актуальными и первоочередными. Это тесно связано с защитой окружающей среды от вредных выбросов и целесообразным использованием природных ресурсов. Для достижения этих целей 13 марта 2021 г. Президентом Туркменистана был принят Закон «О возобновляемых источниках энергии». В данное время разрабатываются нормативно-правовые акты для дальнейшего развития и внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Туркменистане. Также в целях обеспечения стабильного развития экономики, расширения использования возобновляемых и нетрадиционных источников энергии, т. е. альтернативных и вторичных источников энергии, разработки энергосберегающих и инновационных технологий и сбережения и надежности энергоресурсов утверждены «Государственная программа по энергосбережению на 2018–2024 годы», «Концепция развития региона Туркменского озера Алтын-Асыр на 2019–2025 годы». В рамках этой Концепции с целью защиты окружающей среды и внедрения экологически чистой «зеленой» технологии ведутся строительные работы по строительству комбинированной солнечной и ветровой электростанции общей мощностью 10 МВт. Далее в целях диверсификации топливно-энергетических ресурсов Туркменистана для увеличения экспортного потенциала электрической энергии, обеспечения отдаленных населенных регионов страны доступной и экологически чистой энергией, улучшения социальных вопросов населения и развитию промышленности, а также для достижения целей стабильного развития и Парижского соглашения по климату утверждены «Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики Туркменистана до 2030 года» и «Программа развития энергетической дипломатии Туркменистана на 2021–2025 годы» [1].

В настоящее время электроэнергетическая система многих стран мира сталкивается с вопросами, связанными со значительными преобразованиями в энергетической отрасли. Цель преобразований – обеспечить доступ к недорогим, надежным источникам энергии для всех потребителей. При достижении этой цели важным вопросом является обеспечение эффективного подключения традиционных и возоб-

новляемых источников энергии, генерируемых на малых объектах, к сетям крупных электростанций с высокочастотным распространением электромагнитного излучения. Поэтому необходимо обосновать использование возобновляемых источников энергии в естественных геофизических процессах, т. е. речном стоке, динамике атмосферы и солнечной радиации. В то же время метод оценки жизнеспособности соответствующих установок остается более сложной проблемой. В этом случае приходится использовать энергию от естественных геофизических процессов, что приводит к некорректной оценке использования запасов статической энергии.

С улучшением системы энергоснабжения в ряде стран открываются широкие возможности для достижения экономической эффективности в распределении электроэнергии. Исходя из этого, предлагается использовать комбинированные технологии, т. е. солнечные и ветряные электростанции и дизель-генераторы, с учетом возможности локальных запасов энергии [2]. В результате с учетом потенциала местных энергоресурсов является важным вопросом определение приоритетных направлений центральной системы электроснабжения для надежного электроснабжения удаленных потребителей. Для этого надо учитывать то, что технические проблемы в системе передачи и распределения электрической энергии выявляют экономически невыгодную позицию, требующую разработки усовершенствованных схем подключения установок ВИЭ к электроэнергетической системе. Независимо от вида производимой электроэнергии обеспечение потребителей электроэнергией приводит к возникновению различных технических проблем в системе снабжения децентрализованных объектов от электроэнергетической сети. Эти технические проблемы в порядке поставок объясняются тем, что они влекут за собой высокие экономические затраты.

Децентрализованные объекты характеризуются большим разнообразием мощности электроустановок, режимов энергопотребления и требований к качеству электроэнергии [3]. В связи с этим возникают трудности при классифицировании их. К общим группам потребителей для электроснабжения децентрализованных объектов относятся:

– мелкие частные потребители мощностью от 1 до 10 кВт (населенные пункты вдали от децентрализованной системы электроснабжения, метеостанции, оборудование системы связи, сельскохозяйственная аренда, приграничные связи и мелкие скотоводы и т. п.);

– потребители без промышленных предприятий с установленной мощностью от 10 до 100 кВт (самостоятельные здания и малые районы, различные здания сферы быта, предприятия торговли и здравпункты и др.);

– промышленные предприятия с установленной мощностью от 100 до 1000 кВт (магистральные нефтегазовые, химические предприятия);

Одним из специфических признаков потребности в электроэнергии децентрализованных объектов является резкое изменение графика нагрузки электроэнергии в течение суток и года. В связи с этим было определено по сезонам года потребление потребителей, децентрализованных от электроэнергетической сети. При обеспечении потребителей электроэнергией учтены потери при передаче электроэнергии по магистральным линиям электропередач. Для снижения потерь, вызванных различными техническими условиями в проводниках, была исследована возможность совместного использования комбинированных технологий, т. е. фотоэлектрических солнечных и ветроэлектрических станций. В такой ситуации для надежного электроснабжения потребителей необходимы простой, надежный, экономичный и удобный

источник питания, а также возможность эффективного использования мощности установки в широком диапазоне [4].

К числу важнейших направлений развития систем энергоснабжения потребителей, обеспечивающих повышение качества и экономической эффективности электроснабжения за счет снижения потребления природных энергоресурсов, относится применение возобновляемых источников энергии. Для зон децентрализованного электроснабжения чрезвычайный интерес представляют комбинированные установки, включающие в себя ветроагрегаты и фотоэлектрические генерирующие установки.

На практике, как правило, применяются следующие схемы организации автономного электроснабжения: распределительная система постоянного тока и распределительная система переменного тока.

Отличительной особенностью распределительной системы постоянного тока является отсутствие необходимости синхронизации источников электроэнергии между собой, что позволяет при наличии соответствующих коммутационных устройств производить оперативные переключения без остановки, с минимальным влиянием на потребителя. Также это позволяет избежать дополнительных потерь электроэнергии, вырабатываемой ветрогенераторами и фотоэлектрическими модулями, связанных с дополнительным преобразованием в переменный ток.

Распределительная система переменного тока является наиболее распространенным решением для организации автономного электроснабжения в силу возможности подключать к таким сетям электроприемники разного назначения, выпускаемые промышленностью.

Отличительной особенностью в сетях являются требования по соблюдению синхронизма и устойчивости сети. Как правило, в качестве опорной точки, относительно которой синхронизируются электрогенерирующие источники, используется сетевой инвертор.

Для бесперебойного электроснабжения потребителей подключение к электроэнергетической системе комбинированных солнечных и ветровых электростанций имеет ряд преимуществ, дающих экономию топливно-энергетических ресурсов, повышение надежности электроснабжения, повышение гибкости электроснабжения, сохранение термической и динамической стойкости существующих сетей и энергоузлов, а также положительные экологические аспекты [5].

Таким образом, подключение комбинированных станций к электроэнергетической системе обладает вышеуказанными преимуществами и оказывает существенное положительное влияние как на технико-экономический аспект объектов строительства, так и на социальный – в виде положительного экологического состояния региона и страны.

#### Литература

1. Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики Туркменистана до 2030 г. – А. 2020.
2. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении : монография / Б. В. Лукутин [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
3. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко [и др.]. – М. : Колос, 2000. – 536 с.
4. Солнечная энергетика : учеб. пособие для вузов / В. И. Виссарионов [и др.]. ; под ред. В. И. Виссарионова. – М. : МЭИ, 2008. – 276 с.
5. Харченко, В. В. Микросети на основе ВИЭ: концепция, принципы построения, перспективы использования / В. В. Харченко // Энергия: экономика, техника, экология. – 2014. – № 5. – С. 20–27.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЯХ

А. Матьякубов

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Научный руководитель К. А. Сарыев

*Изложены результаты работы по сравнительной характеристике теплопроводности теплоносителя в виде масла различных производителей. Определение теплопроводности теплоносителя имеет важную роль при эксплуатации станции, так как от нее зависит ее эффективность. Дано сравнение теплопроводности теплоносителя (РФ) Термолан А, Термолан N и Therminol VP-3 (Канада). По полученным результатам можно будет выбрать оптимальный вид теплоносителя для концентрированных солнечной станции.*

**Ключевые слова:** концентрация СИ, теплоноситель, масла, термолан, теплопроводность, эффективность.

Сегодня в эпоху глобального роста развития потребления электрической и тепловой энергии «остро» встает вопрос удовлетворения спроса, развития экспортного потенциала страны, защиты окружающей среды, экономии природных ресурсов и уменьшения себестоимости полученной продукции за счет использования местных энергоресурсов.

Для выполнения поставленных задач и в целях достижения устойчивого развития в Туркменистане были утверждены Государственные программы и стратегии, в которых предусматривается использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и вторичных энергоресурсов [1].

По результатам исследований, проведенных IRENA за последние годы, рост развития использования ВИЭ наблюдается в фотоэлектрических солнечных, ветряных и в концентрированных станциях. Но, к сожалению, использование фотоэлектрической солнечной станции имеет ряд сложностей: это низкий КПД фотоэлектрических солнечных панелей (около 16 %) и т. д.

Одним из путей повышения эффективности преобразования солнечной энергии, расширения областей ее применения является использование параболацилиндрических солнечных концентраторов. Отличительная особенность использования концентрированных солнечных станций – это возможность получения одновременно электрической и тепловой энергии, а также возможность аккумулирования тепловой энергии в больших масштабах.

В этих станциях за счет оптической точности в фокусе получают большую температуру, которая с помощью теплоносителя далее направляется в теплообменник, где электрическая и тепловая энергия вырабатываются как в традиционных станциях.

Сегодня в крупных параболацилиндрических солнечных станциях в США в качестве теплоносителя используют технические масла марки Therminol VP-3 (производство Канады), а в Ближневосточных странах – Термолан N и Термолан А (производство РФ) которые при больших температурах сохраняют свои физические свойства. К основным физическим свойствам относят теплоемкость, теплопроводность, теплота испарения, энтальпию и вязкость.

Согласно исследованиям, за последние десять лет рост строительства крупных концентрированных солнечных станций достигнут за счет усовершенствования технологий передачи и сохранения тепловой энергии. Тем не менее высокая стоимость технологий и масел влечет за собой увеличение себе стоимости полученной продукции [2].

Паровой энергетический цикл для производства электричества в параболоцилиндрических солнечных станциях показан на рис. 1.

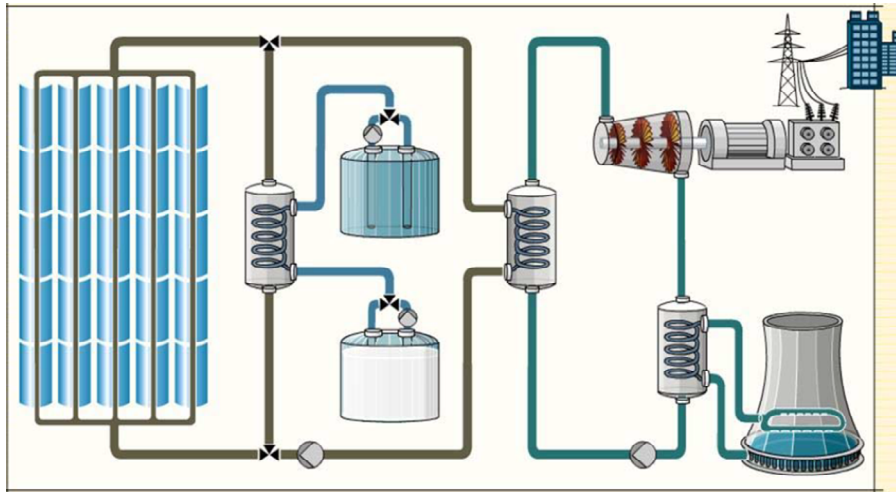


Рис. 1. Паровой энергетический цикл для производства электричества в параболоцилиндрических солнечных станциях

В исследовании технических характеристик теплоносителей особый интерес представляет теплопроводность синтетических высокотемпературных масел, где эффективность станции и ценообразование за полученную продукцию (электрическую и тепловую) напрямую зависит от этого параметра. Чем выше теплопроводность, тем эффективнее и будет работать станция.

Задача о распределении тепла в цилиндрической стенке (в параболоцилиндрических станциях) при известных и постоянных температурах на внутренней и наружной поверхностях также одномерная, если ее рассматривать в цилиндрических координатах. Температура изменяется только вдоль радиуса, а по длине трубе и по ее периметру остается неизменной. В этом случае  $\text{grad}t = dt/dr$ , и закон Фурье будет иметь следующий вид [3]:

$$Q = -\lambda \left( \frac{dt}{dr} \right), \quad (1)$$

или

$$Q = Eq = -2\pi r l \lambda \left( \frac{dt}{dr} \right). \quad (2)$$

Интегрировать удобнее уравнение (2), так как тепловой поток не меняется по толщине стенки, а  $q = Q/F \neq \text{const}$ , поскольку площадь  $F = 2\pi r l$ , через которую проходит тепловой поток, зависит от радиуса.

Разделим переменные:

$$dt = -\frac{q}{2\pi \lambda l} \frac{dr}{r}; \quad (3)$$



$$t = \frac{Q}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r}{r_0} + C. \quad (4)$$

Формула (4) показывает, что распределение температуры по радиусу стенки подчиняется логарифмическому закону. У внутренней поверхности, где кривизна стенки больше, температура меняется резче, чем у наружной.

Интегрирование уравнения (3) в определенных пределах (по  $t$  от  $t_{c1}$  до  $t_{c2}$  и по  $r$  от  $r_1$  до  $r_2$ ) дает зависимость для расчета теплового потока через цилиндрическую стенку:

$$Q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R\lambda}. \quad (5)$$

Целью данной научной работы является определение зависимости теплопроводности различных масел от температуры. Была определена теплопроводность у масел Термолан А, Термолан N и Therminol VP-3. Полученные сравнительные результаты показаны на рис. 2.

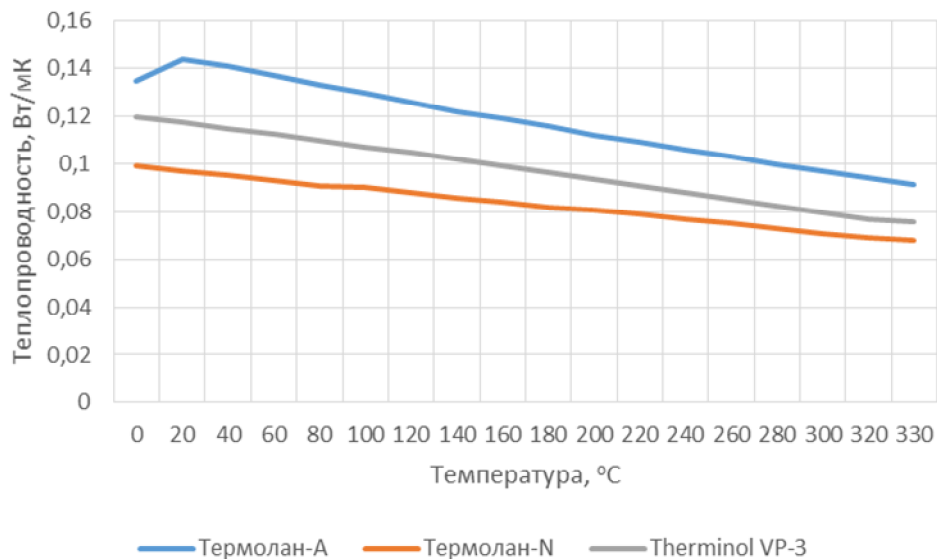


Рис. 2. Сравнительные результаты теплопроводности различных масел

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Определены значения теплопроводности масел Термолан А, Термолан N и Therminol VP-3 при различных температурах.
2. Установлено, что теплопроводность исследуемых масел уменьшается с увеличением температуры.
3. Установлено, что самым оптимальным теплоносителем является Термолан А.

#### Л и т е р а т у р а

1. Государственная программа по энергосбережению на 2018–2024 годы. – А., 2018.

2. Renewable Energy Statistics 2022. – Abu Dhabi : The International Renewable Energy Agency, 2022.
3. Теплотехника : учеб. для вузов / А. П. Басков [и др.] ; под ред. А. П. Баскакова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 264 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ТУРКМЕНИСТАНЕ ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ТЕПЛИЦ

С. Айдогдыев, Н. Непесов

Государственный энергетический институт Туркменистана. г. Мары

Научный руководитель О. Б. Сапарлыева

*Солнечная энергия является одним из источников возобновляемой энергии. Альтернативные возобновляемые источники энергии требуют активного внедрения для применения в качестве вспомогательного источника тепловой энергии, так как способны внести существенный вклад в борьбе за защиту окружающей среды. Теплицы – вид сооружений, предназначенный, в первую очередь, для выращивания рассады овощных культур, саженцев и др.. В настоящее время наиболее целесообразно применять те тепличные помещения, которые являются наименее энергозатратными сооружениями. Проведен анализ возможности использования солнечной энергии в системе теплоснабжения.*

**Ключевые слова:** солнечная энергия, энергозатраты, теплоснабжение, теплицы, Туркменистан.

Использование солнечной энергии для нагрева теплоносителя для удовлетворения потребности в отоплении становится все более популярным. Связано это в том числе со стремительным сокращением природных ресурсов планеты и, как следствие, ростом цен на ископаемое топливо. На сегодняшний день существует множество способов использования солнечной энергии. Также внедряются в жизнь солнечные установки. Одним из таких установок является солнечные коллекторы. Солнечные коллекторы широко используются в отоплении домов, обогреве тепличного хозяйства, зерносушильных установках и многих отраслях сельского хозяйства [1]. Солнечные коллекторы бывают разных видов. Кроме разделения по типу теплоносителя (жидкость и воздух) существует классификация по принципу абсорбции. Отопление теплицы осуществляется с помощью:

- вакуумных колб;
- теплопоглощающих панелей;
- коллекторов воздушного типа.

Хотя все перечисленное оборудование работает на тепловой энергии, извлекаемой из солнечных лучей, принцип работы несколько отличается. При выборе следует учитывать: теплоотдачу, время окупаемости, а также возможные дополнительные функции.

В основе трубчатого водонагревателя лежит абсорбция тепла с помощью вакуумных колб, заполненных газом. Во внутреннем устройстве присутствуют: стеклянные трубки, из которых для уменьшения теплопотерь выкачан воздух; медный полый стержень (теплообменник) для циркуляции теплоносителя; сборный распределитель; отражатель для целенаправленной фокусировки солнечных лучей. Обогрев теплицы при помощи вакуумного солнечного коллектора можно осуществлять даже в зимнее время года при температуре до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . С учетом того, что гелиосистема не будет работать ночью, вакуумные трубчатые коллекторы способны удовлетворить 15–20 % потребностей тепловой энергии [2].

Теплопоглощающие панели внутреннего устройства плоского коллектора отличаются от вакуумных колб. В качестве абсорбера выступает металлическая пластина, окрашенная селективной, теплопоглощающей краской. Внизу проходит медный или алюминиевый теплообменник. Тепло, полученное абсорбером от солнечного излучения, аккумулируется и передается в накопительный бак посредством циркуляции теплоносителя. Отопление теплицы на панельных солнечных водонагревателях оптимально подходит для теплых широт и регионов с умеренным климатом. Получаемой тепловой энергии достаточно для подогрева воды до температуры 20–40 °С. В зимнее время года теплоэффективность гелиопанелей существенно снижается. Работа нагревателей зависит от температуры окружающей среды. При замерзании теплоносителя и в ночное время отопление отключается.

Обеспечение теплицы теплом осуществляется в зависимости от того, какой тип теплоносителя используется. Этот же критерий влияет на эффективность работы гелиосистемы:

- Отопление теплицы солнечными воздушными коллекторами – тепло подается посредством воздуховодов. Нет необходимости в установке дополнительного аккумулирующего или теплосъемного оборудования.

- Солнечное отопление теплицы водяными панельными или вакуумными трубчатými коллекторами осуществляется при помощи бака теплоаккумулятора. Нагретый теплоноситель поступает в буферную емкость, где происходит передача энергии жидкости, циркулирующей в радиаторной системе обогрева. В процессе теплообмена теряется определенное количество энергии.

- Существуют моноблоки, где вода нагревается без необходимости в подключении внешней буферной емкости, но гелиосистемы со встроенным баком не могут работать после понижения температуры ниже –5 °С.

Необходимость первоначальных вложений – панельный коллектор стоит от 15 тыс. руб. Дополнительно нужно купить накопительный бак, установить автоматику, заплатить за монтаж. Зависимость работы от времени суток и сезона – аккумулялирование тепловой энергии солнца в теплицах возможно исключительно днем. Ночью отопление полностью переключается на котел. Теплоэффективность гелиосистемы с наступлением зимы значительно снижается. Минимальные показатели нагрева фиксируют в январе и феврале месяце. Компенсация энергозатрат будет на уровне 10–20 %.

Традиционно солнечная энергия используется естественным способом в любой теплице без инженерно-технических средств.

Площадь поглощающей поверхности гелиоустановок при наличии резервного источника теплоты:

$$A = 1,16 M_r (t_r - t_x) / \eta \sum q_i,$$

где  $M_r$  – расход горячей воды, кг/сутки;  $q_i$  – интенсивность падающей солнечной радиации в плоскости коллектора, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sum q_i$  – то же, в сутках;  $\eta$  – КПД установки солнечного горячего водоснабжения.

Интенсивность падающей солнечной радиации для каждого светового дня:

$$q_i = p_s \cdot I_s + p_d \cdot I_d,$$

где  $p_s$  и  $p_d$  – коэффициенты расположения солнечного коллектора соответственно для прямой и рассеянной радиации:

$$p_d = \cos^2(b/2),$$

где  $b$  – угол наклона коллектора к горизонту;  $I_s$  – интенсивность падающей солнечной радиации, которая приходится на горизонтальную поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;  $I_d$  – интенсивность рассеянной радиации, которая падает на горизонтальную поверхность, Вт/м<sup>2</sup>; значение  $q_i$  для солнечных коллекторов южной ориентации следует принимать в интервале с 8 : 00 до 19 : 00:

$$p_d = \cos^2 \frac{36}{2} = 0,904.$$

Для декабря в г. Мары с 8 : 00 до 19 : 00:

$$I_s = 28 + 86 + 144 + 203 + 258 + 270 + 258 + 227 + 191 + 133 + 75 + 24 = 1897 \text{ Вт/м}^2;$$

$$I_d = 36 + 69 + 116 + 138 + 163 + 174 + 174 + 163 + 138 + 116 + 69 + 36 = 1392 \text{ Вт/м}^2.$$

Тогда в декабре:

$$q_i = 1,35 \cdot 1897 + 0,904 \cdot 1392 = 2773,3 + 1188,768 = 3819,31 \text{ Вт/м}^2.$$

КПД гелиоустановки рассчитывают по следующей формуле:

$$\eta = 0,8 \left( \Theta - \frac{8 \cdot v \cdot (0,5 \cdot ((t_1 + t_2) - \bar{t}_n))}{\sum q_i} \right),$$

где  $v$  – приведенный коэффициент тепло расхода солнечного коллектора, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\Theta$  – приведенная оптическая характеристика коллектора;  $t_1$  и  $t_2$  – температура воды на входе и выходе из коллектора соответственно;  $\bar{t}_n$  – средняя дневная температура наружного воздуха, °С:

$$\eta = 0,8 \left( 0,73 - \frac{8 \cdot 8 \cdot (0,5 \cdot ((10 + 18) - 14))}{3819,31} \right) = 0,49;$$

$$A = \frac{1,16 \cdot 5400 \cdot (18 - 10)}{0,49 \cdot 3819,31} \approx 26 \text{ м}^2.$$

Объем бака аккумулятора:

$$V = (0,06 \div 0,08)A = 0,06 \cdot 26 = 2 \text{ м}^3.$$

Количество теплоты, выработанной гелиоустановкой за месяц  $Q_{\text{мес}}$ , Дж:

$$Q_{\text{мес}} = \eta_{\text{мес}} q_{\text{мес}} A,$$

где  $q_{\text{мес}}$  – месячная сумма падающей солнечной радиации, Дж/м<sup>2</sup>:

$$q_{\text{мес}} = q_{\text{сут}} Z_{\text{дн}},$$

где  $q_{\text{сут}}$  – суточная сумма падающей солнечной радиации, Дж/м<sup>2</sup>. Так как  $q_{\text{сут}} = q_{\text{сут}} q_i = 3819,31$  (Вт/м<sup>2</sup>), то нужно перевести в Дж/м<sup>2</sup>:

$$q_{\text{сут}} = 3819,31 \frac{\text{Вт} \cdot \text{сут}}{\text{м}^2} = 3819,31 \cdot 43200 \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \approx 164 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2};$$

$Z_{\text{дн}}$  – количество дней в месяце;  $q_{\text{мес}} = 164 \cdot 30 = 4920$  МДж/м<sup>2</sup>:

$$Q_{\text{мес}} = 0,49 \cdot 4920 \cdot 26 = 62680,8 \text{ МДж.}$$

Количество условного топлива, сэкономленного благодаря использованию солнечной радиации, условного топлива, т/год:

$$B_{\text{сез}} = \frac{0,0342 \cdot 62680,8}{0,3} = 7 \text{ т/мес.}$$

Как видно из расчетов, применение солнечных коллекторов в теплоснабжении теплиц в климатических условиях Туркменистана является весьма выгодным с экономической точки зрения.

#### Л и т е р а т у р а

1. Байрамов, Р. Микроклимат теплиц на солнечном обогреве / Р. Байрамов, Л. Е. Рыбакова. – А. : Ылым, 1983.
2. Матьякубов, А. Проект солнечной гелиотеплицы с тепловыми трубками позволяющей эффективно использовать тепло почвы / А. Матьякубов. – А. : Ылым, 2021.
3. Солнечный коллектор : пат. 178390 Рос. Федерация / Н. А. Кудрявцев, Ю. Л. Липовка ; заявитель и патентообладатель Сиб. федер. ун-т. – № 2017123646 ; заявл. 04.07.17 ; опубл. 02.04.18, Бюл. № 10.
4. Устройство для обогрева почвы : пат. 2651276 Рос. Федерация / Н. А. Кудрявцев, Ю. Л. Липовка ; заявитель и патентообладатель Сиб. федер. ун-т. – № 2017123644 ; заявл. 04.07.17 ; опубл. 19.04.18, Бюл. № 11.

### **РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ ТУРКМЕНИСТАНА: ВЫБОР СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ**

**А. А. Гельдыев, М. К. Акмырадова, Б. Ч. Овезов**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары.*

*Переход Туркменистана к рыночной экономике сопровождался резким повышением электропотребления. Пораанализировано развитие электроэнергетики Туркменистана. В настоящее время новая Концепция электроэнергетики позволила преодолеть накопившиеся проблемы. Запущенный в 2013 г. механизм привлечения инвестиций в отрасль на основе договоров о предоставлении мощности позволил к 2018 г. ввести в эксплуатацию новые комбинированные электростанции. Акцентировано внимание на необходимости и усилении роли государства в подготовке и выполнении оптимальных стратегических решений по научно-технологическому развитию туркменской электроэнергетики и воссозданию в ней инновационной системы.*

**Ключевые слова:** энергетическая стратегия, инновационная система, новая комбинированная электростанция.

В современном мире электроэнергетика является важнейшей отраслью любой страны и основой развития базовых отраслей промышленности, определяющих прогресс общественного производства. Во всех промышленно развитых странах темпы развития энергетики опережают темпы развития других отраслей. Представить себе жизнь без электрической энергии уже невозможно. Электроэнергетика вторглась во все сферы деятельности человека: в промышленность и сельское хозяйство, науку, космос и в наш быт.

Если потребление энергии в мире увеличивается в 2 раза примерно за 25 лет, то увеличение потребления электроэнергии в 2 раза происходит в среднем за 10 лет. В связи с этим благодаря ускоренной модернизации и диверсификации производства в Туркменистане создаются все условия для мощного рывка стратегических отраслей, в том числе энергетической промышленности.

Потенциал электроэнергетики Туркменистана наращивался постепенно, начиная с 1913 г., когда была сооружена первая в стране Гиндикушская гидроэлектростанция на реке Мургаб с линией электропередачи общей протяженностью 38,7 км. Здесь было установлено три гидротурбины общей мощностью 1,2 МВт. Несмотря на «преклонный возраст» эта гидроэлектростанция остаётся действующей. Основной базой дальнейшего развития электроэнергетики стали тепловые электростанции, работающие в настоящее время преимущественно на природном газе.

В 50–60-е гг. прошлого столетия были введены в эксплуатацию Абаданская государственная электростанция и Туркменбашинская тепловая электроцентраль. В настоящее время на Абаданской электростанции взамен морально и физически устаревших установок построены две газотурбинные установки мощностью по 123 МВт каждая, суммарная мощность электростанции составляет 321 МВт. На Туркменбашинской тепловой электроцентраль сейчас имеются два энергоблока мощностью по 210 МВт каждый. Тепловая электроцентраль является уникальной электростанцией, работающей на морской воде, из которой с помощью двух промышленных испарительных установок получается дистиллированная вода, используемая в паровых котлах.

В 1973 г. введен в эксплуатацию первый энергоблок Марыйской ГЭС – флагмана туркменской энергетики. В дальнейшем ее развитие постоянно наращивалось, и к концу 2014 г. мощность всех энергоблоков составила 1831,7 МВт.

Мощный импульс развития электроэнергетики получила в годы независимости Туркменистана. Первой электростанцией, построенной после 1991 г., стала Сейдинская тепловая электроцентраль. Ее первый энергоблок введен в эксплуатацию в октябре 1992 г. С вводом в 2004 г. второго энергоблока установленная мощность тепловой электроцентраль составляет 160 МВт.

Благодаря политике Лидера нации Гурбангулы Бердымухамедова, направленной на развитие отрасли, последние десять лет характеризуется максимальной интенсификацией электроэнергетической отрасли Туркменистана: было введено в эксплуатацию 3251,2 МВт новых мощностей, 75 % из которых – в период 2006–2016 гг. Только за 2006–2010 гг. построены Ашхабадская, Дашогузская, Ахалская и Авазинская ГЭС мощностью 254,2 МВт каждая. Газовые турбины Ахалской и Авазинской электростанций могут работать как на газе, так и на дизельном топливе. Помимо этого в 2010 г. были также введены в эксплуатацию две новые газотурбинные установки на Балканабатской ГЭС, повысившие ее мощность до 380,2 МВт. Ввод в эксплуатацию перечисленных электростанций позволил значительно повысить надеж-

ность электроснабжения потребителей Ашхабада, Ахалского, Дашогузского велаятов, Национальной туристической зоны «Аваза», а также нефтегазового и химического комплексов Балкана.

Первый этап Концепции успешно завершён в 2016 г. Реализация первого этапа позволила практически вдвое увеличить производство электроэнергии по сравнению с 2005 г. Осуществлено строительство газотурбинных электростанций в Ахалском, Лебапском и Марыйском велаятах, проведена реконструкция электростанций в городах Сейди, Балканабат и Абадан, а также сооружений высоковольтных линий электропередачи. С вводом в конце 2013 г. трех малых газовых турбин и в 2014 г. – двух газовых турбин мощность Ахалской ГЭС составила 648,1 МВт. На сегодняшний день это самая крупная газотурбинная электростанция страны.

По итогам 2016 г. электроэнергетическая отрасль Туркменистана демонстрирует высокие показатели. Произведено более 24 млрд. кВт · ч электроэнергии, что на 5 % выше уровня 2015 г., объем произведенной по линии Министерства энергетики продукции, выполненных работ и оказанных услуг вырос на 11,6 %, а экспорт электроэнергии – на 16,7 % в натуральном и на 17,7 % – в стоимостном выражении. Таким образом, несмотря на продолжающийся мировой экономический кризис, экспорт Туркменистаном электроэнергии не только не падает, но и, наоборот, растет. В первом квартале 2017 г. отрасль продолжила динамично развиваться: прирост производства электроэнергии составляет около 6,2 %, возросли и объемы ее экспорта.

На втором этапе в реализации Концепции – в 2017–2020 гг. было построено еще 6 электростанций, осуществлен переход на газотурбинных станциях к комбинированному циклу. Для увеличения пропускной способности электросетей было продолжено строительство высоковольтных воздушных линий и подстанций, что позволило уменьшить потери электроэнергии при ее передаче. К 2022 г. производство электроэнергии составило более 26 млрд кВт, ее экспорт – почти 6,1 млрд кВт, а инвестиции в развитие электро энергетической отрасли превысили 5 млрд долл. США.

В соответствии с Концепцией развития электроэнергетической отрасли Туркменистана на 2013–2020 гг. было построено 14 газотурбинных электростанций с суммарной установленной мощностью 3854 МВт. Сегодня отечественная электроэнергетика демонстрирует стабильно высокие темпы развития и наращивания экспорта электроэнергии, востребованной на мировых рынках. Открытие 8 сентября 2018 г. первой в стране комбинированной парогазовой электростанции мощностью 1574 МВт в Марыйском велаяте дало мощный импульс в развитии электроэнергетики Туркменистана.

Новая электростанция комбинированного цикла относится к инженерно-техническим разработкам нового поколения и является одной из лучших в регионе. В отличие от других электростанций, построенных ранее в нашей стране, в качестве топлива для выработки электричества здесь используется не только природный газ, но и пар. Представляя собой четыре газовые турбины 9 FA, четыре котла-утилизатора, предназначенные для производства пара и две паровых турбины, новая комбинированная электростанция производит 12,6 млрд кВт · ч электроэнергии в год.

В перспективе планируется объединение энергоузлов Туркменистана через высоковольтные воздушные линии электропередачи (ЛЭП) в единое целое, что позволит взаимно резервировать электроэнергию туркменской энергосистемы. Кроме того, в целях увеличения экспорта электроэнергии планируется строительство высоковольтных ЛЭП Мары-Сарахс-Мешхед (Иран) и Балканабат-Гонбад (Иран). Есть также планы сооружения ЛЭП в районе магистрального газопровода ТАПИ.

Ввод данных линий даст возможность нарастить экспорт электроэнергии в Иран, а также осуществлять ее транзит через Иранскую энергосистему в Турцию и страны Кавказа. В перспективе планируются также поставки в Таджикистан и Пакистан и расширение экспорта в Афганистан.

Сегодня Туркменистан встал на путь декарбонизации, т. е. перехода к низкоуглеродной экономике, что предполагает апробацию и внедрение в национальную энергетическую систему элементов возобновляемых источников энергии. Очередным шагом на этом пути стало принятие Национальной стратегии по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 г., которая была утверждена Постановлением Президента Туркменистана в декабре 2020 г. Цель Национальной стратегии – развитие и эффективное использование возобновляемых источников энергии, что обусловит сокращение количества выбросов парниковых газов в окружающую среду.

Созданный в Государственном энергетическом институте Туркменистана Научно-производственный центр по возобновляемым источникам энергии позволяет профессорско-преподавательскому составу проводить изыскания по таким научным аспектам, как технология фотоэлектрических преобразователей, концентрация солнечной энергии и гелиотехника, биоэнергетика и разработка технологий производства биомассы, технология аккумулирования электрической и тепловой энергии. Также в отрасли разрабатываются конкретные проекты по обеспечению населенных пунктов, находящихся вдали от центральной системы энергоснабжения, электрической энергией за счет солнечных фотоэлектрических станций.

Резюмируя вышеуказанное, можно констатировать, что новая комбинированная электростанция служит очередным свидетельством того, что в нашей стране повсеместно внедряются экологически чистые производства, базирующиеся на последних достижениях науки и техники, что является приоритетом природоохранной политики уважаемого Президента.

Крупномасштабная модернизация энергетических объектов существенно улучшила надежность энергосистемы, полностью обеспечила внутренний рынок и увеличила объемы экспортных поставок, повысила эффективность промышленного производства и в целом обеспечивает динамичное социально-экономическое развитие Туркменистана.

#### Литература

1. Бердымухамедов, Г. Туркменистан на пути достижения Целей устойчивого развития / Г. Бердымухамедов. – А. : ТГИС, 2018.
2. Концепция развития электроэнергетической отрасли Туркменистана на 2013–2020 годы. – А. : ТГИС, 2013.

### **ГАРМОНИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

**О. Абдыкадырова, П. Оразмаммедов**

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

*Исследован способ снижения гармонических искажений выходного напряжения инверторов, используемых на солнечных электростанциях. Отмечено, что добавление инверторов и повышающих трансформаторов используемых в энергетической системе солнечных панелей, позволит улучшить стабильность напряжения, совершенствует качество производства электрической энергии.*



**Ключевые слова:** угловая стабильность, фотоэлектрические PV, сетка, качество электроэнергии, крупная электростанция, напряжение, стабильность частоты.

На протяжении многих лет учеными разрабатываются научные работы, научные проекты, различные виды энергетических объектов по использованию солнечной энергии в качестве энергосберегающего источника, и эта работа ведется быстрыми темпами. Солнечная энергия – это не только экологически чистый источник энергии, она может быть преобразована в другие формы энергии с большими экономическими выгодами. Проект, позволяющий преобразовывать солнечную энергию в электрическую, которая будет обогревать и охлаждать помещения, является наиболее эффективным и надежным энергосберегающим научным проектом.

В стране также широко реализуются научные инициативы и проекты по использованию нетрадиционных источников энергии, таких, как энергия солнца и ветра, в качестве энергосберегающего источника. Дальнейшее их совершенствование, создание новых проектов, использование в научных проектах достижений современной мировой науки в недрение новых – одна из задач сегодняшнего дня.

Повышение эффективности и снижение стоимости солнечных панелей привели к созданию множества солнечных электростанций большой мощности по всему миру. Солнечные панели собирают энергию, преобразовывая ее в электрическую энергию.

Электричество, производимое солнечными панелями, является постоянным по своей природе, и мощные инверторы используются для преобразования его в переменный электрический ток в соответствии с потребностями потребителей.

Инверторы подключены параллельно солнечным панелям, каждый инвертор перерабатывает определенную часть электрической энергии, вырабатываемой солнечными панелями. Простейший инвертор выдает на выходе прямоугольную волну. Этот инвертор можно использовать для питания простых устройств, но он не подходит для более сложных бытовых устройств, так как вызывает значительные гармонические искажения. Одним из параметров, показывающих эффективность инвертора, является количество его потерь энергии. Он определяется как отношение полезной выходной мощности к входной мощности.

Как мы видим, у инвертора много преимуществ, но есть и недостатки. Основной принцип заключается в том, что простой инвертор, благодаря своим конструктивным особенностям, будет высвобождать энергию, запасенную в аккумуляторе, даже если она не нужна потребителю. Это снижает общую эффективность солнечной установки. Чтобы солнечная установка работала правильно, выходное напряжение и частота инвертора должны быть постоянно стабильными. Одна из основных проблем заключается в том, что устройство может выдерживать высокие токи.

Основным недостатком солнечных панелей по сравнению с синхронным генератором является скорое воздействие на электрическую систему, поэтому они могут вызывать изменения величины напряжения в цепи. Изменение напряжения приводит к гармонизации, асимметрии и короткому замыканию.

Кроме того, синхронные генераторы устойчивы к системным сбоям. Однако солнечная энергия по-прежнему подключена к сети и представляет собой проблему, при неисправности электрической сети требуется подача реактивной мощности. Осуществляется это с помощью системы контроля FRT, включенной с систему управления.

В соответствии с требованиями системы управления и контроля для изменения напряжения в 1 % в общей точке соединения необходимо использовать 2 % реактивной мощности тока. При неисправности уменьшается рабочая сила солнечной энергии, что приводит к подаче в сеть реактивной мощности тока.

В данной статье исследователи пришли к выводу, что наиболее эффективным способом является работа многих инверторов и трансформаторов, соединенных параллельно для интеграции солнечной энергии в систему высокого напряжения.

Полная мощность для него  $S_n = 1,8 \text{ МВА}$ , взята из паспортных данных существующего трансформатора.

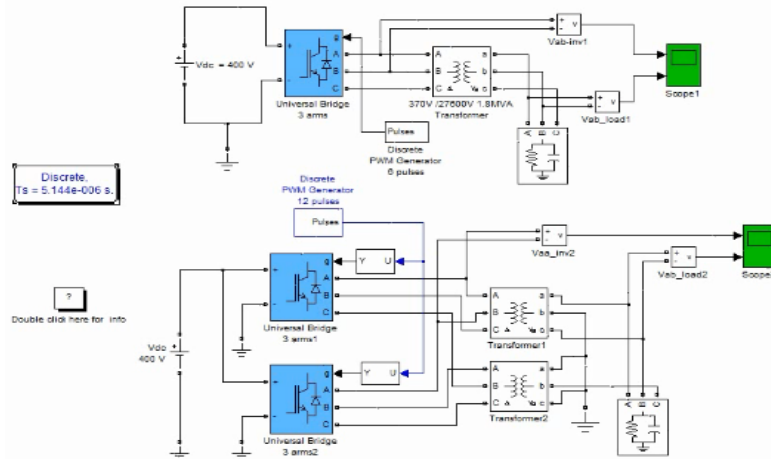


Рис. 1. Модель электрической цепи для экспериментального исследования влияния параллельно соединенных инверторов на гармоники тока

Для исследования влияния на модель одного и двух параллельно включенных инверторов и трансформаторов были измерены величины напряжений, и их график показан в окне анализа на рис. 2.

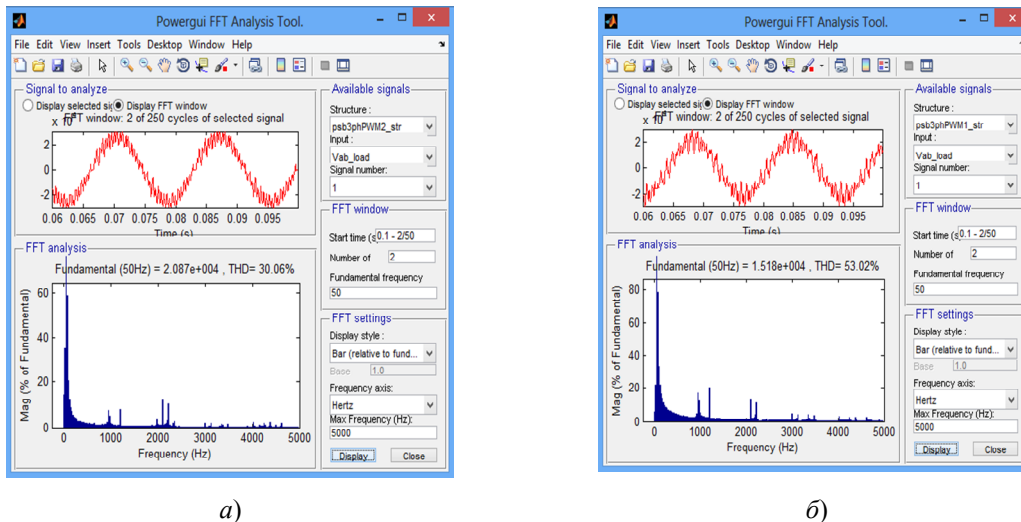


Рис. 2. Окно анализа, показывающее влияние одного (а) и двух параллельно соединенных инверторов (б) на гармоники тока

Как показано на рис. 2, значение гармоника тока  $THD = 53,02 \%$  (общие гармонические искажения) (рис. 2, а) в системе с двумя параллельно подключенными инверторами имеет  $THD = 30,06 \%$  (рис. 2, б).

Подключение к энергетической системе солнечных панелей с помощью инвертеров и повышающих трансформаторов позволяет повысить качество электрической энергии, стабилизировать напряжение.

#### Литература

1. Касун Самарасекера. Возможность преодоления сбоя интегрированных в сеть солнечных электростанций / Касун Самарасекера. – 2015.
2. Треш, А. М. Моделирование солнечных батарей в среде Matlab/Simulink / А. М. Треш. – Минск, 2013.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Э. Агаджанов

*Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Научный руководители: К. Сарыев, Дж. Батманов

*Изложены виды систем теплоснабжения для оценки эффективности их применения для отдельных крупных потребителей. Также дана методика проведения неразрушающего метода проведения диагностики тепловых потерь в стыковых соединениях котла с использованием тепловизионной камеры.*

**Ключевые слова:** теплофикация, энергосбережение, централизованное теплоснабжение, тепловые потери, термограмма.

Одним из трендов мирового развития, появление которого обусловлено «новой» экономикой, является рост качества жизни населения планеты – как стратегический ориентир, отражающий национальные интересы большинства стран. В современных условиях при росте стоимости энергоресурсов, отрицательном воздействии энергетических технологий на окружающую среду проблема энергоэффективности приобретает критически важное значение. Энергоэффективность – важнейший ресурс для ускорения экономического роста развивающихся стран.

В настоящее время во всем мире наблюдается повышенный интерес к использованию в различных отраслях экономики возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Это связано с происходящими изменениями в энергетической политике, где определяющее значение приобретает переход на энергосберегающие и ресурсосберегающие технологии.

**Материалы и методы.** На практике большая роль отводится задачам обучения и информирования потребителей, а также сотрудников организаций по вопросам энергосбережения и энергоэффективности. Задачи обучения и информирования включает в себя следующие мероприятия [1]:

– проведение научно-технических семинаров для главных инженеров и специалистов;

– актуализация энергетической политики с учетом мировых тенденций, ознакомление персонала с энергетической политикой, размещение информации на информационных стендах, плакатах;

– внедрение Памятки по энергосбережению для сотрудников организаций, программа пропаганды энергосбережения;

– использование средств массовой информации для пропаганды энергосбережения и повышения энергетической эффективности (например, публикации о достижениях предприятий в области энергосбережения);

- включение в обязательный курс повышения квалификации руководителей, специалистов и кадрового резерва семинара «Управление энергоэффективностью»;
- развитие агитационной составляющей: издаются брошюры с краткой информацией об энергоэффективности;
- участие сотрудников организаций на выставках, семинарах, конференциях по вопросам энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Все процессы добычи и переработки топлива (топливные отрасли промышленности), производства, транспортировки и распределения тепловой и электрической энергии охватывает один из важнейших межотраслевых комплексов – топливно-энергетический комплекс.

В течение длительного периода тепло и электроснабжение Туркменистана развивается по пути концентрации тепловых нагрузок, централизации теплоснабжения и комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Широкое развитие получила теплофикация, являющаяся наиболее рациональным методом использования топливных ресурсов для тепло и электроснабжения.

Важной характеристикой теплофикации является централизация, т. е. производство теплоты на теплоэлектроцентралях, обслуживающих десятки и сотни тысяч жителей.

Для реализации теплофикации необходимо иметь тепловой источник на станции, разветвленную тепловую сеть в виде теплоизолированных теплопроводов, обеспечивающих доставку теплоносителя потребителям. Также нужны тепловые пункты, готовящие для потребителей с помощью сетевой воды (пара) теплоноситель необходимых параметров, и собственно – оборудование потребителей, использующее горячую воду (пар) в системах отопления, горячего водоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха и в технологических установках.

Функцию централизованного теплоснабжения выполняют и районные крупные котельные. В отличие от мелких котельных они более экономичны и экологически рентабельны. Кроме того, в них могут сжигаться не только высокосортные, но и низкосортные топлива (мазут, торф и уголь). Возможно также комбинированное производство теплоты: нагрев сетевой воды на ТЭЦ с дальнейшим ее подогревом в котельной, которая в этом случае называется пиковой.

Процесс получения теплоты на ТЭЦ происходит в основном в паротурбинных циклах. Суть его состоит в следующем: в энергетических котлах создается перегретый пар, производящий электроэнергию с помощью паровой турбины. Некоторое количество пара, частично отработавшего в турбине, забирается из теплофикационных регулируемых отборов турбины с давлением 0,05–0,25 МПа и направляется либо непосредственно к потребителю, либо в сетевые подогреватели, в которых за счет теплоты конденсации пара происходит подогрев сетевой воды до температуры 110 °С. После догрева сетевой воды при необходимости до 150 °С в пиковых водогрейных котлах она направляется в тепловую сеть [2].

Для оценки тепловых потерь в самой системе в целом, начиная с котлов, необходимо использовать неразрушающий метод контроля и измерения. К таким методам относится, например, применение тепловизоров.



Рис. 1. Термограмма котла

Как видно из термограммы на рис. 1, тепловые потери возникают в стыковых соединениях, где температура достигла до 280 °С. Этот нагрев соединительных участков влечет за собой получение травмы при осмотре обслуживающего персонала и дополнительные потери, которые, в свою очередь, приводят к снижению эффективности котла.

Поэтому необходимо срочно принять меры по использованию современных теплоизоляционных материалов, которые выдерживают такую высокую температуру.

Таким образом, современная телевизионная техника позволяет экономить время, необходимое на выявление мест расположения, участков системы теплоснабжения с повышенными тепловыми потерями и существенно упростить решение следующих задач:

- оценить качество монтажа и проектирования новых котлов и самой системы теплоснабжения;
- определить целесообразность, объемы и сроки профилактического или капитального ремонтов тепловых оборудования путем оценки степени дефектности и состояния отдельных его элементов;
- осуществлять контроль за уровнем тепловых потерь через отдельные элементы систем теплоснабжения.

#### Литература

1. Цанев, С. В. Газотурбинные и парогазовые установки / С. В. Цанев, Д. В. Буров, А. Н. Ремезов. – М. : МЭИ, 2002. – 584 с.
2. Трухний, А. Д. Расчет тепловых схем трехконтурных утилизационных парогазовых установок: учебное пособие / А. Д. Трухний, Н. С. Паршина, Т. С. Лукьянова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. энергет. ин-т. – М. : МЭИ, 2010. – 47 с.
3. Saparlyýewa, O.. Gazturbina desgalaryndan çykýan ýanma önüminiň ýylylygyny ulanmak mümkinçiligi. Energetikada innowasion tehnologiýalar: ylym, bilim we önümçilik / O. Saparlyýewa // Ylmy, ylmy –usuly makalalar ýygyndysy. – 2020. – Sah. 217–221.

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ С ПАРАБОЛИЧЕСКИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ

**Я. Чарыев**

*Туркменский государственный институт  
физической культуры и спорта, г. Ашхабад*

**К. Ходжанепесов**

*Институт телекоммуникаций и информатики  
Туркменистана, г. Ашхабад*

*Представлены результаты исследований авторов по изучению солнечных тепловых фотоэлектрических модулей с параболическими концентраторами в климатических условиях Туркменистана. Приведены результаты расчетов по получению электрической и тепловой энергии.*

**Ключевые слова:** тепловая энергия, электрическая энергия, фотоэлектрический модуль, параболический концентратор.

Возобновляемая энергетика сегодня показывает стремительный рост в развитии во всех странах, так как вопросы снижения негативного воздействия на окружающую среду, а также поиск альтернатив углеводородному топливу при производстве электрической энергии являются актуальными. Однако существует ряд сдерживающих развитие факторов. К таким факторам относятся эффективность, стоимость, отсутствие технологий, рационального питания электроустановок потребителей.

Солнечная энергетика – одно из направлений альтернативной энергетики, изучающее непосредственное использование солнечного излучения для получения других видов энергии. Солнечная энергетика является самым распространенным видом возобновляемой энергетики с минимальным воздействием на окружающую среду во время активной фазы ее использования.

По этим причинам необходимо глубоко изучить электротехнические комплексы с фотоэлектрическими системами, их эффективность и технические элементы, из которых они состоят, а также специфические экологические факторы каждого географического региона, которые напрямую влияют на эффективность этих систем.

Солнечный элемент – основной строительный блок фотоэлектрической системы. Отдельная ячейка обычно довольно мала и вырабатывает мощность около 1 или 2 Вт. Для увеличения выходной мощности солнечных ячеек, они должны быть соединены вместе, чтобы сформировать более крупные секции, называемые модулями. Модули, в свою очередь, могут быть соединены в более крупные единицы, называемые массивами, которые могут быть связаны между собой для увеличения мощности. При последовательном соединении ячеек или модулей выходное напряжение может быть увеличено. С другой стороны, для достижения большего значения выходного тока, ячейки или модули необходимо подключить параллельно, как показано на рис. 1, в.

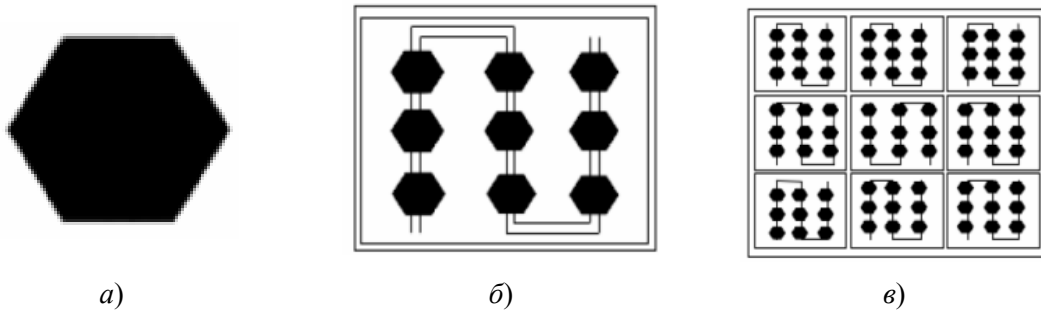


Рис. 1. Схема соединения ячеек фотоэлектрической панели

Математическая модель фотоэлектрического элемента представлена на рис. 2.

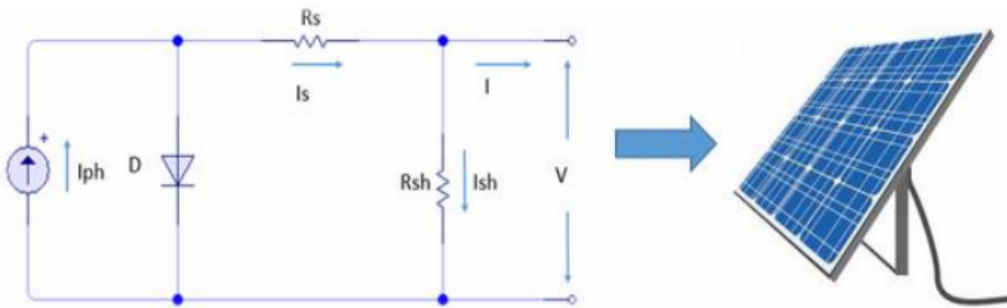


Рис. 2. Эквивалентная схема солнечной батареи:  $R_{sh}$  – шунтирующее сопротивление;  $R_s$  – последовательное сопротивление;  $D$  – диод

Энергию вырабатываемой модульной фотоэлектрической установки с площадью концентратора  $1 \text{ м}^2$  за год определим следующим образом:

$$W_{\text{эл}} = 365(W_{\text{день}} \eta_{\text{эл}} - P_{\text{соб}}), \text{ кВт} \cdot \text{ч/год};$$

$$W_{\text{теп}} = 365 \cdot W_{\text{год}} \eta_{\text{теп}},$$

где  $W_{\text{эл}}$  и  $W_{\text{теп}}$  – выработка электрической и тепловой энергии;  $W_{\text{день}}$  – количество прямой солнечной радиации;  $\eta_{\text{эл}}$  и  $\eta_{\text{теп}}$  – КПД полученной электрической и тепловой энергии;  $P_{\text{соб}}$  – собственное потребление мощности солнцеследящей системы.

Следовательно:

$$W_{\text{эл}} = 365 \cdot (4010 \cdot 0,123 - 15) = 174554 \text{ Вт} \cdot \text{ч/год} = 175 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год} \text{ электрической энергии};$$

$$W_{\text{теп}} = 365 \cdot 4010 \cdot 0,5 = 731825 \text{ Вт} \cdot \text{ч/год} = 732 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год} \text{ тепловой энергии}.$$

Тепловая энергия, обеспечиваемая тепловым фотоэлектрическим модулем с площадью концентратора  $0,8 \text{ м}^2$ , составляет:

$$W_{\text{теп}} = 586 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Электрическая энергия из теплового фотоэлектрического модуля площадью концентратора  $0,28 \text{ м}^2$ :

$$W_{\text{эл}} = 49 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

В сельской местности Туркменистана расход электроэнергии на бытовые нагрузки на семью составляет  $708 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$ . Для обеспечения необходимым количеством электрической энергии определяем количество модулей:

$$n = W_{\text{теп}} / W_{\text{эл}} k,$$

где  $k$  – коэффициент сохранения мощности.

Если подставить значения, то  $n = 708/49 \cdot 1,2 = 17$ , следовательно, для теплового фотоэлектрического устройства необходимо 17 модулей.

Электрической энергии, производимой двумя тепловыми фотоэлектрическими установками, состоящими из 56 модулей, достаточно для питания 3 домов в сельской местности. Они расположены в рамке с однопроводной двухкоординатной следящей структурой ЭД – 2000 дуал. Также пользователи получают  $32816 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$  тепловой энергии.

Таким образом, использование солнечных тепловых фотоэлектрических модулей с параболическими концентраторами в климатических условиях Туркменистана позволяет определить главные параметры установки для использования в практически во всех сферах быта. Также стало ясным, что применение такой гибридной установки позволяет одновременно получить электрическую и тепловую энергию, которая, в свою очередь, увеличивает его технические характеристики и уменьшает себестоимость полученной продукции.

#### Литература

1. Стребков, Д. С. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане / Д. С. Стребков [и др.] – М., 2012. – 496 с.
2. Практические рекомендации по определению удельных показателей энергозатрат и потребностей в топливно-энергетических ресурсах в социально-инженерной сфере села. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2008. – 96 с.
3. Суюнчалиев, Р. С. Перспективы применения возобновляемых источников энергии в пастбищном животноводстве / Р. С. Суюнчалиев, В. А. Гурьянов, М. С. Тургенбаев // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : тр. 6-й Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 2008. – М., 2008. – Ч. 4 : Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – С. 76–80.
4. Vorobiev, Y. Experimental and Theoretical Evaluation of the Solar Energy Collection by Tracking and Non-Tracking Photovoltaic Panel / Y. Vorobiev, P. Horley, J. Gonzalez-Hernandez // ISES 2005 Solar World Congress, Orlando, Florida, August, 6–12, 2005.
5. Тверьянович, Э. В. Фотоэлектрические модули с концентраторами / Э. В. Тверьянович, Е. А. Красина, А. В. Романкевич // Гелиотехника. – 1990. – № 2. – С. 69–73.
6. Хайнрих, Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения : пер. с нем. / Г. Хайнрих, Х. Найорк, В. Нестлер. – М. : Стройиздат, 1985. – 352 с.



## RESEARCH ON MULTI-TIME SCALE MODELING OF ELECTRO-THERMAL COUPLING IES

Shi Xizhi

*Inner Mongolia University of Science and Technology*

Supervisor Yang Peihong

*Multi-energy complementary and coordinative operation can effectively improve the comprehensive utilization of energy, which can not only promote the consumption of renewable energy, but also effectively reduce energy costs and improve the reliability of energy use. The electric-thermal coupling multi-energy system is an important form of multi-energy complementary coordination, which is prevalent and continues to develop in the northern region of China. Therefore, the study of multi-time-scale modeling of electrothermal coupled energy network is of great significance to improve the anti-jamming ability of the whole system and strengthen the interaction between systems.*

**Keywords:** multi-time scale.

### 1. Structure analysis and model of electro-thermal coupling system

A. System structure. The power system, coupling element, and heating system make up the three main structural components of an electro-thermal coupling multi-energy flow system, as depicted in Fig. 1.

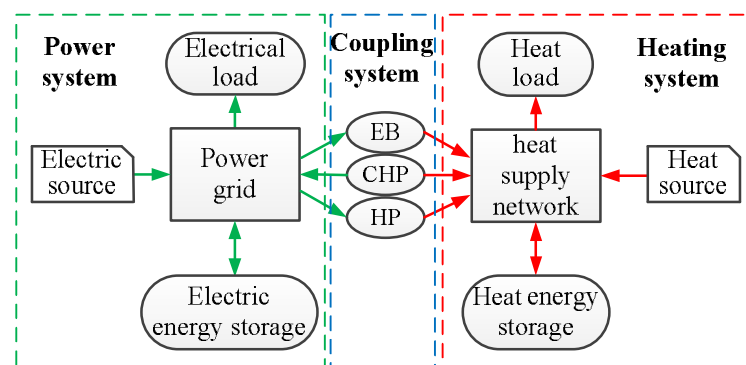


Fig. 1. Structure diagram of electro-thermal coupling multi-energy flow system

The electro-thermal coupling multi-energy flow system, which serves as the foundation for the electro-thermal synergy, is made up primarily of the coupling element in the coupling system, as can be seen from Fig. 1. China's power system is moving in the direction of developing a new power system with renewable energy as its main component and promoting the development of green and low-carbon energy [1].

*B. Heating System Model.* Heat load, heat network, and heat source make up the majority of the heating system. Through the heat network, the heat source transfers heat to the heat load, and the heat network distributes that heat according to the flow of the medium.

*C. Electro-thermal Coupling System Model.* Electrothermal coupling components mainly include CHP, electric boiler, solar heat pump and circulating pump of heat network system.

*D. Multi-time Scale Comprehensive Model.* In the electro-thermal system, there is multi-energy coupling and interaction, but the process of its leading effect varies depending on the time period. As a result, the electro-thermal coupled multi-energy flow system's multi-time scale characteristics can be described in stages.

## 2. Case study

In normal operation, the power supply fluctuation of the power supply system is taken as the disturbance to analyze the impact on the heating system. The G1 synchronous generator set is replaced with a wind-wind complementary power generation system, in which wind power generation 2.5 MW and photovoltaic power generation 2.5 MW are shown in Fig. 2.

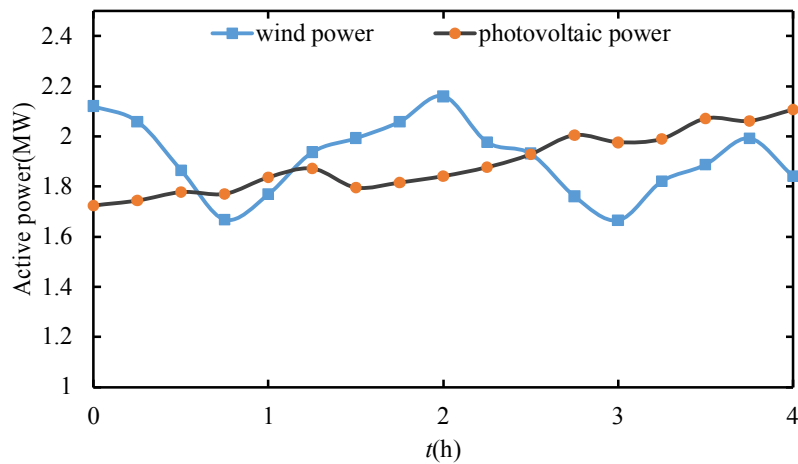


Fig. 2. The active power of wind farm and photovoltaic plant

Fig. 2 shows that while photovoltaic output data fluctuates steadily, wind power output fluctuates significantly. The electric load is maintained constant throughout the subsequent calculation process, which adopts a 5 minute calculation step. The parameters of the heating system and the power system have changed, as shown in Fig. 3 and 4, respectively.

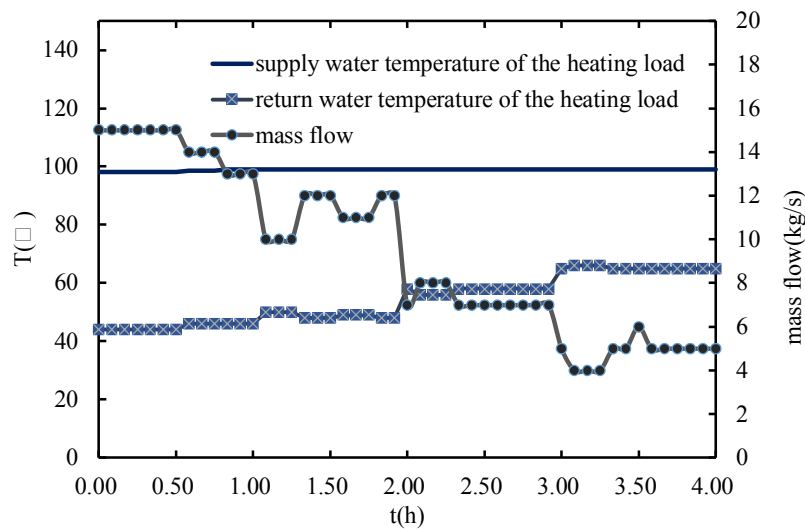


Fig. 3. Changes of heating system parameters

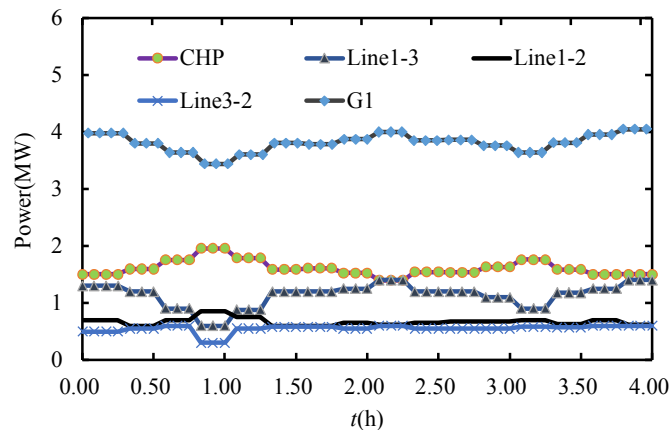


Fig. 4. Power distribution of power system

As can be seen from Fig. 3 and 4, the power balance of the power system is realized and the operation reliability of the power system is improved.

This paper examines the coupling modeling of an electrothermally coupled multi-energy flow system in accordance with the system's multi-time-scale properties. In order to increase the applicability of the model calculation and take into account the thermal dynamic process of the heating network of the heating system, a multi-time-scale dynamic model of the heating system is established. Calculations using a mathematical example show that electrothermal coupling can improve the system's anti-interference capability up to a point.

#### References

1. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet. [J] / W. L. Wang [et al.] // Proceedings of the CSEE. – 2016. – N 36 (12). – P. 3292–3305.

### NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF METHANE-AIR NON-PREMIXED STRONGLY SWIRLING COMBUSTION IN A NOVEL ASYMMETRIC SEMI-CONFINED COMBUSTOR

H. W. Du, D. B. Zhao, X. H. Shi, J. T. Feng, Y. F. Ji, T. T. Li,  
F. Y. Zhang, X. S. Duan

*Department of Energy and Environment,  
Inner Mongolia University of Science and Technology, China*

Supervisor K. Li

*In this paper, a novel asymmetric non-premixed combustor with well-defined geometric boundary is provided to enhance air/fuel mixing and improve flame stability. A comprehensive numerical model, which coupled with large-eddy simulation using a modified Sub-grid scales kinetic energy model and second-order moment combustion model using a simplified four steps chemical reaction mechanism, for non-premixed combustion in a semi-confined space is established. The results show that four isolated vortices characterized by the features of strongly rotating and tangential shear stress are formed in the corner region of combustor. With the increases of inlet gas velocity, the flame blow off do not happen and the average temperature in the combustor remain mostly uniform low and well distributed. Combustion intensity, vortex structures*

*forming and shedding which involves turbulent mixing, chemical reaction and flame propagation is affected by the strongly swirling flow field structure.*

**Keywords:** numerical simulation, experimental investigation, vortex flow, non-premixed combustion, rapid mixing.

In this paper, based on the well-characterized swirl burners or chambers (Khaleghi [et al.], 2015, Dyke, 1984; Gabler [et al.], 1998; Vijayan [et al.], 2010), we designed a novel vortex combustor where methane and air are injected in the transverse and alternative directions at a certain inlet velocity respectively. Combustion products are exhausted in the vertical direction. Vortex flow as a means to stabilize non-premixed gaseous flames in the combustor are investigated. A lab-scale combustor with chamber radius as small as 30 mm is fabricated in Inner Mongolia University of Science and Technology (IMUST). The system is based on the concept of asymmetric whirl combustion, which has illustrated unusual stability characteristics for macro-scale combustor at very well conditions. The large eddy simulation method based on a improved SGS kinetic energy model is used to evaluate the characteristics of combustion. Detailed computational study of the three-dimensional (3D) reacting flow fields as well as experimental analysis was performed to investigate the combustion characteristics. Results further verify the favorable temperature distribution and flow pattern of the asymmetric whirl combustion concept.

The experimental platform for the novel combustor is schematically shown in Fig. 1. The whole system is exposed to the standard ambient air with temperature 300 K and pressure 1.0 bar. It is consisting of a thermometer, PLIF, PC, combustor and two precision flowmeter. Air is delivered at 5 bars from a compressor, equipped with a pressure gauge and regulator. Fuel (methane) is supplied at 2 bar from a pressurized tank. Two digital high-precision flow meters from Cole-Palmer are used to measure the flow rate of fuel and air. The air flow rate was measured by a mass flow rate. Stretchy plastic plumbing is adopted to connect the combustor chamber with the fuel-air supply system. A LaVision digital PLIF system is installed perpendicular to the outlet plane of the combustor to execute direct photographs for the flame. The wall temperature is measured by OKAZAKI thermometer which is mounted at different positions on the wall. The accuracy of the thermometer is  $\pm 0.1$  °C. The design of the combustor has been illustrated in Fig. 2.

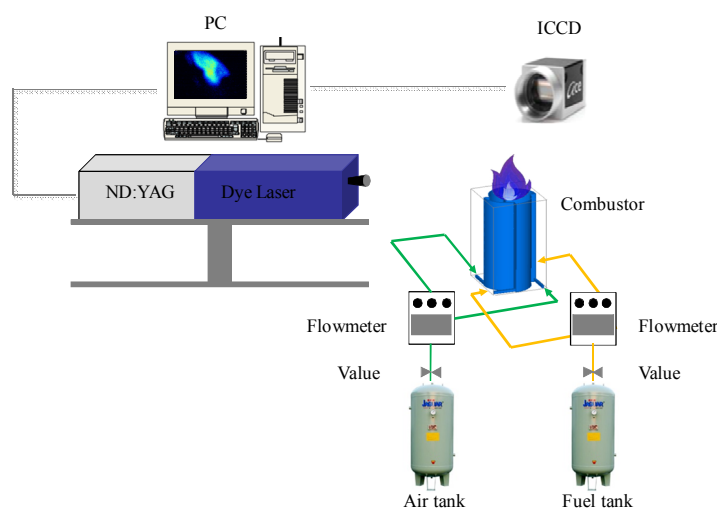


Fig. 1. Experimental setup

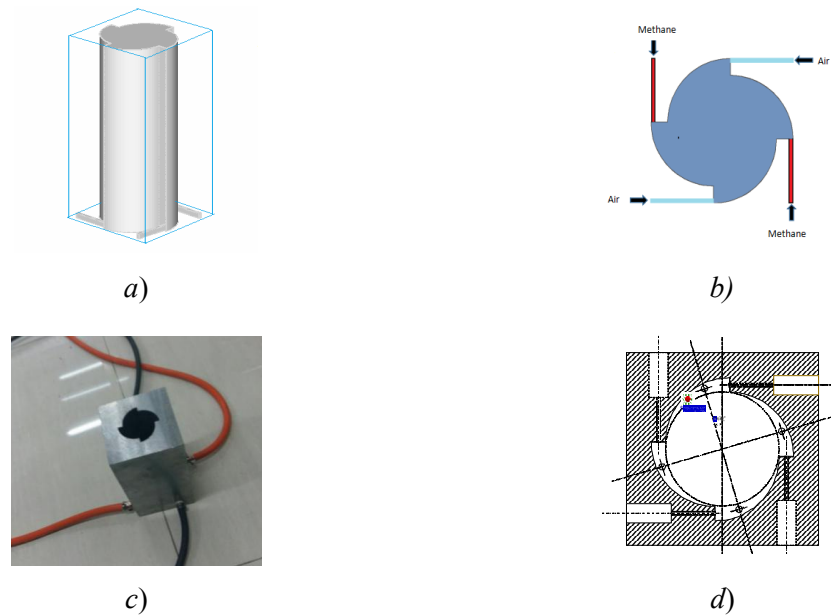


Fig. 2. The design of combustor

Non-premixed methane/air combustion in a novel asymmetric combustor with the equivalent radius of 30 mm was experimentally and numerically investigated. Negative pressure existing in the main flow and corner region of combustor respectively is beneficial to store heat energy and stabilize flame. Isolate vortex flow in each corner region has a function of drag reduction. With the increase of Reynolds number, the vortex in a corner region disappeared gradually. The existence of a wall self-cooling phenomenon obviously shows that the temperature ranges from 300 K to 400 K in the  $Z \leq 55$  mm region, and the highest temperature is about 1150 K in the whole combustor. The wall temperature was measured using a high precision thermocouple under the specified reacting flow conditions. With the increasing mass flow rate of air, the wall temperature increased. The effect of air/fuel inlet velocity on CO<sub>2</sub> emissions was investigated. Large-eddy simulation technique was adopted and second-order moment combustion model was used for modeling combustion by using UDF functions of Ansys Fluent 14.5. Several wealthy observations and conclusions are obtained:

1. There are multiple wake recirculation regions in each corner of the combustor when is low. With the increase of Re of inlets, the recirculation region in the corner are compressed, the lengths are shortened and the wake recirculation zones disappear gradually. Besides, with the increase of axial distance, the stagnation point of each recirculation region moves forward and gradually ruptures.

2. Well air-fuel mixing performance is achieved in this combustion device. It can lead to the lower combustion temperature, and reduce the emissions of NO<sub>x</sub> effectively by using such combustion system and technology. The results indicate that a new low emission combustor was presented.

3. Flame is full of the whole combustor than other vortex combustor. The average combustion temperature in the combustor decreases with the increase of Re. The maximum temperature in the main combustion zone is about 1100 K, approximately consistent with the experimental value. The wall cooling phenomenon can be observed on the bottom of combustor. The temperature is range from 300 K to 400 K in the  $Z \leq 55$  mm region.

4. The tangential velocity presents the centrosymmetric double-peak structure along the radial direction and keeps approximately consistent with Rankine Vortex law of mo-

tion. Mainstream and cornered backflow cause negative pressure areas respectively which is beneficial to the storage of heat and active centers as well as the stability of the flame. As shown in Fig. 3, the process of recirculation in a combustor using streamlines. These streamlines indicate the path that a fluid particle would follow. The mixture flows axially after the reaction and it diffuses away from the center.

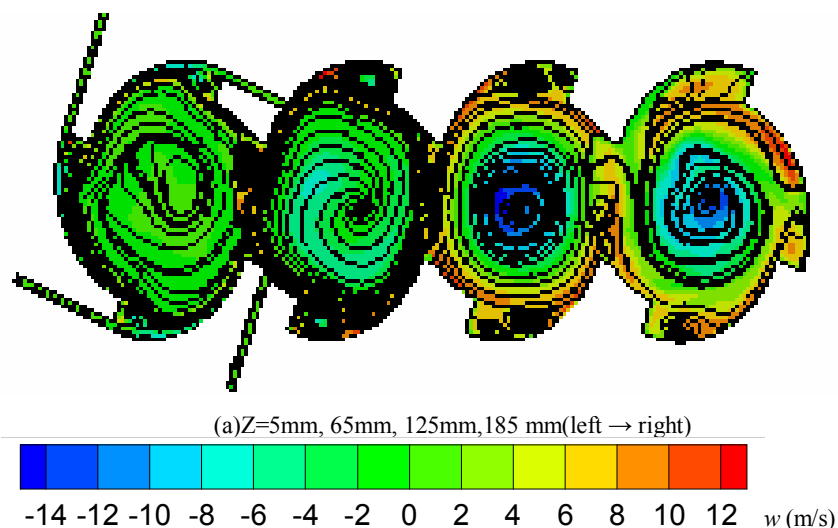


Fig. 3. Streamline with axial velocity in different cross section

#### References

1. You and Moin, P. A. Dynamic global-coefficient subgrid-scale eddy-viscosity model for large-eddy simulation in complex geometries / P. A. You and Moin // *Physics of Fluids*. – 2007. – N 19. – P. 229–244.
2. Dyke, M. V. Swirling flows: vortex flow in nature and technology / M. V. Dyke // *Science*. – Vol, 224, iss. 730–1.
3. Gabler, H. An experimental and numerical investigation of asymmetrically-fueled whirl flames ; Ph. D. thesis / H. Gabler ; Princeton University. – Princeton, 1988.
4. Gabler, H. C. Asymmetric Whirl Combustion: A New Approach for Non-Premixed Low  $\text{NO}_x$  Gas Turbine Combustor Design / H. C. Gabler, R. A. Yetter, I. Glassman // *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. – 1988. – N 98, iss. 3530. – P. 1–11.
5. Xiao, H. H. From fire whirls to blue whirls and combustion with reduced pollution / H. H. Xiao, M. J. Gollner, E. S. Oran // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2016. – Vol. 113. – P. 9457–9462.
6. Large-eddy simulation of ethanol spray combustion using a SOM combustion model and its experimental validation / K. Li [et al.] // *Applied Mathematical Modelling*. – 2015. – N 39. – P. 36–49.
7. Swirling turbulent non-premixed flames of methane: Flow field and compositional structure / P. A. Kalt [et al.] // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2022. – Vol. 29. – P. 1913–1919.
8. Large Eddy Simulations of Swirling Non-premixed Flames With Flamelet Models / A. A. Kempf [et al.] // *Comparison of Numerical Methods, Flow, Turbulence and Combustion*. – 2008. – Vol. 81. – P. 523–561.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ САМОНЕСУЩИХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ

К. С. Баранкевич, Д. А. Купреева

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

Научный руководитель А. О. Шимановский

*Рассмотрена целесообразность замены неизолированных проводов воздушных линий электропередачи на самонесущие изолированные. Показано, что изолированный провод может быть размещен на уже существующих опорах. Представлены результаты конечно-элементного моделирования устройств воздушной линии электропередачи под действием статических и динамических нагрузок в среде программы ANSYS. Приведены результаты расчетов колебаний проводов, вызванных резким изменением нагрузки.*

**Ключевые слова:** воздушная линия, самонесущий изолированный провод, прочность, колебания.

В настоящее время в воздушных линиях электропередач используют провода из алюминия и сталеалюминия, которые обладают рядом недостатков, снижающих надёжность электроснабжения. Для ее повышения такие провода заменяют на самонесущие изолированные [1, 2]. В Беларуси они используются уже более 10 лет, а протяженность соответствующих распределительных сетей 10 кВ составляет несколько сотен километров.

Реконструкция воздушной линии электропередачи путем замены неизолированных проводов на изолированные, как правило, выполняется на основе использования уже имеющихся опор. Поэтому возникает необходимость анализа прочности несущих конструкций и устройств воздушных линий электропередач с учетом изменения нагрузок от веса провода, причем здесь следует принимать во внимание действие как статических, так и динамических нагрузок.

Методика проектных расчетов воздушных линий электропередач достаточно подробно описана в литературе, в том числе с учетом действия нагрузок, вызванных действием различных факторов окружающей среды. Так, в [3] рассматривается методика расчета ожидаемых нагрузок ветра на основе использования специально разработанной программы. Аналогичная задача решается в работе [4], при этом описаны как нормальный режим работы, так и случай обрыва фазного провода. В [5] представлен алгоритм выполнения работ по замене голого провода на самонесущий изолированный провод под напряжением между двумя анкерными пролетами воздушной линии 10 кВ.

Выполненный анализ публикаций продемонстрировал, что не до конца изучена ситуация с возможностью использования элементов существующих ЛЭП в модернизированных воздушных линиях. Целью представленной работы является создание методики анализа прочности элементов воздушной линии электропередач с учетом изменения характеристик проводов на примере предприятия «Солигорскгаз».

Исходя из интенсивности внешних воздействий на конструктивные элементы воздушной линии, соответствующей частоты повторяемости наибольших гололедной и ветровой нагрузок (один раз в 25 лет) получено, что нормативное ветровое давление на высоте 10 м над поверхностью земли для III ветрового района составляет 650 Па. Для местности, в которой располагается трасса воздушной линии, наименьшее допустимое расстояние от провода воздушной линии до поверхности земли

составляет 7 м. Выполненный по типовой методике расчет показал, что в рассмотренном случае для неизолированного провода АС-35/6,2 допустимая величина пролета составляет 66 м, а для изолированного СИП  $1 \times 35$  она равна 71,55 м. Следовательно, изолированный провод может быть размещен на уже существующих опорах.

Используемые в настоящее время фарфоровые изоляторы не могут быть использованы для изолированных проводов. Сравнение полимерных и стеклянных изоляторов показало, что более рационально применение стеклянных изоляторов. Установлено, что для них расчетные нагрузки не превышают допустимую минимальную механическую разрушающую нагрузку.

Выполнен проверочный расчет устройств воздушной линии электропередачи под действием статических и динамических нагрузок в среде программы ANSYS. На рис. 1 показано распределение напряжений в траверсе, к которой крепятся изоляторы с проводами под действием нагрузки, связанной с внезапным обрывом провода. Как видно из приведенной схемы на рис. 1, наибольшие напряжения возникают в местах соединения деталей траверсы, являющихся концентраторами напряжений. Полученные значения напряжений не превысили допускаемые значения.

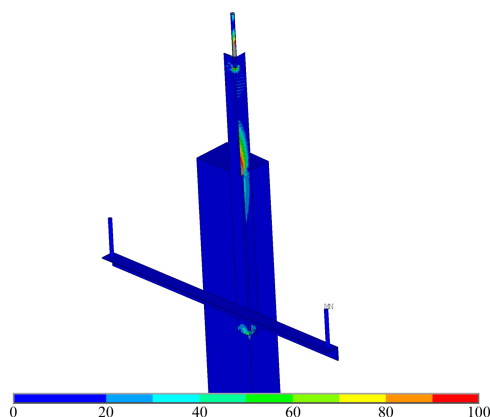


Рис. 1. Эквивалентные напряжения в траверсе, МПа

Также выполнены расчеты колебаний проводов, связанных с действием внезапной нагрузки (например, при взлете сидящей на проводе птицы). На рис. 2 приведены схемы, на которых представлено векторное изображение смещений точек проводов в результате колебаний, вызванных резким изменением нагрузки.

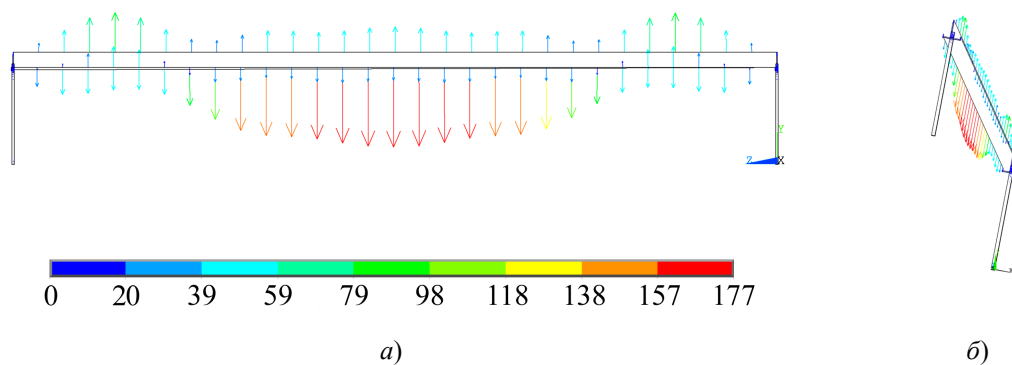


Рис. 2. Вертикальные перемещения проводов, м, в момент, равный 0,98 с, после внезапного приложения нагрузки:  
 а – перемещения проводов; б – распределение перемещений в пространстве



Выполненный анализ колебаний проводов при действии внезапной нагрузки показал, что в течение двух циклов колебаний их амплитуда уменьшается в 5 раз (рис. 3).

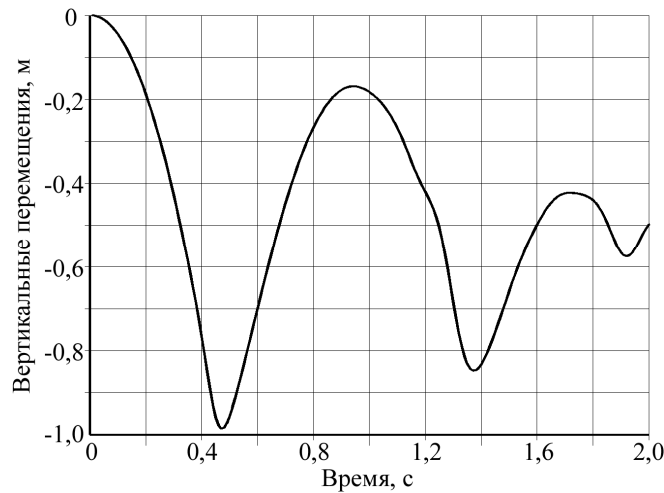


Рис. 3. Изменение перемещений центральной точки провода в зависимости от времени

Таким образом, в результате выполнения работы разработана методика, позволяющая оценить прочность элементов воздушной линии электропередач при замене неизолированных проводов на самонесущие изолированные. Выполнено конечно-элементное моделирование промежуточной опоры и участка воздушной линии в среде программы ANSYS, которое показало, что напряжения в устройствах воздушной линии не превышают допустимые значения. Проведен анализ колебаний проводов при действии внезапной нагрузки, показавший, что в течение двух циклов колебаний их амплитуда уменьшается в 5 раз. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании реконструкции воздушных линий электропередач.

#### Л и т е р а т у р а

1. Карницкий, В. Ю. Самонесущие изолированные провода СИП для воздушных линий с изолированными проводами типа ВЛИ и ВЛЗ / В. Ю. Карницкий // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. – 2010. – № 3-5. – С. 52–55.
2. Comparative analysis of the various types of structures for the electric transmission power cables supports' static work in the software complexes implementing the finite elements method / L. S. Sabitov [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 913, N 2. – Art. 022032.
3. Чуйкин, С. В. Разработка программы расчета ожидаемых нагрузок ветра на провода воздушных линий электропередачи / С. В. Чуйкин, Т. В. Дорофеева, Е. О. Кшевевская // Инженерные системы и сооружения. – 2015. – № 1. – С. 23–28.
4. Абдулвелеев, И. Р. Автоматизированный расчет надежности воздушных линий электропередачи в критических погодных условиях / И. Р. Абдулвелеев, Г. П. Корнилов, А. Н. Шеметов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 7. – С. 30–38.
5. Зиганшин, А. Г. Технология замены голого провода на самонесущий изолированный провод в распределительной сети 10 кВ / А. Г. Зиганшин, Г. М. Михеев, А. А. Димитриев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2022. – № 6. – С. 5–10.

Научное издание

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

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

**Гомель, 27–28 апреля 2023 года**

**В двух частях  
Часть 1**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редакторы: *Т. Н. Мисюрова, О. С. Ковалева*

Компьютерная верстка: *Н. Б. Козловская, И. П. Минина*

Подписано в печать 23.10.23.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 35,80. Уч.-изд. л. 27,08.

Тираж 30 экз. Заказ № 681/16.

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