

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ТЕХНИКИ»

Материалы III Международной научно-технической конференции
СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»

Сарапул, 15–16 декабря 2023 г.



Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова»
СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ТЕХНИКИ»

Материалы III Международной научно-технической конференции
СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»

Саранул, 15–16 декабря 2023 г.



Издательство УИР ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова
Ижевск 2024

УДК 001:004(06)
ББК 6/8(2Р–6У)
А43

Редакционная коллегия:

Г. В. Миловзоров, доктор технических наук, профессор
Ю. Г. Подкин, доктор технических наук, профессор
И. М. Вельм, доктор культурологии, профессор
В. Н. Тюкпиеков, кандидат технических наук, доцент
Л. Е. Ленченкова, доктор технических наук, профессор
А. Л. Галиев, доктор технических наук, профессор
К. В. Стати, ведущий инженер-системотехник
Т. А. Войнова, заведующий сектором библиотеки

Актуальные проблемы науки и техники : матер. III Междунар. науч.-техн. конф. (Сарапул, 15–16 декабря 2023 г.). – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2024. – 277 с. – 7,1 МБ. – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7526-1032-5

В сборнике публикуются статьи студентов, аспирантов, магистрантов, преподавателей и ученых ИжГТУ имени М. Т. Калашникова и его филиалов, ведущих вузов Российской Федерации, преподавателей школ, сотрудников предприятий и организаций Российской Федерации. Тематика докладов посвящена математике и естественным наукам, машиностроению, строительству, нефтегазовому делу, информатике и вычислительной технике, информационно-измерительным системам, электронике и современным средствам автоматизации, электротехническим комплексам и системам, телекоммуникационным системам и связи, техносферной безопасности, экономике и менеджменту, гуманитарным наукам.

Сборник предназначен для преподавателей и обучающихся, занимающихся научно-исследовательской деятельностью, с целью использования в научной и учебной деятельности.

УДК 001:004(06)
ББК 6/8(2Р–6У)

ISBN 978-5-7526-1032-5

© ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2024
© Оформление. Издательство УИР ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова, 2024

СЕКЦИЯ № 1 СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 662.998

К вопросу анализа характеристик теплоизоляционных материалов

П. А. Бурнышева, Т. П. Чепикова

В статье приводятся особенности некоторых видов теплоизоляционных материалов, а также их характеристики для сравнения. В результате анализа сделаны предложения по выбору теплоизоляционных материалов для строительства.

Ключевые слова: теплоизоляция, материал, преимущество, качество.

On the issue of analysis of thermal insulation materials

P. A. Burnysheva, T. P. Chepikova

The article presents the features of some types of thermal insulation materials, as well as their characteristics for comparison. As a result of the analysis, suggestions were made on the choice of thermal insulation materials for construction.

Keywords: thermal insulation, material, advantage, quality.

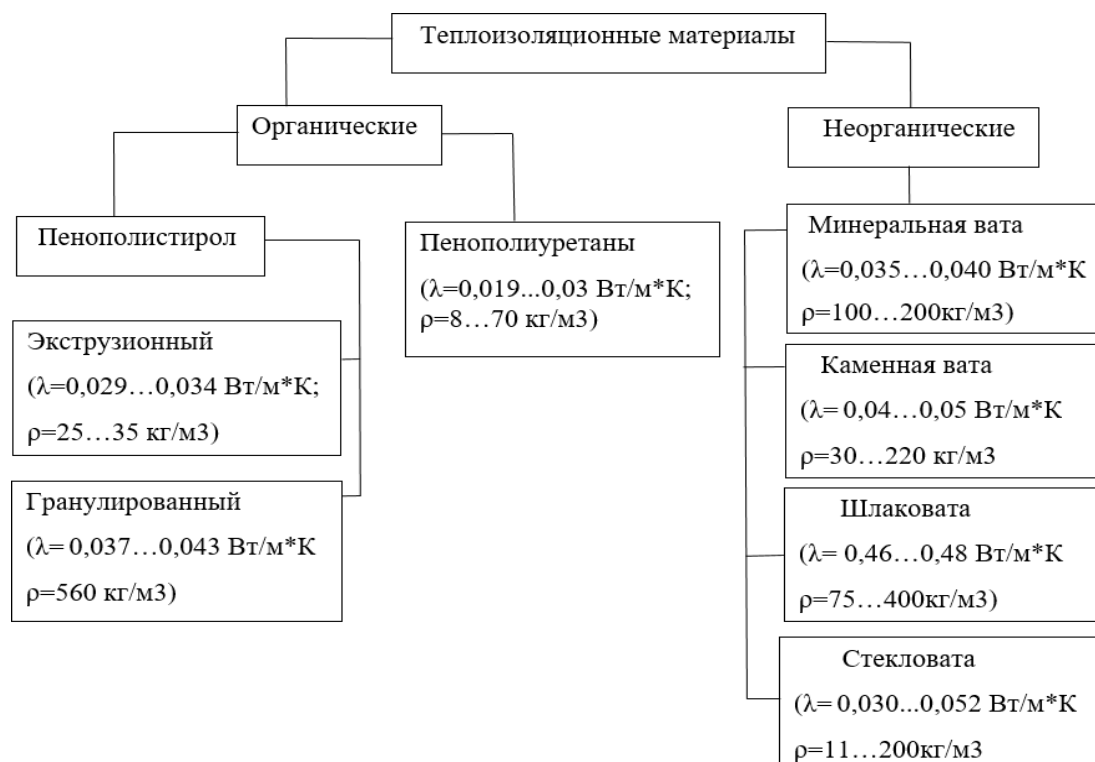
Как известно, теплоизоляция – это элемент конструкции зданий, который помогает снизить теплопотери. На рынке представлен широкий спектр материалов для утепления крыш, полов и стен, что затрудняет выбор. Изоляционные материалы характеризуются высокопористой структурой (70...98 %), низкой средней плотностью (менее 500 кг/м³) и низкой теплопроводностью (теплопроводность не более 0,175 Вт/(м × °C)) [2].

На рисунке представлены некоторые виды теплоизоляционных материалов и их характеристики, такие как теплопроводность, плотность [3].

Свойства, которые необходимо учитывать при выборе теплоизоляции: теплопроводность, горючесть, паропроницаемость, влагостойкость, гидрофобность и экологичность. После изучения различных видов теплоизоляции были выбраны наиболее распространенные среди органической и неорганической группы: каменная вата и экструзионный пенополистирол.

1. Каменная вата «Роклайт»

Минеральная вата «Роклайт» компании «Технониколь» состоит из синтетических волокон и мелкой каменной крошки, глины. Благодаря небольшому весу, хорошей испаряемости и низкому влагопоглощению ценность этого материала нельзя недооценивать. Они бывают в рулонном и листовом виде разного размера и толщины – от 50 до 100 мм. Сохранение тепла осуществляется благодаря конструкции с большим количеством сэндвич-слоев.



Классификация теплоизоляционных материалов

В отличие от пенопласта, в минеральной вате не будут гнездиться мелкие грызуны. Стоит отметить, что вата быстро собирает пыль и не устойчива к влаге, поэтому необходимо более внимательно относиться к удалению воды. Утеплитель обладает отличными теплоизоляционными свойствами. Материал изготовлен из натуральных компонентов — стекловолокна и кварцевого песка. Минеральная вата «Технониколь Роклайт» не влияет на организм человека и окружающей среды, сохраняет тепло, имеет высокий уровень шумопоглощения, не является пристанищем насекомых и грызунов из неорганических источников. Минеральная вата в соответствии с заявлением производителя имеет срок эксплуатации до 50 лет, при этом не меняя первоначальные свойства.

2. Пенополистирол экструзионный

Экструзионный пенополистирол «Технониколь CARBON PROF» является одним из самых высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Повышенная прочность и низкий показатель теплопроводности обуславливают популярность материала в промышленном и гражданском строительстве. Он представляет собой теплоизоляционный материал с равномерно распределенными замкнутыми ячейками. XPS не впитывает воду, не набухает и не дает усадки, химически стоек и не подвержен гниению.

Высокая прочность плит из экструзионного пенополистирола позволяет получить ровное и одновременно жесткое основание, что существенно увеличивает срок эксплуатации всей теплоизоляционной системы.

На основании характеристик этих материалов можно составить табл. 1 и 2 для их сравнения.

Таблица 1. Характеристики теплоизоляционных материалов

Характеристики	Каменная вата РОКЛАЙТ	Пенополистирол CARBON PROF
Плотность, кг/м ³	30...40	8...35
Вид конструкции	Универсальный	Стена, балкон
Теплопроводность при (25±5)°С, не более, Вт/м·К	0,036	0,03
Горючесть, степень	НГ	Г4
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,3	0,014
Температурный режим использования.	–85 ...+870 °С	–70 ...+75 °С
Группа токсичности	T1	T2
Срок службы, лет	Не менее 50	15...20
Прочность на сжатие при 10 % деформации, не менее, кПа	10	0,5
Цена за кв. м, руб.	363	185

Таблица 2. Сравнительная таблица теплоизоляционных материалов

Наименование	Достоинства	Недостатки
Каменная вата «Роклайт»	<ul style="list-style-type: none"> – Экологически чистый «дышащий» материал; – Низкое водопоглощение; – Долговечен; – Огнестойкий 	<ul style="list-style-type: none"> – Не всегда качественно произведен; – ломкий; – есть трудности с оштукатуриванием стен
Экструзионный пенополистирол CARBON PROF	<ul style="list-style-type: none"> – Поглощение влаги в пределах 0,2% (практически полная водонепроницаемость); – минимальный показатель теплопроводности; – высокая прочность (выдерживает до 25 000 килограмм на 1 квадратный метр) – морозостойкий 	<ul style="list-style-type: none"> – Слабая звукоизоляция; – низкая экологичность материала; – не выдерживает прямых солнечных лучей

Таким образом, можно сделать вывод, что каменная вата «Роклайт» имеет больше достоинств: срок службы, степень горючести, экологичность и др., несмотря на высокую стоимость относительно пенополистирола.

Однако не стоит забывать, что к выбору теплоизоляционного материала необходимо подходить индивидуально для каждого объекта, учитывая климатические условия и пожелания клиента.

Список использованных источников и литературы

1. Официальный сайт «ТехноНИКОЛЬ». – URL: <https://www.tn.ru>.
2. Теплоизоляционные материалы и конструкции : учебник для средних профессионально-технических учебных заведений / Ю. Л. Бобров, Е. Г. Овчаренко, Б. М. Шойхет, Е. Ю. Пухова. – Москва : ИНФРА-М, 2003. – 268 с.
3. Горлов, Ю. П. Технология теплоизоляционных материалов : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Производство строительных изделий и конструкций» / Ю. П. Горлов, А. П. Меркин, А. А. Устенко. – 1980. – 272 с.

Сведения об авторах

Полина Андреевна Бурнышева, студент Чайковского филиала ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Россия, г. Чайковский), polinaburnysheva1481@gmail.com

Татьяна Петровна Чепикова, кандидат технических наук, зав. кафедрой «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Сарапульского политехнического института (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», (Россия, г. Сарапул); доцент кафедры «Экономики, управления и предпринимательства», Чайковский филиал ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Россия, г. Чайковский), chepikova_tanja@mail.ru

Особенности формирования офисной среды в России в контексте российской практики создания административно-офисных зданий

О. В. Закирова

Планирование вложений в коммерческую недвижимость в городской среде должно сопровождаться исследованием района предполагаемого месторасположения здания, а также спроса со стороны потенциальных арендаторов. Уход иностранных компаний с российского рынка вызвал рост спроса на коммерческую недвижимость.

Ключевые слова: бизнес-центр, офисная среда, административно-офисные здания, коммерческая недвижимость, класс А, класс В.

Features of the formation of the office environment in Russia in the context of the Russian practice of creating administrative and office buildings

O. V. Zakirova

Planning investments in commercial real estate in an urban environment should be accompanied by a study of the area of the proposed location of the building, as well as demand from potential tenants. The withdrawal of foreign companies from the Russian market caused an increase in demand for commercial real estate.

Keywords: business center, office environment, administrative and office buildings, commercial real estate, class A, class B.

Планирование инвестиционных вложений в строительство коммерческих объектов в городской среде должно начинаться с исследования основных трендов.

Главной тенденцией 2022 года стал рекордный рост инвестиций в недвижимость – 439 млрд руб., что превысило показатели 2021 года на 8 %. Причем объем инвестиций во второй половине 2022 года, превысил аналогичные показатели 2021 года на 26 % (рис. 1). Однако следует понимать, что данный эффект – это не наметившаяся тенденция, а лишь «вспышка», связанная с уходом с российского рынка иностранных участников. Процесс ухода с российского рынка привел к тому, что в 2022 году объем продаж коммерческой недвижимости иностранными собственниками составил 88 млрд руб., или 34 % от объема инвестиций в такие сегменты за год (по сравнению с 10 % в 2021 году) [1].



Рис. 1. Динамика объема инвестиций в недвижимость в России [1]

Основные лидеры по росту объема сделок с недвижимостью в 2022 году:

- складской сектор – 22 %;
- офисная недвижимость – 20 %;
- торговый сегмент – 9 %.

Наиболее крупными сделками стали продажи иностранными владельцами следующих объектов [3]:

1. Логистический индустриальный парк «Южные врата» площадью 650 тыс. кв. м, стоимостью 18–20 млрд руб.
2. Бизнес-центр Камсити (Comcity), 288 тыс. кв. м, за 15–17 млрд руб.
3. ТРЦ «Охта Молл», 148 тыс. кв. м.
4. БЦ «Дукат Плэйс II», 19,5 тыс. кв. м.

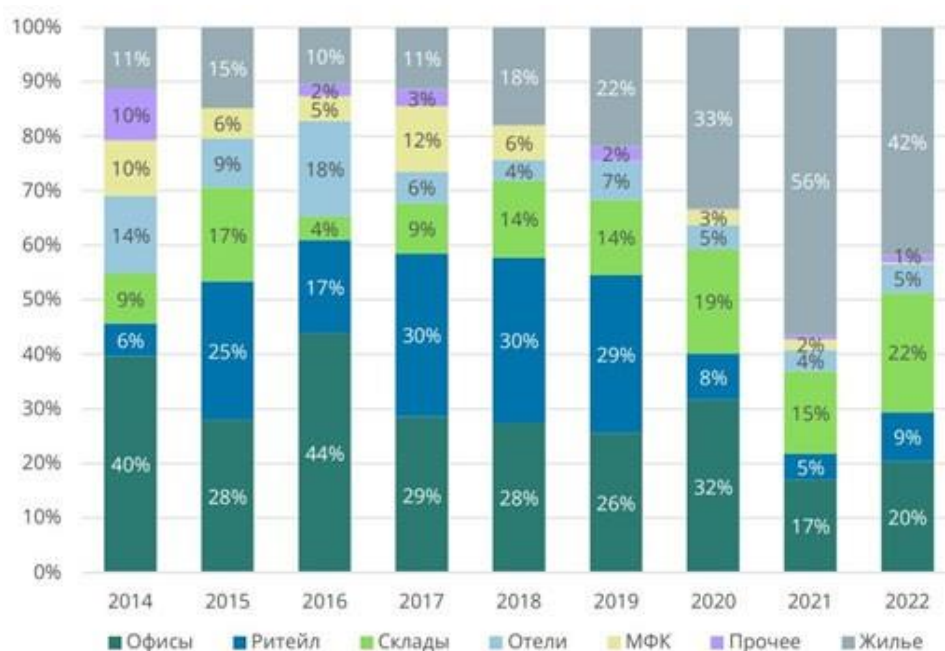


Рис. 2. Динамика распределения общего объема инвестиций в недвижимость [2]

Много сделок носит конфиденциальный характер, подробности которых не раскрываются по желанию частных инвесторов.

Исследование спроса на офисные помещения позволяет прийти к следующим выводам:

- текущая активность в Москве и регионах сосредоточена на аренде офисов класса В, доля класса А в структуре спроса снижается в годовой динамике – это также становится примером оптимизации затрат компаний на аренду (таблица);
- растет популярность гибких офисов. Их доля в структуре спроса коммерческой недвижимости в категории купли-продажи составила 46 %, на рынке аренды – 36 %. В гибких офисах располагаются востребованные в условиях пандемии сервисы доставки еды и продуктов, пункты выдачи заказов онлайн-магазинов. Кроме того, гибкие офисы часто находятся в спальных районах, а люди как раз стали чаще покупать товары и услуги в точках у дома.

Спрос на офисные помещения в Москве и регионах [4]

Показатели	Москва			Регионы		
	А	В	С	А	В	С
Текущий спрос	18 %	76 %	7 %	26 %	65 %	9 %

Спрос на офисы класса А зависит от месторасположения бизнес-центра. Например, самая низкая доля свободных площадей (около 6 %) была зафиксирована в Москва-Сити и Ленинградском деловом районе. Площади же в других районах Москвы чаще выставляются на продажу. Таким образом, становится понятным, что ключевым фактором успеха делового центра является его месторасположение.

Список использованных источников и литературы

1. Архитектурная типология зданий и сооружений : учеб. для студ. вузов по спец. «Архитектура» / С.Г. Змеул, Б. А. Маханько. – Москва : Стройиздат, 2020. – 240 с. : ил.
2. Новая классификация офисной недвижимости. – URL: <https://www.ibgroup.ru/news/2022/04/27/597>.
3. Официальный сайт Российской гильдии управляющих и девелоперов. – URL: <https://rgud.ru>.
4. Официальный сайт CORE.XP. – URL: <https://rentnow.ru/analytics>.

Сведения об авторах

Ольга Владимировна Закирова, магистрант кафедры «Проектирование зданий», ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (Россия, г. Йошкар-Ола), ZakirovaOV@volgategh.net

СЕКЦИЯ № 2 ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.317

Система мониторинга электродвигателя

*Р. И. Давлетшин, М. И. Хакимьянов, Ван Кебо, ЧжуЧэнье,
Чжао Юйхан, Чжао Ипэн*

Рассматриваются вопросы мониторинга электродвигателей, основанного на расширенном векторе Парка и построении спектра мгновенной мощности для обнаружения характерных неисправностей и их влияния на срок службы электродвигателей.

Ключевые слова: спектральный анализ, электродвигатель, мониторинг, комплексная диагностика.

Motor monitoring system

*R. I. Davletshin, M. I. Khakimyanov, Wang Kebo, Zhuchengye,
Zhao Yuhang, Zhao Yipeng*

The issues of monitoring electric motors based on extended Park vector and instantaneous power to detect frequent faults and its impact on operating time are considered.

Keywords: spectral analysis, electric motor, monitoring, comprehensive diagnostics.

Методы диагностики электрических машин становятся все более востребованными и значимыми. Не каждая компания может позволить себе постоянное обновление оборудования из-за экономических трудностей. Промышленным компаниям приходится сокращать затраты на модернизацию и задействовать оборудование, которое требует ремонта. Даже при тщательном уходе любая электрическая машина требует внимания. Если обслуживание не проводится вовремя, могут возникнуть аварийные ситуации, представляющие угрозу для сотрудников и приводящие к непредвиденным простоям в производственной системе. Вследствие этого предлагается использовать систему мониторинга, основанную на применении расширенного вектора Парка и измерении мгновенной мощности для определения и оценки возникших неисправностей.

Метод расширенного вектора Парка (EVP) позволяет представлять несинусоидальные токи и напряжения в виде суммы синусоидальных функций. Это значительно упрощает анализ и позволяет применять традиционные методы расчета, используемые для анализа синусоидальных сигналов. В основе метода лежит разложение исходной несинусоидальной функции в ряд Фурье. При этом использу-

ются ортогональные функции, такие как синусоиды и косинусоиды. Затем каждое слагаемое ряда Фурье представляется в виде вектора на комплексной плоскости.

У асинхронных двигателей наиболее распространенной проблемой представляет эксцентриситет ротора. Есть два вида эксцентриситета – статический и динамический. При изготовлении и установке электродвигателя существует некоторая величина появления статической неравномерности воздушного зазора. При появлении динамического эксцентриситета ось вращения ротора не совпадает с его осью, а при статической – наоборот. Это все приводит на графике к нестандартным особенностям форм тока статора [1].

На рис. 1 отображен график, который был получен во время спектрального анализа электродвигателя с высоким уровнем эксцентриситета. Рост амплитуды наивысших точек указывает на повышение значения уровня эксцентриситета.

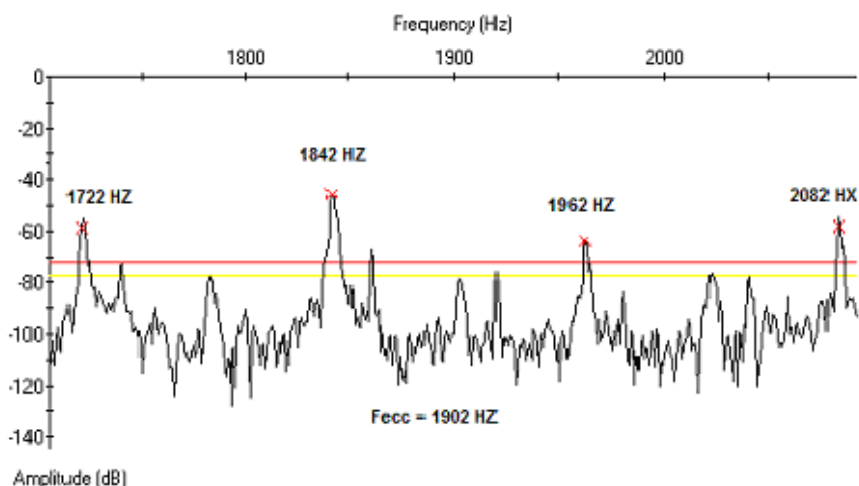


Рис 1. Спектр тока двигателя при наличии эксцентриситета

Также при моделировании на установке, основанной на базе трехфазного двигателя АИР50В4N3, были смоделированы разнообразные режимы нагрузки при работе асинхронного двигателя [2].

На рис. 2 отображен спектр тока электродвигателя в нормальном режиме и при обрыве одной из его фаз.

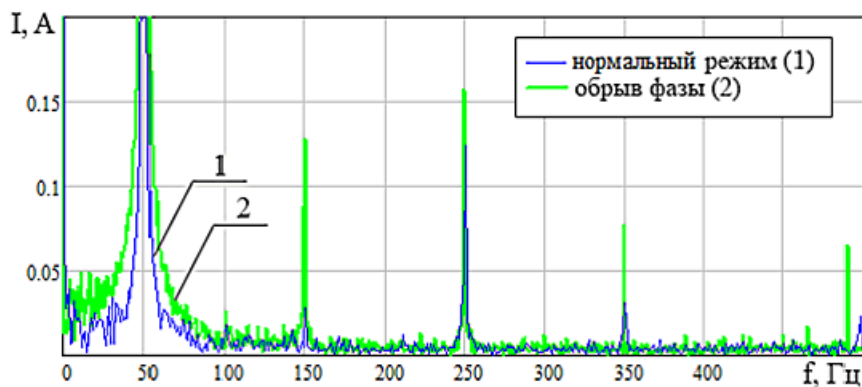


Рис 2. Спектры тока двигателя при его работе в нормальном режиме и при обрыве одной из фаз

На рис. 3 показан спектральный анализ тока двигателя при обычном режиме работы и при моделировании межвиткового замыкания на одной из фаз. Моделирование межвиткового замыкания было проведено путем подключения параллельного сопротивления в цепь номиналом 240 Ом.

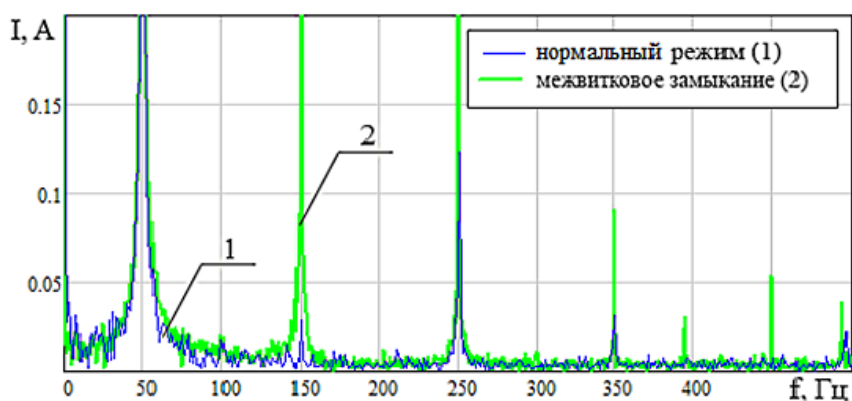


Рис 3. Спектры тока двигателя при его работе в нормальном режиме и при межвитковом замыкании одной из фаз

Исследование снятых спектров показало отличия между различными режимами работы асинхронного двигателя, что может быть применено для определения аварийных режимов работы электродвигателя. Аварийные режимы могут привести к серьезным повреждениям и угрозе безопасности персонала, поэтому результаты данного исследования могут быть внедрены в систему диагностики состояния АД в режиме реального времени.

Ниже представлена сводка о состоянии электродвигателя по результатам электродиагностики.

Состояние электродвигателя

Электродвигатель ИМ-4 315М-4	Обозначение компонентов	Источник питания	Статор	Ротор	Эксцентриситет	Нагрузка
	Состояние	Норма	Норма	Тревога	Стоп	Норма

Для подготовки данного отчета об оценке состояния использовалось несколько основных диагностических переменных, связанных с состоянием источников питания (SFsup), статора (SFsta), ротора (SFrot), эксцентрики (SFecc), и нагрузки (SFload). Отчет включает в себя анализ истории переменных за прошедший период, общий анализ активности двигателя и обработку записанных основных событий. Затем проводится более детальный анализ компонентов и их тенденций, а также сигнатурный анализ спектров для различных компонентов. Для каждого режима работы вычисляются статистические показатели для проведения более конкретного анализа тенденций.

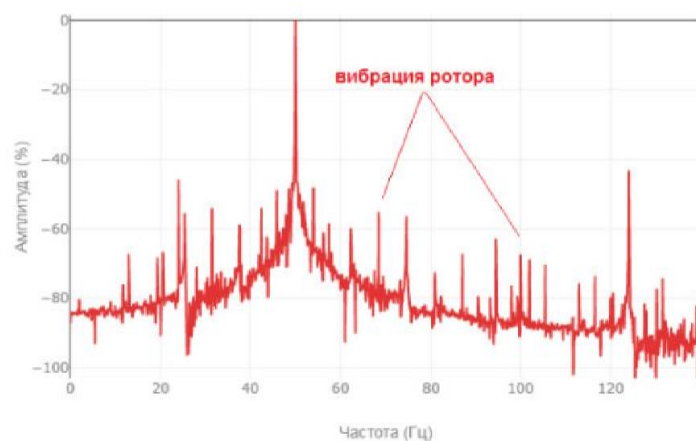


Рис 4. Спектр MCSA при нагрузке 96 %

Анализ спектра, представленного на рис. 4, позволяет сделать вывод, что ротор электродвигателя совершает частые механические колебания из-за постоянного его смещения в электромагнитном поле. Неустойчивое положение ротора (колебание) проявляется в спектре MCSA при нагрузке 96 % от номинальной. Также можно наблюдать в тренде эксцентриситета и период с низким коэффициентом компонента, что указывает на благоприятные условия положения ротора в поле статора электродвигателя и значительное снижение механических колебаний и, соответственно, вибрации в подшипниковых опорах.

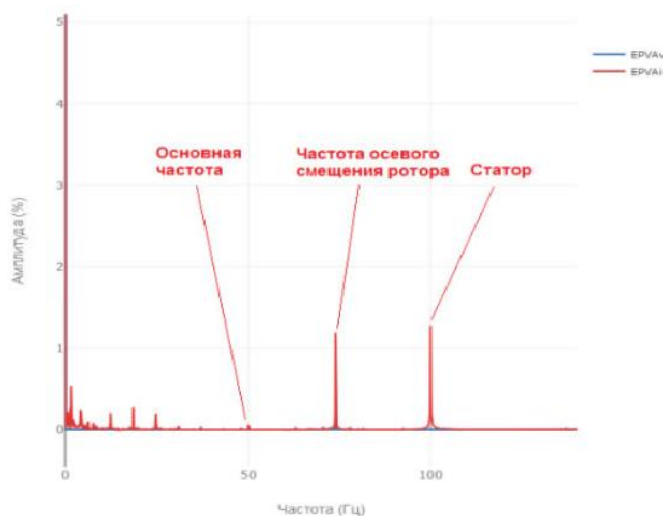


Рис 5. Вольт-амперный спектр EPVA при нагрузке 96%

Сигнатурный анализ вольт-амперного спектра EPVA, представленный на рис. 5, также указывает на проблемы ротора, а также на износ статора и деградацию его обмоток. Оба этих дефекта идентифицированы как развившиеся и требуют незамедлительных ремонтных воздействий. Наблюдается два максимальных пика под нагрузкой и в режиме холостого хода с рассоединенной муфтой на частотах 74 и 100 Гц. Низкочастотные колебания могут указывать на ослабление элементов подшипников скольжения и наличие утягивания ротора в результате неправильного осевого монтажа, в данном случае имеется пик на частоте 74 Гц с максимальной зарегистрированной амплитудой до 1,5 %.

На основе собранных и обработанных материалов можно прийти к заключению, что в течение периода мониторинга не все основные диагностические переменные имеют значения в пределах нормального диапазона. Результаты комплексной диагностики, которая применяется для электродвигателя, предполагают немедленное обнаружение выявленных проблем.

Список использованных источников и литературы

1. *Нафтулин, И. В.* Спектральный анализ токов статора асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором : дис. магистрант : 13.02.03 / Нафтулин Илья Викторович. – Москва, 2008. – 121 с.
2. *Бурцев, А. Г.* Спектральный анализ тока статора трехфазного асинхронного двигателя при аварийных режимах работы / А. Г. Бурцев, Т. В. Дягилева, А. Г. Пан // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2.

Сведения об авторах

Ринат Ильшатович Давлетишин, студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа), djsarnauta@yandex.com

Марат Ильгизович Хакимьянов, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа), hakimyanovmi@gmail.com

Ван Кебо, студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа), 2094109003@qq.com

Чжао Инэн, студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа), yipengzhao58@gmail.com

Чжао Юйхан, студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа), 2990534936@qq.com

Чжу Чэнье, студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа), 1697943964@qq.com

СЕКЦИЯ № 3
МАТЕМАТИКА И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 517.927.4

**К двухточечной краевой задаче для матричного уравнения Ляпунова
(двусторонняя регуляризация)**

И. И. Маковецкий

Получены эффективно проверяемые по исходным данным достаточные условия существования и единственности решения двухточечной краевой задачи для нелинейного уравнения Ляпунова. Предложен алгоритм построения решения с вычислительной схемой классического типа, при этом все приближения удовлетворяют краевому условию.

Ключевые слова: матричное дифференциальное уравнение, двухточечная краевая задача, однозначная разрешимость, построение решения.

**On a two-point boundary value problem for the Lyapunov matrix equation
(two-sided regularization)**

I. I. Makovetsky

Efficiently verifiable sufficient conditions for the existence and uniqueness of a solution to a two-point boundary value problem for the nonlinear Lyapunov equation are obtained. An algorithm for constructing a solution with a computational scheme of the classical type is proposed, with all approximations satisfying the boundary condition.

Keywords: matrix differential equation, two-point boundary value problem, unique solvability, solution construction.

Рассмотрим обобщение краевой задачи [1]

$$\frac{dX}{dt} = A(t)X + XB(t) + C_1(t)XC_2(t) + D_1(t)XD_2(t) + F(t, X), \quad X \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad (1)$$

$$MX(0) + NX(\omega) = 0, \quad (2)$$

где A, B, C_i, D_i ($i = 1, 2$) $\in \cdot (I, \mathbb{R}^{n \times n})$, $F \in \cdot (D_\rho, \mathbb{R}^{n \times n})$, M, N – вещественные $(n \times n)$ -матрицы, $I = [0, \omega]$, $D_\rho = \{(t, X) : t \in I, \|X\| < \rho\}$, $0 < \rho \leq \infty$; нелинейная функция $F(t, X)$ удовлетворяет в D_ρ относительно X условию Липшица (локально); $F(t, 0) \neq 0$.

Эту задачу изучаем в конечномерной банаховой алгебре $\square(n)$ непрерывных матричнозначных функций с нормой $\|X\| = \max_t \|X(t)\|$, где $\|\cdot\|$ – определенная норма матриц в этой алгебре, например, любая из норм, приведенных в [2, с. 21].

Предлагаемая работа является развитием и обобщением [1, 3–5]. С помощью метода регуляризации [6] получены достаточные условия однозначной разрешимости задачи (1), (2), представленные в ее терминах, а также разработан алгоритм построения решения и дана оценка его области локализации.

Приняты обозначения:

$$D_\rho = \{(t, X) : t \in I, \|X\| \leq \rho\}, \lambda_1 = \max_t \|U(t)\|, \lambda_2 = \max_t \|U^{-1}(t)\|, \mu_1 = \max_t \|V(t)\|, \\ \mu_2 = \max_t \|V^{-1}(t)\|, c_i = \max_t \|C_i(t)\|, d_i = \max_t \|D_i(t)\| \quad (i=1,2), P=U^{-1}(\omega)N^{-1}M, \\ Q=-V(\omega), \gamma = \|\Phi^{-1}\|, m = \max\{\|P\|, \|Q\|\}, h = \max_t \|F(t, 0)\|, \\ G(t, X(t)) = C_1(t)X(t)C_2(t) + D_1(t)X(t)D_2(t) + F(t, X(t)), \\ q = \gamma\lambda_0\mu_0m\omega(c_1c_2 + d_1d_2 + L), p = \gamma\lambda_0\mu_0m\omega h,$$

где $t \in I$, $0 < \rho < \bar{\rho}$, $\lambda_0 = \lambda_1\lambda_2$, $\mu_0 = \mu_1\mu_2$, Φ – линейный матричный оператор, $\Phi X = PX - XQ$, $L = L(\rho) > 0$ – постоянная Липшица для $F(t, X)$ в D_ρ , $U(t)$, $V(t)$ решения соответственно уравнений $dU/dt = A(t)U$, $dV/dt = VB(t)$.

Установлено, что в случае, когда

1) $\det N \neq 0$,

2) матрицы P, Q не имеют общих характеристических чисел, задача (1), (2) эквивалентна интегральной задаче

$$X(t) = U(t) \left\{ \Phi^{-1} \left[P \int_0^t U^{-1}(\tau) G(\tau, X(\tau)) V^{-1}(\tau) d\tau + \right. \right. \\ \left. \left. + \int_t^\omega U^{-1}(\tau) G(\tau, X(\tau)) V^{-1}(\tau) Q d\tau \right] \right\} V(t). \quad (3)$$

С помощью принципа сжимающих отображений Каччопполи – Банаха [7, с. 605] получена теорема, аналогичная теореме [1]:

Теорема. Пусть выполнены условия 1), 2), а также неравенства

3) $q < 1$,

4) $p / (1 - q) \leq \rho$.

Тогда решение задачи (1), (2) существует и единственно в области D_ρ .

Это решение представимо как предел равномерно сходящейся последовательности матричных функций, определяемых рекуррентным интегральным соотношением и удовлетворяющих условию (2), при этом справедлива оценка $\|X\| \leq p / (1 - q)$.

Решение интегрального уравнения (3) строим классическим методом [7, с. 605]

$$X_{k+1}(t) = U(t) \left\{ \Phi^{-1} \left[P \int_0^t U^{-1}(\tau) G(\tau, X_k(\tau)) V^{-1}(\tau) d\tau + \right. \right. \\ \left. \left. + \int_t^\omega U^{-1}(\tau) G(\tau, X_k(\tau)) V^{-1}(\tau) Q d\tau \right] \right\} V(t), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где $X_0(t)$ – произвольная матрица класса $\mathcal{C}^1(I, \mathbb{R}^{n \times n})$, принадлежащая шару $\|X\| \leq \rho$. Для приближений справедливы оценки $\|X_i\| \leq \rho$ ($i=1,2,\dots$). Это не трудно установить индукцией по k и на основании условия 4).

Покажем, что все приближения, построенные по алгоритму (4), принадлежат множеству допустимых функций. Под допустимыми функциями понимаем функции класса $\mathcal{C}^1(I, \mathbb{R}^{n \times n})$, удовлетворяющие условию (2).

Выполнив дифференцирование по t в обеих частях формулы (4), представим полученное выражение в виде

$$G(\tau, X_k(\tau))dt = dX_{k+1}(t) - [A(t)X_{k+1}(t) + B(t)X_{k+1}(t)]dt. \quad (5)$$

При $t = \omega$ из (5) имеем

$$X_{k+1}(\omega) = U(\omega)\Phi^{-1} \left\{ P \int_0^\omega U^{-1}(\tau)G(\tau, X_k(\tau))V^{-1}(\tau)d\tau \right\} V(\omega). \quad (6)$$

Далее запишем соотношение (6) в следующем виде:

$$\Phi U^{-1}(\omega)X_{k+1}(\omega)V^{-1}(\omega) = P \int_0^\omega U^{-1}(\tau)G(\tau, X_k(\tau))V^{-1}(\tau)d\tau. \quad (7)$$

На основании (5), (7) с помощью интегрирования по частям и тождеств $dU^{-1}/dt = -U^{-1}A(t)$, $dV^{-1}/dt = -B(t)V^{-1}$ получим

$$\Phi U^{-1}(\omega)X_{k+1}(\omega)V^{-1}(\omega) = P[U^{-1}(\omega)X_{k+1}(\omega)V^{-1}(\omega) - X_{k+1}(0)]. \quad (8)$$

Соотношение (8) эквивалентно следующему равенству:

$$MX_{k+1}(0) + NX_{k+1}(\omega) = 0, k=0,1,2,\dots \quad (9)$$

Равенство (9) позволяет строить приближенные решения задачи (1), (2) в классе допустимых функций.

На основании (4) для любых $k=1,2,\dots$ имеем

$$\begin{aligned} & \|X_{k+1}(t) - X_k(t)\| \leq \\ & \leq \left\| U(t) \left\{ \Phi^{-1} \left[P \int_0^t U^{-1}(\tau) [G(\tau, X_k(\tau)) - G(\tau, X_{k-1}(\tau))] V^{-1}(\tau) d\tau + \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left. + \int_t^\omega U^{-1}(\tau) [G(\tau, X_k(\tau)) - G(\tau, X_{k-1}(\tau))] V^{-1}(\tau) d\tau Q \right] \right\} V(t) \right\| \leq \\ & \leq \|U(t)\| \left\{ \left\| \Phi^{-1} \left[P \int_0^t U^{-1}(\tau) \|G(\tau, X_k(\tau)) - G(\tau, X_{k-1}(\tau))\| V^{-1}(\tau) d\tau + \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left. + \int_t^\omega U^{-1}(\tau) \|G(\tau, X_k(\tau)) - G(\tau, X_{k-1}(\tau))\| V^{-1}(\tau) d\tau Q \right] \right\} \|V(t)\| \leq \\ & \leq \gamma \lambda_1 \lambda_2 \mu_1 \mu_2 m \omega (c_1 c_2 + d_1 d_2 + L) \|X_k(t) - X_{k-1}(t)\|. \end{aligned} \quad (10)$$

На основе (10) получим неявную рекуррентную оценку

$$\|X_{m+1} - X_m\| \leq q \|X_m - X_{m-1}\|, \quad m=1,2,\dots,$$

а затем и явную

$$\|X_{m+1} - X_m\| \leq q^m \|X_1 - X_0\|, \quad m=1,2,\dots \quad (11)$$

На основании условий 3), 4) последовательность $\{X_k(t)\}_0^\infty$ сходится равномерно по $t \in I$ к решению $X(t) \in D_p$ уравнения (3).

Используя оценку (11), получим оценку, характеризующую скорость сходимости алгоритма (4),

$$\|X_k - X\| \leq q^k \frac{\|X_1 - X_0\|}{1-q}, \quad k=0,1,2,\dots \quad (12)$$

Из (12) при $k=0$, $X_0=0$ получим

$$\|X\| \leq \frac{\|X_1\|}{1-q}. \quad (13)$$

Далее на основе (13) получим оценку для $\|X\|$, выраженную через исходные данные задачи. При $k=0$, $X_0=0$ из (4) имеем

$$X_1(t) = U(t) \left\{ \Phi^{-1} \left[P \int_0^t U^{-1}(\tau) F(\tau, 0) V^{-1}(\tau) d\tau + \int_t^\omega U^{-1}(\tau) F(\tau, 0) V^{-1}(\tau) d\tau Q \right] \right\} V(t). \quad (14)$$

Выполнив последовательно оценки по норме в (14), имеем

$$\|X_1(t)\| \leq \|U(t)\| \left\| \Phi^{-1} \left[\left\| P \int_0^t U^{-1}(\tau) F(\tau, 0) V^{-1}(\tau) d\tau + \int_t^\omega U^{-1}(\tau) F(\tau, 0) V^{-1}(\tau) d\tau Q \right\| \right] \right\| \|V(t)\| \leq \gamma \lambda_0 \mu_0 \omega h = p.$$

Отсюда следует оценка

$$\|X_1\| \leq p. \quad (15)$$

Используя (15), получим из (13)

$$\|X\| \leq \frac{\|X_1\|}{1-q} \leq \frac{p}{1-q}. \quad (16)$$

Априорная оценка для $\|X\|$ имеет вид

$$\|X\| \leq \frac{p}{1-q}. \quad (17)$$

Это можно установить в результате соответствующих оценок в уравнении (3) с использованием условия (3).

Очевидно, оценка (17) грубее оценки (16).

Замечание

В работе [8] краевая задача (1), (2) качественными методами изучается в области $I \times \mathbb{R}^{n \times n}$. Теорема, приведенная в предлагаемой работе, очевидно, эффективнее соответствующей теоремы из [8], поскольку получена для области более общей конфигурации.

Список использованных источников и литературы

1. *Маковецкий, И. И.* Двухточечная краевая задача для матричного уравнения Ляпунова (двусторонняя регуляризация) // Актуальные проблемы науки и техники. Материалы II Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». Ижевск, 2022. – С. 91–95.
2. *Демидович, Б. П.* Лекции по математической теории устойчивости. – Москва, 1967. – 472 с.
3. *Лаптинский, В. Н.* Двусторонняя регуляризация нелинейно возмущенной двухточечной краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова с параметром / В. Н. Лаптинский, И. И. Маковецкий // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэту імя А. А. Куляшова. Сер. В. 2019. – № 2 (54). – С. 12–20.
4. *Лаптинский, В. Н.* Матричные дифференциальные уравнения Ляпунова и Риккати / В. Н. Лаптинский, И. И. Маковецкий, В. В. Пугин. – Могилев : БРУ, 2012. – 167 с.
5. *Лаптинский, В. Н.* К построению решения двухточечной краевой задачи для нелинейного матричного уравнения Ляпунова / В. Н. Лаптинский, И. И. Маковецкий // Дифференциальные уравнения. – 2020. – Т 56, № 1. – С. 137–141.
6. *Лаптинский, В. Н.* Конструктивный анализ управляемых колебательных систем. Минск: ИМ НАН Беларуси, 1998. – 300с.
7. *Канторович, Л. В.* Функциональный анализ / Л. В. Канторович, Г. П. Акилов. – Москва : Наука, 1977. – 744 с.
8. *Murty, K. N.* Two (multi) point nonlinear Lyapunov systems existence and uniqueness / K. N. Murty, G. W. Howell, S. Sivasundaram // Journal of mathematical analysis and applications. - 1992.- 167. P. 505-515.

Сведения об авторе

Илья Иванович Маковецкий, кандидат физико-математических наук, доцент, декан экономического факультета, МОУ ВО «Белорусско-Российский университет» (Республика Беларусь, г. Могилев), imi.makzi@gmail.com

К анализу периодической краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова – Риккати (правосторонняя регуляризация)

О. А. Маковецкая

На основе применения метода регуляризации получены достаточные условия существования и единственности решения периодической краевой задачи для обобщения матричных уравнений Ляпунова и Риккати, выраженные через ее исходные данные. Предложен итерационный алгоритм с неявной вычислительной схемой построения решения, а также изучены вопросы его сходимости, скорости сходимости

Ключевые слова: матричное дифференциальное уравнение, периодическая краевая задача, однозначная разрешимость, алгоритм

On the analysis of a periodic boundary value problem for the matrix Lyapunov-Riccati equation (right-side regularization)

O. A. Makovetskaya

Based on the application of the regularization method, sufficient conditions for the existence and uniqueness of the solution of a periodic boundary value problem for the generalization of the Lyapunov and Riccati matrix equations, expressed in terms of its initial data, are obtained. An iterative algorithm with an implicit computational scheme for constructing a solution is proposed, as well as questions of its convergence, convergence rate.

Keywords: periodic boundary value problem, matrix differential equation, existence and uniqueness of a solution, algorithm

Объектом исследования является обобщение задач [1–4]

$$\frac{dX}{dt} = A(t)X + C_1(t)XC_2(t) + XB(t) + Q_1(t)XQ_2(t)XQ_3(t) + F(t, X) \equiv G(t, X), \quad (1)$$

где $(t, X) \in I \times \mathbb{R}^{n \times n}$, $A, B, Q, C_1, C_2, Q_i \in \cdot (I, \mathbb{R}^{n \times n})$ ($i = 1, 2, 3$), $F \in \cdot (D_\rho, \mathbb{R}^{n \times n})$,

$$X(0) = X(\omega), \quad (2)$$

матрица-функция $F(t, X)$ в области $D_\rho = \{(t, X) : t \in I, \|X\| < \rho\}$ удовлетворяет относительно X локальному условию Липшица; $F(t, 0) \equiv \emptyset$; $I = [0, \omega]$, $\omega > 0$, $0 < \rho \leq \infty$.

В конечномерной банаховой алгебре $\square(n)$ непрерывных матричнозначных функций с нормой $\|X\|_\cdot = \max_t \|X(t)\|$ по методу регуляризации получены эффективно проверяемые достаточные условия однозначной разрешимости задачи (1), (2). Разработан алгоритм типа [2–5] построения приближенных решений, удовлетворяющих условию (2).

Для дальнейших рассуждений нам понадобятся обозначения:

$$D_\rho = \{ (t, X) : t \in I, \|X\| \leq \rho \}, D = \{ X(t) : \|X\| \leq \rho \}, B(\omega) = \int_0^\omega B(\tau) d\tau, \\ \gamma = \|B^{-1}(\omega)\|, \alpha = \max_t \|A(t)\|, \beta = \max_t \|B(t)\|, \delta_i = \max_t \|Q_i(t)\|, i=1,2,3, \\ \varphi(\rho) = \gamma \delta \omega \left(1 + \frac{1}{2} \beta \omega \right) \rho^2 + \gamma \omega \left[\alpha + \sigma_1 \sigma_2 + L + \frac{1}{2} \beta \omega (\alpha + \sigma_1 \sigma_2 + \beta + L) \right] \rho + \\ + \gamma \omega h \left(1 + \frac{1}{2} \beta \omega \right), \\ q(\rho) = \gamma \delta \omega (\beta \omega + 2) \rho + \frac{1}{2} \gamma \beta \omega^2 (\alpha + \sigma_1 \sigma_2 + \beta + L) + \gamma \omega (\alpha + \sigma_1 \sigma_2 + L),$$

где $\delta = \delta_1 \delta_2 \delta_3$, $0 < \rho < \rho$, $t \in I$, $L = L(\rho) > 0$ – постоянная Липшица для $F(t, X)$ в области D_ρ , $\|\cdot\|$ – определенная норма матриц в $\square(n)$, например, любая из норм, приведенных в [6, с. 21].

Установлено, что при выполнении условия

$$\det B(\omega) \neq 0 \quad (3)$$

задача (1), (2) эквивалентна матричному интегральному уравнению

$$X(t) = \left\{ \int_0^t G(\tau, X(\tau)) \left[\int_0^\tau B(\sigma) d\sigma \right] d\tau - \int_t^\omega G(\tau, X(\tau)) \left[\int_\tau^\omega B(\sigma) d\sigma \right] d\tau - \right. \\ \left. - \int_0^\omega [G(\tau, X(\tau)) - X(\tau) B(\tau)] d\tau \right\} B^{-1}(\omega). \quad (4)$$

С помощью принципа сжимающих отображений Каччопполи – Банаха (см., например, [7, с. 605]) доказано, что при выполнении условия (3) и неравенств

$$\varphi(\rho) \leq \rho, \quad (5)$$

$$q(\rho) < 1. \quad (6)$$

Задача (1), (2) однозначно разрешима в области D_ρ , при этом справедлива оценка $\|X\| \leq \varphi(\rho)$.

Предложено строить решение интегрального уравнения (4) на основе модификации метода последовательных приближений, реализация которого в дифференциальной форме имеет вид

$$\frac{dX_{k+1}(t)}{dt} = Q(t, X_k(t)), \quad (7)$$

$$X_{k+1}(0) = X_{k+1}(\omega), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где в качестве начального приближения X_0 принята постоянная матрица, определяемая из интегрального уравнения первого рода

$$\int_0^{\omega} [A(\tau)X(\tau) + X(\tau)B(\tau) + C_1(\tau)X(\tau)C_2(\tau) + Q_1(\tau)X(\tau)Q_2(\tau)X(\tau)Q_3(\tau) + F(\tau, X(\tau))]d\tau = 0. \quad (9)$$

Замечание

В качестве начального приближения в предлагаемом алгоритме вместо постоянной матрицы можно принять одно из возможных решений $X_0(t) \in D$ уравнения (9), то есть функцию, дающую приближенное решение $X_1(t)$, удовлетворяющее условию (8) (при $k = 0$).

С помощью регуляризатора

$$\int_0^{\omega} X_k(\tau)B(\tau)d\tau = X_k(t)B(\omega) - \int_0^t (dX_k(\tau)) \left(\int_0^{\tau} B(\sigma)d\sigma \right) + \int_t^{\omega} (dX_k(\tau)) \left(\int_{\tau}^{\omega} B(\sigma)d\sigma \right)$$

на основе (7), (8) получим алгоритм с неявной вычислительной схемой

$$X_k(t) = \int_0^{\omega} G(\tau, X_{k-1}(\tau))K(t, \tau)d\tau - \int_0^t [A(\tau)X_k(\tau) + C_1(\tau)X_k(\tau)C_2(\tau) + Q_1(\tau)X_k(\tau)Q_2(\tau)X_k(\tau)Q_3(\tau) + F(\tau, X_k(\tau))]d\tau B^{-1}(\omega), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (10)$$

где

$$K(t, \tau) = \begin{cases} \int_0^{\tau} B(\sigma)d\sigma B^{-1}(\omega), & 0 \leq \tau \leq t \leq \omega, \\ -\int_{\tau}^{\omega} B(\sigma)d\sigma B^{-1}(\omega), & 0 \leq t < \tau \leq \omega. \end{cases}$$

Далее изучим вопросы сходимости, скорости сходимости алгоритма (10). Вопрос сходимости заменим эквивалентным вопросом о сходимости ряда

$$X_0(t) + (X_1(t) - X_0(t)) + (X_2(t) - X_1(t)) + \dots + (X_k(t) - X_{k-1}(t)) + \dots \quad (11)$$

Для доказательства равномерной по $t \in [0, \omega]$ сходимости ряда (11) построим сходящийся числовой ряд, который является мажорантой на $[0, \omega]$ для матричного функционального ряда (11).

Используя выражение (10), выполним оценки $\|X_{m+1}(t) - X_m(t)\|$:

$$\begin{aligned} \|X_{m+1}(t) - X_m(t)\| &\leq \int_0^{\omega} \|G(\tau, X_m(\tau)) - G(\tau, X_{m-1}(\tau))\| \|K(t, \tau)\| d\tau + \\ &+ \int_0^{\omega} \left[(\|A(\tau)\| + \|C_1(\tau)\| \|C_2(\tau)\|) \|X_{m+1}(\tau) - X_m(\tau)\| + \right. \\ &+ 2 \|Q_1(\tau)\| \|Q_2(\tau)\| \|Q_3(\tau)\| \|X_{m+1}(\tau) - X_m(\tau)\| + \\ &+ \|F(\tau, X_{m+1}(\tau)) - F(\tau, X_m(\tau))\| \left. \right] d\tau \|B^{-1}(\omega)\| \leq \\ &\leq \frac{1}{2} \gamma \beta \omega^2 (2\delta \rho + \alpha + \beta + c_1 c_2 + L) \|X_m - X_{m-1}\| + \\ &+ \gamma \omega (2\delta \rho + \alpha + c_1 c_2 + L) \|X_{m+1} - X_m\|. \end{aligned}$$

Далее получаем оценку

$$\|X_{m+1} - X_m\| \leq (q - q) \|X_m - X_{m-1}\| + q \|X_{m+1} - X_m\|, \quad m=1,2,\dots, \quad (12)$$

где $q = \gamma\omega(2\delta\rho + \alpha + c_1c_2 + L)$.

Поскольку $q < 1$, то из (12) имеем рекуррентную оценку

$$\|X_{m+1} - X_m\| \leq q \|X_m - X_{m-1}\|, \quad m=1,2,\dots, \quad (13)$$

где $q = (q - q) / (1 - q) < q$. Более удобной является явная оценка, которую получим на основании (13)

$$\|X_{m+1} - X_m\| \leq q^m \|X_1 - X_0\|, \quad m=1,2,\dots \quad (14)$$

Используя условия (5), (6), можно доказать, что последовательность $\{X_k(t)\}_{k=0}^\infty$ сходится равномерно по $t \in I$ к решению интегрального уравнения

0

(4), при этом справедлива оценка

$$\|X - X_k\| \leq \frac{q^k}{1 - q} \|X_1 - X_0\|, \quad k=1,2,\dots \quad (15)$$

На основе (15) имеем оценку области локализации решения $X(t)$, определяемую согласно алгоритму (10),

$$\|X\| \leq \|X_0\| + \frac{\|X_1 - X_0\|}{1 - q}. \quad (16)$$

Оценка (16) будет эффективной, если ее правая часть не превосходит ρ , при этом выполнение неравенства $\|X_0\| < \rho$ является необходимым. Для повышения наглядности представления оценки (15), (16) дополним оценкой для $\|X_1 - X_0\|$. Из (10), (12) имеем

$$\begin{aligned} \|X_1 - X_0\| &\leq \frac{\gamma\omega^2 \left[\delta \|X_0\|^2 + (\alpha + \beta + c_1c_2 + L) \|X_0\| + h \right]}{2(1 - q)} \leq \\ &\leq \frac{\gamma\omega^2 [\delta \rho^2 + (\alpha + \beta + c_1c_2 + L) \rho + h]}{2(1 - q)}. \end{aligned}$$

Оценка (15) дает скорость сходимости алгоритма, представленного выражением (10).

Список использованных источников и литературы

1. *Маковецкая, О. А.* Анализ периодической краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова – Риккати (правосторонняя регуляризация // Актуальные проблемы науки и техники : Материалы II Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – Ижевск, 2022. – С. 86–90.

2. *Лаптинский, В. Н.* Конструктивный анализ периодической краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова – Риккати / В. Н. Лаптинский, О. А. Маковецкая // Труды ИСА РАН. – 2013. – Т. 63, № 2 – С. 90–98.

3. *Маковецкая, О.А.* Алгоритмы построения решений периодической краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова – Риккати // Весці Нац. акад. наук Беларусі, сер. фіз.-мат. навук. - 2014. – № 1. – С. 44–50.

4. *Лаптинский, В. Н.* Построение и структурные свойства решений периодической краевой задачи для обобщения матричных уравнений Ляпунова и Риккати / В. Н. Лаптинский, О. А. Маковецкая // Дифференциальные уравнения. – 2018.- Т. 54, № 7 – С. 937-946.

5. *Лаптинский, В. Н.* Конструктивный анализ управляемых колебательных систем. – Минск : ИМ НАН Беларусі, 1998. – 300 с.

6. *Демидович, Б. П.* Лекции по математической теории устойчивости. – Москва. : Наука, 1967. – 472 с.

7. *Канторович, Л. В.* Функциональный анализ / Л. В. Канторович, Г. П. Акилов. – Москва.: Наука, 1977. – 744 с.

Сведения об авторе

Ольга Александровна Маковецкая, начальник центра менеджмента качества образовательной деятельности, Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилев), olla.makzi@gmail.com

К левосторонней регуляризации периодической краевой задачи для системы матричных дифференциальных уравнений Риккати

Д. В. Роголев

Выведены коэффициентные достаточные условия однозначной разрешимости периодической краевой задачи для системы матричных дифференциальных уравнений Риккати. Дан алгоритм с неявной вычислительной схемой построения решения и изучены вопросы сходимости, скорости сходимости.

Ключевые слова: матричное уравнение Риккати, периодическая краевая задача, регуляризация.

On left-handed regularization of a periodic boundary value problem for the system of matrix Riccati differential equations

D. V. Rogolev

Coefficient sufficient conditions for the unique solvability of a periodic boundary value problem for the system of matrix Riccati differential equations are obtained. An algorithm with an implicit computational scheme for constructing a solution is given, and the issues of convergence and rate of convergence are studied.

Keywords: matrix Riccati equation, periodic boundary value problem, regularization.

Рассмотрим краевую задачу типа [1–4]

$$\frac{dX}{dt} = G_1(t, X, Y), \quad (1)$$

$$\frac{dY}{dt} = G_2(t, X, Y), \quad (2)$$

$$X(0) = X(\omega), \quad (3)$$

$$Y(0) = Y(\omega), \quad (4)$$

где

$$G_1(t, X, Y) = A_1(t)X + D_1(t)XB_1(t) + X(S_1(t)X + S_2(t)Y) + \\ + C_1(t)X^2 + X^2C_2(t) + F_1(t),$$

$$G_2(t, X, Y) = A_2(t)Y + D_2(t)YB_2(t) + Y(P_1(t)X + P_2(t)Y) + \\ + Q_1(t)Y^2 + Y^2Q_2(t) + F_2(t);$$

с коэффициентами класса $\cdot (I, \mathbb{R}^{n \times n})$, $(t, X, Y) \in I \times \mathbb{R}^{n \times n} \times \mathbb{R}^{n \times n}$; $I = [0, \omega]$, $\omega > 0$.

Матричные дифференциальные уравнения Ляпунова, Риккати и их обобщения относятся к многомерным системам специального вида. Эти уравнения играют важную роль в теории и приложениях дифференциальных уравнений [1, 5–8 и др.].

Примем следующие обозначения:

$$D = \{(t, X, Y) : 0 \leq t \leq \omega, X \leq \rho, Y \leq \rho\}, A(\omega) = \int_0^\omega A(\tau) d\tau, \gamma = A^{-1}(\omega),$$

$$\alpha_i = \max_t \|A_i(t)\|, \beta_i = \max_t \|B_i(t)\|, d_i = \max_t \|D_i(t)\|, \delta_i = \max_t \|S_i(t)\|, \mu_i = \max_t \|P_i(t)\|,$$

$$\sigma_i = \max_t \|C_i(t)\|, v_i = \max_t \|Q_i(t)\|, h_i = \max_t \|F_i(t)\|,$$

$$q_{11} = \gamma \left[\alpha \omega^2 (\alpha + \beta d + 2(\delta + \sigma + \sigma) \rho + \delta \rho) + \right. \\ \left. + \omega (\beta d + 2(\delta + \sigma + \sigma) \rho + \delta \rho) \right], q_{12} = \gamma \delta \rho \omega \left(\frac{1}{2} \alpha \omega + 1 \right),$$

$$q_{21} = \gamma \mu \rho \omega \left(\frac{1}{2} \alpha \omega + 1 \right), q_{22} = \gamma \left[\alpha \omega^2 (\alpha + \beta d + \mu \rho + 2(\mu + v + v) \rho) + \right. \\ \left. + \omega (\beta d + \mu \rho + 2(\mu + v + v) \rho) \right],$$

где $t \in [0, \omega]$, $\rho_1, \rho_2 > 0$.

Задачу (1)–(4) изучаем с помощью конструктивного метода [9] в конечномерной банаховой алгебре $B(n)$ непрерывных матриц-функций с нормой $\|T\|_c = \max_t \|T(t)\|$, где $\|\cdot\|$ – определенная норма матриц в этой алгебре, например, любая из норм, приведенных в [10, с. 21], $T \in (I, \mathbb{R}^{n \times n})$. Предлагаемая работа является развитием и обобщением [2–4].

Теорема. Пусть выполнены следующие условия:

$$1) \det A \neq 0 \quad (i=1,2), \quad (5)$$

$$2) \quad \gamma \left[\alpha \omega^2 (\alpha + \beta d) \rho + (\delta + \sigma + \sigma) \rho^2 + \delta \rho \rho + h \right] + \\ + \omega (\beta d \rho + (\delta + \sigma + \sigma) \rho^2 + \delta \rho \rho + h) \leq \rho, \quad (6)$$

$$\gamma \left[\alpha \omega^2 (\alpha + \beta d) \rho + (\mu + v + v) \rho^2 + \mu \rho \rho + h \right] + \\ + \omega (\beta d \rho + (\mu + v + v) \rho^2 + \mu \rho \rho + h) \leq \rho, \quad (7)$$

$$3) \quad q_{11} < 1, \det(E - Q) > 0, \quad (7)$$

где $E = \text{diag}(1, 1)$, $Q = (q_{ij})$.

Тогда задача (1)–(4) однозначно разрешима в области D .

Доказательство. Сначала сведем задачу (1)–(4) с помощью регуляризатора

$$\int_0^\omega A(\tau) Z(\tau) d\tau = \int_0^\omega A(\tau) d\tau \cdot Z(t) - \int_0^t \left(\int_0^\tau A(\sigma) d\sigma \right) dZ(\tau) + \int_t^\omega \left(\int_\tau^\omega A(\sigma) d\sigma \right) dZ(\tau),$$

где $A = \{A_1, A_2\}$, $Z = \{X, Y\}$, к эквивалентной интегральной задаче типа [2–4]

$$X(t) = \tilde{A}_1^{-1}(\omega) \left\{ \int_0^t \int_0^\tau A_1(\sigma) d\sigma \right\} G_1(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \\ - \int_0^\omega \left\{ \int_0^\omega A_1(\sigma) d\sigma \right\} G_1(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \\ - \int_0^\tau G_1(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \int_0^\tau A_1(\tau) X(\tau) d\tau \Big\}, \quad (8)$$

$$Y(t) = \tilde{A}_2^{-1}(\omega) \left\{ \int_0^t \int_0^\tau A_2(\sigma) d\sigma \right\} G_2(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \\ - \int_0^\omega \left\{ \int_0^\omega A_2(\sigma) d\sigma \right\} G_2(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \\ - \int_0^\tau G_2(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \int_0^\tau A_2(\tau) Y(\tau) d\tau \Big\}. \quad (9)$$

Запишем систему (8), (9) в операторном виде

$$X = \square_1(X, Y), \quad Y = \square_2(X, Y), \quad (10)$$

где через $\square_i (i=1,2)$ обозначены соответствующие интегральные операторы в (8), (9). Эти операторы действуют из C^1 на множестве $\{(X(t), Y(t)): \|X\|_C < \infty, \|Y\|_C < \infty\}$.

Для исследования разрешимости системы (10) воспользуемся модификацией [9, §3.4] обобщенного принципа Каччопполи – Банаха [11, с. 94] на множестве $D = \{(X(t), Y(t)): \|X\|_C \leq \rho_1, \|Y\|_C \leq \rho_2\}$ с использованием условий 2), 3) данной теоремы.

В работе [4] решение системы (10) строится классическим методом последовательных приближений (см., например, [12, с. 605])

$$X_{k+1} = \square_1(X_k, Y_k), \quad (11)$$

$$Y_{k+1} = \square_2(X_k, Y_k) \quad k=0,1,2,\dots, \quad (12)$$

где X_0, Y_0 – произвольные матричные функции класса $C^1[0, \omega]$, принадлежащие множеству D .

Однако решения, построенные по алгоритму (11), (12), не обязаны относиться к классу допустимых функций. Под допустимыми функциями понимаем функции из пространства C^1 , удовлетворяющие условиям (3), (4).

Для получения приближений в классе допустимых функций воспользуемся алгоритмом типа [4], который в дифференциальной форме имеет вид

$$\frac{dX_{k+1}}{dt} = G_1(t, X_k, Y_k), \quad (13)$$

$$\frac{dY_{k+1}}{dt} = G_2(t, X_k, Y_k), \quad (14)$$

$$X_{k+1}(0) = X_{k+1}(\omega), \quad (15)$$

$$Y_{k+1}(0) = Y_{k+1}(\omega), \quad k=0,1,2,\dots, \quad (16)$$

где в качестве начального приближения X_0, Y_0 приняты постоянные матрицы, определяемые на основе (13), (14) при $k=0$ из соответствующих условий (15), (16) для приближения $X_1(t), Y_1(t)$,

$$\int_0^\omega G_1(\tau, X_0, Y_0) d\tau = 0, \quad \int_0^\omega G_2(\tau, X_0, Y_0) d\tau = 0.$$

Используя приведенный регуляризатор, от (13)–(16) перейдем к соответствующим рекуррентным интегральным соотношениям

$$\begin{aligned} X_k(t) = & \tilde{A}_1^{-1}(\omega) \left\{ \int_0^t \int_0^\tau A_1(\sigma) d\sigma \right\} G_1(\tau, X_{k-1}(\tau), Y_{k-1}(\tau)) d\tau - \\ & - \int_0^\omega \left\{ \int_0^\tau A_1(\sigma) d\sigma \right\} G_1(\tau, X_{k-1}(\tau), Y_{k-1}(\tau)) d\tau - \\ & - \int_0^\omega \left[G_1 \left(\tau, X_{k-1}(\tau), Y_{k-1}(\tau) \right) - A_1 X_{k-1}(\tau) \right] d\tau \Big\}, \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_k(t) = & \tilde{A}_2^{-1}(\omega) \left\{ \int_0^t \int_0^\tau A_2(\sigma) d\sigma \right\} G_2(\tau, X_{k-1}(\tau), Y_{k-1}(\tau)) d\tau - \\ & - \int_0^\omega \left\{ \int_0^\tau A_2(\sigma) d\sigma \right\} G_2(\tau, X_{k-1}(\tau), Y_{k-1}(\tau)) d\tau - \\ & - \int_0^\omega \left[G_2 \left(\tau, X_{k-1}(\tau), Y_{k-1}(\tau) \right) - A_2 Y_{k-1}(\tau) \right] d\tau \Big\}, \quad k=1,2,\dots \quad (18) \end{aligned}$$

Исследованы вопросы сходимости, скорости сходимости алгоритма (17), (18), при этом получена оценка

$$Z_i \leq (E - H)^{-1} H^i Z_0, \quad i=0,1,2,\dots, \quad (19)$$

где

$$Z_i = \begin{pmatrix} \|X_i - X_0\|_C \\ \|Y_i - Y_0\|_C \end{pmatrix}, \quad Z_0 = \begin{pmatrix} \|X_1 - X_0\|_C \\ \|Y_1 - Y_0\|_C \end{pmatrix}, \quad H = (E - Q)^{-1} (Q - Q), \quad Q = (q_{ij});$$

здесь $q_{11} = \gamma_1 \omega (\beta_1 + 2\delta_1 \rho_1 + \delta_2 \rho_2)$, $q_{12} = \gamma_1 \omega \delta_2 \rho_1$, $q_{21} = \gamma_2 \omega \mu_1 \rho_2$, $q_{22} = \gamma_2 \omega (\beta_2 + \mu_1 \rho_1 + 2\mu_2 \rho_2)$.

Список использованных источников и литературы

1. *Анисович, В. В.* Об одном подходе к решению задач оптимального управления / В. В. Анисович, Б. И. Крюков, В. М. Мадорский // Доклады АН СССР, 1980. – Т. 251, № 2. – С. 265–268.
2. *Лаптинский, В. Н.* Конструктивные методы построения решения периодической краевой задачи для системы матричных дифференциальных уравнений типа Риккати / В. Н. Лаптинский, Д. В. Роголев // Дифференциальные уравнения, 2011. – Т. 47, № 10. – С. 1412–1420.
3. *Роголев, Д. В.* К разрешимости периодической краевой задачи для системы матричных дифференциальных уравнений Риккати // Актуальные проблемы науки и техники: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Сарапул, 20–22 мая 2021 г. / Минобрнауки Рос. Федерации. Сарапульский политехн. ин-т (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2021. – С. 21–26.
4. *Роголев, Д. В.* К разрешимости и построению решения периодической краевой задачи для системы матричных дифференциальных уравнений Риккати / Д. В. Роголев // Актуальные проблемы науки и техники: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Сарапул, 19–21 мая 2022 г. / Минобрнауки Рос. Федерации. Сарапульский политехн. ин-т (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 104–108.
5. *Jódar, L.* Explicit solutions of Riccati equations appearing in differential games / L. Jódar // Applied Mathematics Letters, 1990. – Vol. 3. №. 4. – P. 9–12.
6. *Зубов, В. И.* Лекции по теории управления / В. И. Зубов. – Москва : Наука, 1975. – 496 с.
7. *Егоров, А. И.* Уравнения Риккати. – Москва : Физматлит, 2001. – 320 с.
8. *Ларин, В. Б.* Управление шагающими аппаратами. – Киев : Наук. думка, 1980. – 168 с.
9. *Лаптинский, В. Н.* Конструктивный анализ управляемых колебательных систем. – Минск : ИМ НАН Беларуси, 1998. – 300 с.
10. *Демидович, Б. П.* Лекции по математической теории устойчивости. – Москва : Наука, 1967. – 472 с.
11. *Красносельский, М. А.* Приближенное решение операторных уравнений / М. А. Красносельский, Г. М. Вайникко, П. П. Забрейко и др. – Москва : Наука, 1969. – 455 с.
12. *Канторович, Л. В.* Функциональный анализ / Л. В. Канторович, Г. П. Акилов. – Москва : Наука, 1977. – 744 с.

Сведения об авторе

Дмитрий Владимирович Роголев, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилёв), d-rogolev@tut.by

Коэффициент гидравлического сопротивления вихревой контактной ступени ректификационной колонны

М. М. Баяндина, А. В. Кустов

Представлены результаты исследований коэффициента гидравлического сопротивления вихревых контактных ступеней ректификационной колонны и получены зависимости для его расчета.

Ключевые слова: ректификация, контактная ступень, гидравлическое сопротивление, коэффициент гидравлического сопротивления.

Coefficient of hydraulic resistance of the vortex contact stage of the distillation column

M. M. Bayandina, A.V. Kustov

The results of studies of the coefficient hydraulic resistance of the vortex contact stages of the distillation column are presented and dependences for its calculation are obtained.

Keywords: rectification, contact stage, hydraulic resistance, hydraulic resistance coefficient.

Ректификация широко используется: в технологиях комплексной переработки древесины; в лесохимической промышленности при получении продуктов потребления; при восстановлении экстракционных растворов в процессах извлечения биологически активных веществ из растительного сырья; в технологии химической переработки древесины при производстве этанола; при переработке нарастающих природных отходов газификацией и использования синтез-газа для получения биополимера на стадии регенерации растворителей, где также востребованы высокоэффективные и производительные ректификационные колонны. В основном ректификации подлежат многокомпонентные смеси, как правило азеотропные, имеющие близкую температуру кипения, что обуславливает использование для их разделения многоступенчатых ректификационных колонн.

Анализ возможных путей интенсификации массопередачи в системе газ-жидкость показывает, что использование для проведения этих процессов конструкций барботажных аппаратов не обеспечивает существенного повышения производительности и эффективности. В связи с этим применение центробежного ускорения является наиболее простым способом интенсификации массообмена. Вращение потока способствует дроблению пузырьков пара на ступени и предотвращает капельный унос за счет действия инерции. При этом вихревые контактные ступени обладают низким гидравлическим сопротивлением, что позволяет вести процесс разделения при вакууме, а также уменьшить потребление электроэнергии.

В настоящее время наметилась тенденция использования вихревых контактных теплообменных ступеней для проведения процессов абсорбции и ректификации в технологических линиях, в частности по переработке растительного сырья. Вихревые колонны не уступают по своим массообменным параметрам самым эффективным аппаратам насадочного типа, однако более производительны, менее металлоемки и масштабируемы. А также имеют сравнительно не высокое гидравлическое сопротивление, что позволяет использовать их для ведения процесса под вакуумом.

Гидравлическое сопротивление является важной гидродинамической характеристикой контактных ступеней, которая отображает затраты энергии газового потока на проведение процесса массообмена и обуславливает область его применения на практике. Знание величины гидравлических потерь в аппарате необходимо также при расчете схем технологической обвязки аппарата. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе имеются многочисленные данные по исследованию закономерностей изменения гидравлического сопротивления вихревых аппаратов от режимных и конструктивных параметров [2] с различными типами завихрителей.

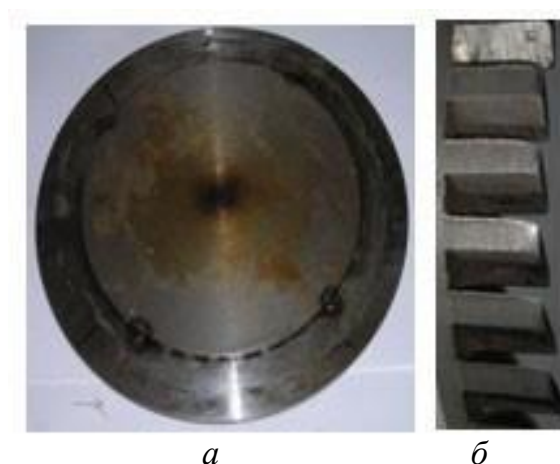


Рис. 1. Фотографии исследованных завихрителей:

а – тангенциальный завихритель; *б* – кромки тангенциального завихрителя

Общее сопротивление контактной ректификационной ступени без учета влияния крутки газа на ΔP вышележащей ступени можно представить в виде

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m. \quad (1)$$

Сопротивление сухой тарелки обычно представляют в виде

$$\Delta P_c = \xi \frac{\rho_g u^2}{2} \quad (2)$$

и ступени со слоем жидкости

$$\Delta P_m = \rho g H (1 - \phi), \quad (3)$$

где ξ – коэффициент сопротивления сухой ступени; u – среднерасходная скорость газа на выходе из каналов; ρ_g – плотность газа.

Экспериментальные значения коэффициента сопротивления для завихрителей с разным количеством щелей и величиной зазора для прохода газа (пара) пред-

ставлены на рисунке 2 для завихрителей с 36 щелями и 18 щелями в зависимости от величины зазора для прохода газа (пара).

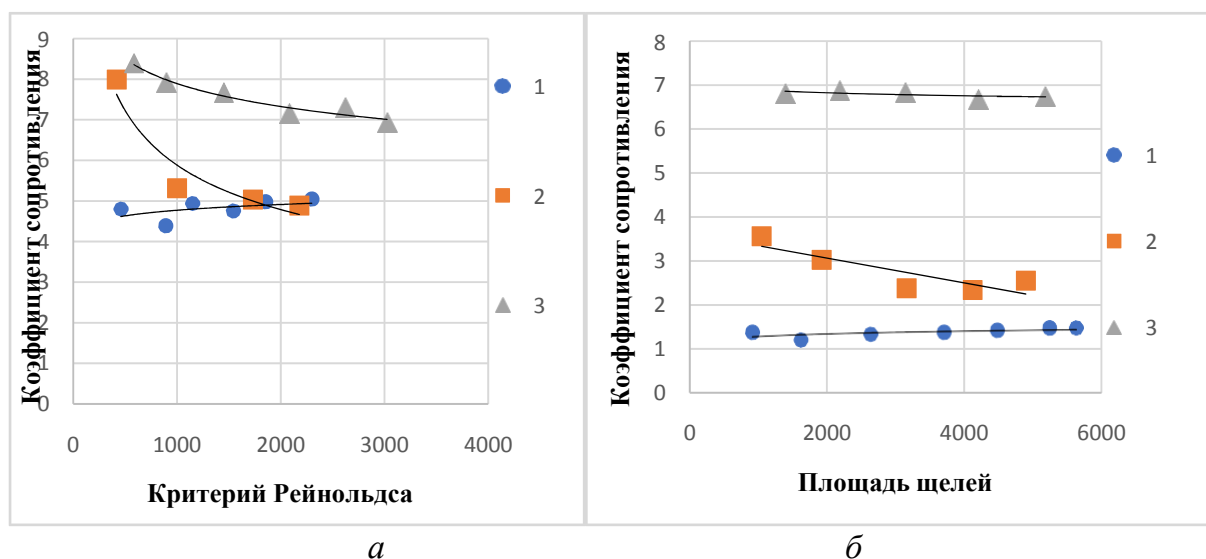


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления тангенциальной контактной ступени от критерия Рейнольдса: а – ступень с 36 щелями; б – ступень с 18 щелями; 1 – зазор 0,7 мм; 2 – зазор 1 мм; 3 – зазор 2 мм

Как видно, при величине критерия Рейнольдса более 1500 наблюдается автомодельный режим, при котором значение коэффициента гидравлического сопротивления близок прямой линии.

В автомодельном режиме влияние на коэффициент гидравлического сопротивления зависит только от суммарной площади каналов для прохода газа. На рис. 3 показана зависимость коэффициента сопротивления от площади каналов.

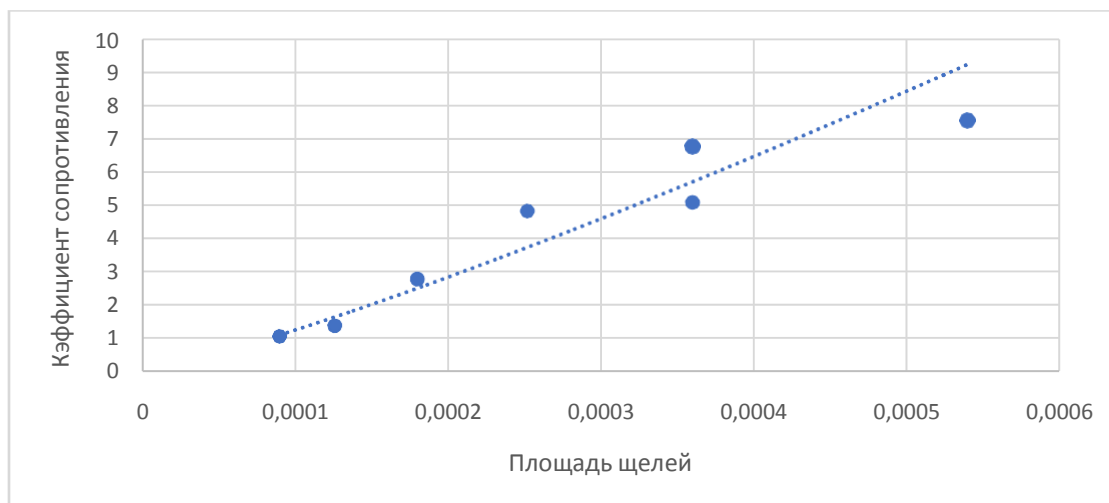


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления от величины площади щелей для автомодельного режима течения газового (парового) потока

Обработка экспериментальных данных позволила получить зависимости для расчета коэффициента сопротивления сухой контактной ступени (рис. 3) при $Re > 1500$ представлен в виде

$$\xi = 71195 \times f^{1,2}, \quad (5)$$

где f – суммарная площадь каналов завихрителя, м^2 .

Расчет по представленной зависимости позволяет получить величину коэффициента сопротивления с погрешностью порядка 4–6 % от величины экспериментально полученного коэффициента.

Список использованных источников и литературы

1. Войнов, Н. А. Получение безводного этанола при ректификации под вакуумом / Н. А. Войнов, А. В. Кустов, Н. А. Николаев // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – № 3-4. – С. 373–378.
2. Кустов, А. В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработке растительного сырья : автореф. ... дис. канд. техн. наук; 05.21.03. – Красноярск : СибГТУ, 2010.
3. Войнов, Н. А. Гидродинамика и массообмен в вихревой ректификационной колонне / Н. А. Войнов, Н. А. Николаев, А. В. Кустов // Химическая промышленность. – 2008. – Т. 85, № 8. – С. 413–419.
4. Вихревые ректификационные ступени с низким гидравлическим сопротивлением / А. В. Кустов, П. С. Щастовский, Я. С. Гончарова, Ю. Д. Алашкевич, Ю. Т. Сергиякова, Е. С. Васильченко, А. А. Карелина // Химическая промышленность сегодня. – 2017. – № 1. – С. 34–41.
5. Исследование вихревых ректификационных ступеней / А. В. Кустов, Н. А. Артищева, В. Г. Межов, Ю. Д. Алашкевич // Химия растительного сырья. – 2016. – № 3. – С. 125–134.

Сведения об авторах

Мария Михайловна Баяндина, студент группы БПХ22-02, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (Россия, г. Красноярск), bayandinamaria@yandex.ru

Александр Владимирович Кустов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основ конструирования машин», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (Россия, г. Красноярск), alexkust@rambler.ru

К решению задачи о тепловом пограничном слое в ламинарном течении

В. Н. Лаптинский, А. А. Романенко

Выполнены расчеты толщины теплового пограничного слоя при ламинарном обтекании плоской нагретой пластины потоком охладителя, основанные как на точных численных, так и на приближенных решениях гидродинамического уравнения. Проведен сравнительный анализ погрешностей полученных результатов.

Ключевые слова: автомодельная задача, ламинарное течение, динамический и тепловой пограничные слои.

To the solution of the problem of the thermal boundary layer in laminar flow

V. N. Laptinskii, A. A. Romanenko

Calculations of the thickness of the thermal boundary layer in the laminar flow around a flat heated plate by a coolant flow are performed, based on both exact numerical and approximate solutions of the hydrodynamic equation. A comparative analysis of the errors in the obtained results was carried out.

Keywords: self-similar problem, laminar flow, dynamic and thermal boundary layers.

Решение задачи о тепловом пограничном слое в ламинарном течении находится из системы соотношений

$$f''' + \frac{m+1}{2} f f'' + m(1 - f'^2) = 0, \quad (1)$$

$$\vartheta'' + \text{Pr} \left[\frac{m+1}{2} f \vartheta' - \gamma f' (\vartheta - 1) \right] = 0, \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$f(0) = f'(0) = 0, \quad f'(\infty) = 1, \quad (3)$$

$$\vartheta(0) = 0, \quad \vartheta(\infty) = 1, \quad (4)$$

в которых приняты обозначения в основном из [1, 2].

За толщину теплового пограничного слоя принимается расстояние от стенки пластины, при котором безразмерная температура $\vartheta = (T_{\text{ст}} - T) / (T_{\text{ст}} - T_{\infty})$ принимает значение $\vartheta = 0,99$ и описывается формулой [1]

$$\delta_T(x) = \eta_T(m) \left(\frac{\nu}{C} \right)^{\frac{1}{2}} x^{\frac{1-m}{2}}, \quad (5)$$

где $\eta_r(m)$ – значение безразмерной переменной η , определяемое в соответствии с принятой точностью $\vartheta \approx 0.99$.

Рассмотрим случай, когда температура стенки $T_{\text{ст}} = T_{\infty} + a x^{\gamma}$ постоянная ($\gamma = 0$); тогда уравнение (2) примет вид

$$\vartheta'' + \text{Pr} \frac{m+1}{2} f \vartheta' = 0. \quad (6)$$

Решение краевой задачи для уравнения (6) с условиями (4) имеет вид

$$\vartheta = \int_0^{\eta} \exp \left[-\text{Pr} \cdot \frac{m+1}{2} \int_0^{\xi} f(z) dz \right] d\xi / \int_0^{\infty} \exp \left[-\text{Pr} \cdot \frac{m+1}{2} \int_0^{\xi} f(z) dz \right] d\xi. \quad (7)$$

На основе соотношения (7) изучим решение задачи (2), (4) при различных значениях параметра m и с различными числами Прандтля Pr . При этом используются как точные численные решения задачи (1), (3), так и приближенные аналитические выражения для функции $f(z) \approx f(z, m)$. В работах [3–5] приведены приближенные решения задачи (1), (2), основанные на итерационном алгоритме для $0 \leq m \leq 1$, а также более простые, но эффективные (в смысле простоты и точности) приближенные решения, основанные на различных разложениях $f(z)$ в ряд Маклорена, но для $m \in [0, 1/3]$.

Приближенные аналитические методы решения задач (особенно задач, содержащих несколько параметров) предпочтительнее численных с точки зрения качественного анализа и даже вычислений. В отличие от численных, аналитические методы решения могут служить основой для получения инженерных формул при решении соответствующих прикладных задач.

В работах [3, 4] предложен и развит метод построения приближенных аналитических решений задачи (1), (3), согласно которому функция $f(\eta, m)$ отыскивается в виде

$$f(\eta, m) = \int_0^{\eta} \left(\int_0^{\tau} e^{-\int_0^{\sigma} \varphi(s) ds} d\sigma \right) d\tau / \int_0^{\infty} e^{-\int_0^{\sigma} \varphi(\sigma) d\sigma} d\tau, \quad 0 \leq \eta < \infty. \quad (8)$$

Подход основан на использовании вспомогательной функции $\varphi = \varphi(\eta, m)$, представляющей собой решение задачи [5]

$$\frac{d\varphi}{d\eta} = \varphi^2 - a f \varphi + (a - 2b) f', \quad (9)$$

$$\varphi(0) = \frac{b}{\lambda}, \quad (10)$$

$$\lambda \int_0^{\infty} e^{-\int_0^{\sigma} \varphi(\sigma) d\sigma} d\tau - 1 = 0, \quad (11)$$

где $a = (m+1)/2$, $b = m$, $\lambda = f''(0, m)$.

Представляя решение (9), т. е. функцию $\varphi(\eta, m)$ в виде ряда Маклорена по переменной η , методом последовательного дифференцирования с учетом начальных условий в (3), (10) на основании (8) для функции $f(\eta, m)$ получаем приближение [6]

$$f(\eta, m) = \lambda \int_0^\infty (\eta - \tau) \exp \left\{ - \left(\frac{b}{\lambda} \tau + \left(\frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left(2 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} \right) \right\} d\tau, \quad (12)$$

где значения λ вычисляются из уравнения

$$\lambda \int_0^\infty \exp \left\{ - \left(\frac{b}{\lambda} \tau + \left(\frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left(2 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} \right) \right\} d\tau - 1 = 0, \quad (13)$$

достаточно простое и обеспечивает точность до 3 % для функции $f(\eta, m)$ и ее первых двух производных. Недостатком этого приближения является неполнота промежутка изменения m : $m \in [0, 1/3)$.

В работе [7] этот недостаток устранен построением комплексного приближения для $f(\eta, m)$, которое применимо для $0 \leq m \leq 1$; оно имеет вид

$$f(\eta, m) = \begin{cases} \lambda \int_0^\infty (\eta - \tau) \exp \left\{ - \left(\frac{b}{\lambda} \tau + \left(\frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left(2 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} \right) \right\} d\tau, & m \in [0, 1/3); \\ \lambda \int_0^\infty (\eta - \tau) \exp \left\{ - \left(\frac{b}{\lambda} \tau + \left(\frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left(2 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} + \left(6 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^4 - 2b^2 \right) \frac{\tau^4}{4!} \right) \right\} d\tau, & m \in [1/3, 1]. \end{cases} \quad (14)$$

При этом для $m \in [0, 1/3)$ значения λ вычисляются из уравнения (13), а для $m \in [1/3, 1]$ – из уравнения

$$\lambda \int_0^\infty \exp \left\{ - \left(\frac{b}{\lambda} \tau + \left(\frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left(2 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} + \left(6 \left(\frac{b}{\lambda} \right)^4 - 2b^2 \right) \frac{\tau^4}{4!} \right) \right\} d\tau - 1 = 0. \quad (15)$$

В (13), (15) вместо ∞ принято $\eta^* = 8.8$ [1].

Комплексное приближение (12)–(15) вполне приемлемо, поскольку позволяет строить решение на всем промежутке $0 \leq m \leq 1$, при этом с точностью до 3 % для $m \in [0, 1/3]$ и до 1 % – для $m \in [1/3, 1]$.

В таблице приведены результаты расчетов величины $\eta_T = \eta_T(m_i)$ с использованием точных численных решений задачи (1), (3) и приближенных решений основанных на приближении (12) – (15) для постоянной температуры стенки $T_{ст} = \text{const} = 100^\circ\text{C}$ ($Pr = 1,75$) и различных значений параметра m . Параметр m

связан с углом φ атаки потока на пластину соотношением $m = \frac{\varphi}{\pi - \varphi}$
 $\left(0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq m \leq 1 \right).$

Значения величины $\eta_T = \eta_T(m_i)$ для различных углов атаки

φ	$m = \frac{\varphi}{\pi - \varphi}$	$\eta_T(m_i)$		
		На основе численного решения (1), (3)	На основе приближения (12) – (15)	Относительные погрешности (%)
0	0	3.989	3.951	0.95
0.05π	0.0526...	3.752	3.725	0.72
0.1π	0.111...	3.559	3.540	0.53
0.15π	0.176...	3.392	3.378	0.41
0.2π	0.25	3.238	3.229	0.28
0.245π	0.324...	3.108	3.102	0.19
0.25π	0.333...	3.094	3.090	0.13
0.3π	0.428...	2.955	2.950	0.17
0.35π	0.538...	2.820	2.815	0.18
0.4π	0.666...	2.686	2.681	0.19
0.45π	0.818...	2.552	2.547	0.20
0.5π	1.0	2.416	2.410	0.24

Из таблицы видно, что относительные погрешности приближенных решений не превышают одного процента.

Список использованных источников и литературы

1. Теория тепломассообмена : учебник для вузов / С. И. Исаев, И. А. Кожин, В. И. Кофанов и др. ; под ред. А. И. Леонтьева. – Москва : Высш. шк., 1979. – 495 с.
2. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя. – Москва : Наука, 1974. – 712 с.
3. Лаптинский, В. Н. Конструктивный метод анализа задачи о ламинарном пограничном слое и его применение к расчету охлаждающей способности кристаллизаторов при непрерывном литье / В. Н. Лаптинский, А. А. Романенко / Ч. IV / Препринт. – Могилев : Ин-т технол. металлов НАН Беларуси, 2010. – № 20. – 25 с.

4. *Лаптинский, В. Н.* Конструктивный метод анализа задачи о ламинарном пограничном слое и его применение к расчету охлаждающей способности кристаллизаторов при непрерывном литье / В. Н. Лаптинский, А. А. Романенко / Ч. IV / Препринт. – Могилев : Ин-т технол. металлов НАН Беларуси, 2011. – № 25. – 40 с.

5. *Лаптинский, В. Н.* Об одном аналитическом методе решения задачи о динамическом ламинарном пограничном слое в автомоделном случае // Ученые записки ЦАГИ. – 2013. – Т. XLIV, № 5. – С. 72–93.

6. *Лаптинский, В. Н.* Об одном аналитическом методе построения решения задачи о динамическом ламинарном пограничном слое в автомоделном случае / В. Н. Лаптинский, А. А. Романенко // Актуальные проблемы науки и техники. Материалы междунар. науч.-техн. конф. Сарапул, 22–24 мая 2021г. / Минобрнауки Рос. Федерации. Сарапульский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». – Сарапул : СПИ, 2021. – С. 86–90.

7. *Лаптинский, В. Н.* Об одном аналитическом методе построения решения задачи о динамическом ламинарном пограничном слое в автомоделном случае / В. Н. Лаптинский, А. А. Романенко // Актуальные проблемы науки и техники. Материалы междунар. науч.-техн. конф. Сарапул, 19–21 мая 2022 г. / Минобрнауки Рос. Федерации. Сарапульский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». – Сарапул : СПИ, 2022. – С. 55–59.

Сведения об авторах

Валерий Николаевич Лаптинский, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Высшая математика», Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилев), lavani@tut.by

Алексей Андреевич Романенко, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилев), romanenko1956@gmail.com

Конструктивный анализ многоточечной краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова (правосторонняя регуляризация)

А. Н. Бондарев

Установлены коэффициентные достаточные условия существования и единственности решения многоточечной краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова на основе правосторонней регуляризации и соответствующей декомпозиции коэффициентов. Для построения решения используется алгоритм с вычислительной схемой классического метода последовательных приближений.

Ключевые слова: матричное уравнение Ляпунова, многоточечная краевая задача, однозначная разрешимость, алгоритм, сходимость.

Constructive analysis of the multipoint boundary value problem for the Lyapunov matrix equation (right-sided regularization)

A. N. Bondarev

Coefficient sufficient conditions for the existence and uniqueness of the solution to the multipoint boundary value problem for the Lyapunov matrix equation are established on the basis of right-sided regularization and the corresponding decomposition of the coefficients. To construct the solution, an algorithm with the computational scheme of the classical method of successive approximations is used.

Keywords: lyapunov matrix equation, multipoint boundary value problem, unique solvability, algorithm, convergence.

Объектом исследования является краевая задача

$$\frac{dX}{dt} = A_1(t)XA_2(t) + P_1(t)XP_2(t) + Q_1(t)XQ_2(t) + XB(t) + F(t), \quad X \in \mathbb{R}^{n \times m}, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^k M_i X(t_i) = 0, \quad 0 = t_1 < t_2 < \dots < t_k = \omega, \quad (2)$$

где $A_j(t)$, $P_j(t)$, $Q_j(t)$, $B(t)$, $F(t)$ – матрицы класса $C[0, \omega]$ соответствующих размерностей, M_i – заданные постоянные $(n \times n)$ -матрицы, $j = 1, 2$.

В предлагаемой работе, являющейся продолжением, развитием и обобщением [1–3], задача (1), (2) исследуется в банаховом пространстве C непрерывных матриц-функций с нормой $\|X\|_C = \max_{t \in [0, \omega]} \|X(t)\|$ на основе декомпозиции (расщепления) матрицы $B(t)$ в виде [1, 3]

$$B(t) = B_1(t) + B_2(t), \quad (3)$$

где матрицы $B_1(t)$, $B_2(t)$ выбираются по определенной методике, например согласно [4, гл. 1]. Универсальным является расщепление, когда в качестве $B_1(t)$ принимается главная диагональ матрицы $B(t)$.

Используемая декомпозиция (3) для определенного типа краевых задач может быть более эффективной, чем левосторонняя. Это относится и к одновременной декомпозиции матриц $A(t)$, $B(t)$. Выбор декомпозиции зависит не только от алгебраических, но и от функциональных свойств этих матриц.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \gamma &= \|\Phi^{-1}\|, \quad m_i = \|M_i\|, \quad \alpha_j = \max_t \|A_j(t)\|, \quad \beta_2 = \max_t \|B_2(t)\|, \quad h = \max_t \|F(t)\|, \\ \delta_j &= \max_t \|P_j(t)\|, \quad \sigma_j = \max_t \|Q_j(t)\|, \quad \mu_1 = \max_t \|V(t)\|, \quad \mu_2 = \max_t \|V^{-1}(t)\|, \\ v_i &= \|V_i\|, \quad q = \gamma \mu_1 \mu_2 (\alpha_1 \alpha_2 + \delta_1 \delta_2 + \sigma_1 \sigma_2 + \beta_2) \omega \sum_{i=1}^k m_i v_i, \quad N = \gamma \mu_1 \mu_2 \omega h \sum_{i=1}^k m_i v_i, \end{aligned}$$

где $t \in [0, \omega]$, $\|\cdot\|$ – определенная норма матриц, например, любая из норм, приведенных в [5, с. 21], Φ – линейный матричный оператор типа [6],

$\Phi Y \equiv \sum_{i=1}^k M_i Y V_i$; $V_i = V(t_i)$, $V(t)$ – фундаментальная матрица уравнения

$$\frac{dV}{dt} = VB_1(t). \quad (4)$$

Теорема. Пусть оператор Φ однозначно обратим. Тогда при выполнении условия $q < 1$ задача (1), (2) однозначно разрешима; ее решение $X(t)$ представимо как предел равномерно сходящейся последовательности матричных функций, определяемых рекуррентным интегральным соотношением и удовлетворяющих условию (2), при этом справедлива оценка

$$\|X\|_C \leq \frac{N}{1-q}. \quad (5)$$

Доказательство. С помощью методики, используемой в [1, 3], на основе (4) получим интегральную задачу

$$\begin{aligned} X(t) = & \left(\Phi^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k M_i \int_{t_i} [A_1(\tau) X(\tau) A_2(\tau) + P_1(\tau) X(\tau) P_2(\tau) + Q_1(\tau) X(\tau) Q_2(\tau) + \right. \right. \\ & \left. \left. + X(\tau) B(\tau) + F(\tau)] V^{-1}(\tau) d\tau V \right\} \right) V(t), \end{aligned} \quad (6)$$

эквивалентную (1), (2).

Уравнение (6) относится к типу уравнений, рассмотренных в [1–3] (см. также [6]). Оператор Φ встречается при изучении краевых задач для многомерных дифференциальных систем; в случае двухточечных задач он сравнительно хорошо изучен. Для оператора Φ^{-1} в научной литературе в общем случае нет эффективного представления. Формальные способы построения Φ^{-1} предложены в работе [6].

Анализ уравнения (6) выполним на основе принципа сжимающих отображений [7], используя классический метод последовательных приближений

$$X_p(t) = \left(\Phi^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k M_{t_i} \left[A(\tau) X_{p-1}(\tau) A_2(\tau) + P_1(\tau) X_{p-1}(\tau) P_2(\tau) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + Q_1(\tau) X_{p-1}(\tau) Q_2(\tau) + X_{p-1}(\tau) B_2(\tau) + F(\tau) \right] V^{-1}(\tau) d\tau \right\} \right) V(t), \quad p = 1, 2, \dots, \quad (7)$$

где в качестве начального приближения принимаем произвольную матрицу $X_0(t) \in C([0, \omega], \mathbb{R}^{n \times m})$. Легко видеть, что алгоритм (7) определяет последовательность $\{X_p(t)\}_1^\infty \subset C^1([0, \omega], \mathbb{R}^{n \times m})$.

Несомненным достоинством каждого алгоритма такого типа является принадлежность классу допустимых функций всех последовательных приближений. Под допустимыми функциями понимаем функции класса $C^1([0, \omega], \mathbb{R}^{n \times m})$, удовлетворяющие условию (2).

Докажем, что функции $X_p(t)$ являются допустимыми. На основе (7) получим последовательно

$$\begin{aligned} \frac{dX_p(t)}{dt} &= X_p(t) B_1(t) + \left(\Phi^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k M_{t_i} \left[A_1(t) X_{p-1}(t) A_2(t) + P_1(t) X_{p-1}(t) P_2(t) + \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + Q_1(t) X_{p-1}(t) Q_2(t) + X_{p-1}(t) B_2(t) + F(t) \right] V^{-1}(t) V \right\} \right) V(t) = \\ &= X_p(t) B_1(t) + (\Phi^{-1} \{ \Phi [A_1(t) X_{p-1}(t) A_2(t) + P_1(t) X_{p-1}(t) P_2(t) + \\ &\quad + Q_1(t) X_{p-1}(t) Q_2(t) + X_{p-1}(t) B_2(t) + F(t)] V^{-1}(t) \}) V(t) = \\ &= X_p(t) B_1(t) + [A_1(t) X_{p-1}(t) A_2(t) + P_1(t) X_{p-1}(t) P_2(t) + \\ &\quad + Q_1(t) X_{p-1}(t) Q_2(t) + X_{p-1}(t) B_2(t) + F(t)] V^{-1}(t) V(t) = \\ &= X_p(t) B_1(t) + [A_1(t) X_{p-1}(t) A_2(t) + P_1(t) X_{p-1}(t) P_2(t) + \\ &\quad + Q_1(t) X_{p-1}(t) Q_2(t) + X_{p-1}(t) B_2(t) + F(t)]. \end{aligned}$$

Стало быть, имеем соотношение

$$\frac{dX_p(t)}{dt} = X_p(t) B_1(t) + [A_1(t) X_{p-1}(t) A_2(t) + P_1(t) X_{p-1}(t) P_2(t) + \\ + Q_1(t) X_{p-1}(t) Q_2(t) + X_{p-1}(t) B_2(t) + F(t)]. \quad (8)$$

Используя (8), получим

$$[A_1(t) X_{p-1}(t) A_2(t) + P_1(t) X_{p-1}(t) P_2(t) + Q_1(t) X_{p-1}(t) Q_2(t) + X_{p-1}(t) B_2(t) + F(t)] dt = \\ = dX_p(t) - X_p(t) B_1(t) dt. \quad (9)$$

На основе (9) запишем формулу (7) в следующем виде:

$$X_p(t) = \left(\Phi^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k M_{t_i} \int_{t_i}^t [dX_p(\tau) - X_p(\tau) B_1(\tau) d\tau] V^{-1}(\tau) V \right\} \right) V(t). \quad (10)$$

В результате интегрирования по частям в (10) и последующих упрощений получим

$$\sum_{i=1}^k M_i X_p(t_i) = 0.$$

Таким образом, все члены последовательности $\{X_p(t)\}_1^\infty$ относятся к классу допустимых функций.

Для изучения сходимости построенной последовательности будем использовать известный признак (см., например, [7, 8]), согласно которому рассматриваем ряд

$$X_0(t) + (X_1(t) - X_0(t)) + \dots + (X_p(t) - X_{p-1}(t)) + \dots \quad (11)$$

Равномерную сходимость по $t \in [0, \omega]$ ряда (11) докажем на основе построения соответствующего мажорантного сходящегося числового ряда.

Из (7) имеем

$$X_{p+1}(t) - X_p(t) = L(X_p) - L(X_{p-1}), \quad p = 1, 2, \dots, \quad (12)$$

где

$$L(Y) = \left(\Phi^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k M_i \int_{t_i}^t [A_1(\tau)Y(\tau)A_2(\tau) + P_1(\tau)Y(\tau)P_2(\tau) + Q_1(\tau)Y(\tau)Q_2(\tau) + Y(\tau)B(\tau) + F(\tau)]V^{-1}(\tau)d\tau V \right\} \right) V(t).$$

Выполнив оценки по норме в (12), получим рекуррентную оценку типа [1]

$$\|X_{p+1} - X_p\|_C \leq q \|X_p - X_{p-1}\|_C, \quad p = 1, 2, \dots \quad (13)$$

Используя (13), имеем явную оценку

$$\|X_p - X_{p-1}\|_C \leq q^p \|X_1 - X_0\|_C, \quad p = 1, 2, \dots, \quad (14)$$

при этом

$$\|X_1 - X_0\|_C = \|L(X_0) - X_0\|_C. \quad (15)$$

Для выбора начального приближения X_0 не существует универсальных методик. В каждой задаче это осуществляется индивидуально на основе анализа правой части (15).

Используя (14), нетрудно установить с помощью соответствующей методики (например, [7, 8]), что ряд (11), а значит и последовательность $\{X_r\}_0^\infty$, сходится равномерно по $t \in [0, \omega]$ к решению интегрального уравнения (6), при этом справедлива оценка

$$\|X - X_r\|_C \leq \frac{q^r}{1-q} \|X_1 - X_0\|_C, \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (16) \quad (16)$$

На основе (16) имеем оценку области локализации решения $X(t)$, определяемую согласно алгоритму (7),

$$\|X\|_C \leq \|X_0\|_C + \frac{\|X_1 - X_0\|_C}{1-q}. \quad (17)$$

Грубую, но явную, оценку для $\|X_1 - X_0\|_C$ можно получить на основе (15), поскольку

$$\|L(X_0) - X_0\|_C \leq q \|X_0\|_C + N + \|X_0\|_C = (1+q) \|X_0\|_C + N.$$

Очевидно, приближение $X_0(t) \equiv 0$ существенно упрощает не только вычисление приближений по алгоритму (7), но и оценки (5), (16), (17), при этом

$$\|X_1\|_C = \|L(0)\|_C.$$

Выведем оценку для $\|L(0)\|_C$:

$$\begin{aligned} \|L(0)\|_C &= \left\| \Phi^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k M \int_t^t F(\tau) V^{-1}(\tau) d\tau V \right\} V(t) \right\| \leq \\ &\leq \Phi^{-1} \sum_{i=1}^k \|M\| \|V\|_0 \int_0^t \|F(\tau) V^{-1}(\tau)\| d\tau \|V(t)\| \leq \gamma \sum_{i=1}^k m \nu \mu \mu \omega h = N. \end{aligned} \quad (18)$$

Получением оценки (18) доказательство теоремы завершено.

Список использованных источников и литературы

1. Бондарев, А. Н. Анализ многоточечной краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова // Актуальные проблемы науки и техники : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Сарапул, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 11–16.
2. Бондарев, А. Н. Многоточечная краевая задача для уравнения Ляпунова в случае слабого вырождения краевых условий / А. Н. Бондарев, В. Н. Лаптинский // Дифференциальные уравнения. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 423–427.
3. Бондарев, А. Н. Конструктивный анализ многоточечной краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова на основе правосторонней декомпозиции // Весн. Магілёўскага дзярж. ўн-та імя А. А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навукі (матэматыка, фізіка, біялогія). – 2018. – № 2 (52). – С. 33–44.
4. Лаптинский, В. Н. Конструктивный анализ управляемых колебательных систем. – Минск : ИМ НАН Беларуси, 1998. – 300 с.
5. Демидович, Б. П. Лекции по математической теории устойчивости / Б. П. Демидович. – Москва : Наука, 1967. – 472 с.
6. Murty, K. N. Two (multi) point nonlinear Lyapunov systems – existence and uniqueness / K. N. Murty, G. W. Howell, S. Sivasundaram // Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1992. – Vol. 167. – P. 505–515.
7. Канторович, Л. В. Функциональный анализ / Л. В. Канторович, Г. П. Акилов. – Москва : Наука, 1977. – 744 с.
8. Бибииков, Ю. Н. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений / Ю. Н. Бибииков. – Москва : Высш. шк., 1991. – 303 с.

Сведения об авторе

Александр Николаевич Бондарев, старший преподаватель кафедры «Высшая математика», Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилёв), alex-bondarev@tut.by

**К анализу разрешимости и построению решения
краевой задачи Валле-Пуссена
для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка**

А. И. Кашпар

С помощью метода регуляризации выведены достаточные условия существования и единственности решения задачи Валле-Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка. Предложен итерационный алгоритм построения решения с вычислительной схемой классического метода последовательных приближений.

Ключевые слова: матричное дифференциальное уравнение, краевая задача Валле-Пуссена, однозначная разрешимость, алгоритм построения решения.

**On the analysis of solvability and the construction of a solution
to the boundary problem de la Vallée Poussin for a nonlinear matrix
equation Lyapunov second order**

A. I. Kashpar

Using the regularization method, sufficient conditions for the existence and uniqueness of a solution to the de la Vallée-Poussin problem for a nonlinear matrix Lyapunov equation of the second order are derived. An iterative algorithm for constructing a solution using a computational scheme of the classical method of successive approximations is proposed.

Keywords: matrix differential equation, boundary value problem de la Vallée-Poussin, unique solvability, algorithm for constructing a solution.

Рассмотрим обобщение задачи [1–5]

$$\frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} = \mathbf{A}(t) \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{C}_1(t) \frac{d\mathbf{X}}{dt} \mathbf{C}_2(t) + \mathbf{D}_1(t) \mathbf{X} \mathbf{D}_2(t) + \frac{d\mathbf{X}}{dt} \mathbf{B}(t) + \mathbf{F}\left(t, \mathbf{X}, \frac{d\mathbf{X}}{dt}\right), \quad (1)$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{M}, \quad \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{N}, \quad (2)$$

где $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}_i, \mathbf{D}_i \in \square(I, \square^{n \times n})$, $\mathbf{F} \in \square(D, \square^{n \times n})$, $D = \{(t, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) : t \in I, \|\mathbf{X}\| < \rho_1, \|\mathbf{Y}\| < \rho_2\}$, $(\mathbf{Y} = d\mathbf{X}/dt)$, $i=1,2$; $\mathbf{M}, \mathbf{N}$ – заданные вещественные матрицы. Предположим также, что нелинейная функция $\mathbf{F}(t, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$ типа [6] удовлетворяет относительно $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ в области D условию Липшица (локально); $0 < \rho_i \leq \infty$, $I = [0, \omega]$.

В предлагаемой работе, являющейся продолжением и обобщением [1–5], на основе применения метода [7] задача (1), (2) изучается в конечномерной бана-

новой алгебре $\square(n)$ непрерывных матриц-функций с нормой $\|\mathbf{X}\|_c = \max_{t \in I} \|\mathbf{X}(t)\|$, где $\|\cdot\|$ – норма матриц в рамках определения этой алгебры, например, одна из норм, приведенных в [8, с. 21]. С помощью метода регуляризации выведены достаточные условия однозначной разрешимости задачи (1), (2), представленные в ее терминах. Предложен итерационный алгоритм построения решения с вычислительной схемой классического метода последовательных приближений.

Вместо задачи (1), (2) рассмотрим эквивалентную ей задачу

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{Y}, \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \mathbf{A}(t)\mathbf{Y} + \mathbf{C}_1(t)\mathbf{Y}\mathbf{C}_2(t) + \mathbf{D}_1(t)\mathbf{X}\mathbf{D}_2(t) + \mathbf{Y}\mathbf{B}(t) + \mathbf{F}(t, \mathbf{X}, \mathbf{Y}),$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{M}, \quad \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{N}. \quad (4)$$

Введем следующие обозначения:

$$h_1 = \max_{t \in I} \|\mathbf{M} + \mathbf{P}_{uv}(t) + \square_1(\mathbf{0}, \mathbf{0})\|, \quad h_2 = \max_{t \in I} \|\mathbf{Q}_{uv}(t) + \square_2(\mathbf{0}, \mathbf{0})\|, \quad h = \max_{t \in I} \|\mathbf{F}(t, \mathbf{0}, \mathbf{0})\|,$$

$$c_i = \max_{t \in I} \|\mathbf{C}_i(t)\|, \quad d_i = \max_{t \in I} \|\mathbf{D}_i(t)\|, \quad \lambda_U = \max_{0 \leq s \leq \tau \leq \omega} \|\mathbf{U}(\tau)\mathbf{U}^{-1}(s)\|, \quad \lambda_V = \max_{0 \leq s \leq \tau \leq \omega} \|\mathbf{V}(s)\mathbf{V}^{-1}(\tau)\|,$$

$$G = \{(t, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) : t \in [0, \omega], \|\mathbf{X}\| \leq \rho_1, \|\mathbf{Y}\| \leq \rho_2\}, \quad \mathcal{G} = \{(\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)) : \|\mathbf{X}\|_c \leq \rho_1, \|\mathbf{Y}\|_c \leq \rho_2\},$$

$$p_1 = \frac{1}{3} \gamma \lambda^2 \lambda^2 \omega^3 (d d_1 + L), \quad p_2 = \frac{1}{2} \gamma \lambda^2 \lambda^2 \omega^2 (d d_1 + L), \quad q_1 = \frac{1}{3} \gamma \lambda^2 \lambda^2 \omega^3 (c c_1 + L),$$

$$q_2 = \frac{1}{2} \gamma \lambda^2 \lambda^2 \omega^2 (c c_1 + L), \quad \gamma = \|\Phi^{-1}\|, \quad \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \|\mathbf{X}\|_c \\ \|\mathbf{Y}\|_c \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & q_1 \\ p_2 & q_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{K}_U(\tau, s) = \mathbf{U}(\tau)\mathbf{U}^{-1}(s), \quad \mathbf{K}_V(s, \tau) = \mathbf{V}(s)\mathbf{V}^{-1}(\tau),$$

где $0 < \rho_i < \rho_i$; $i = 1, 2$; $\mathbf{U}(t)$, $\mathbf{V}(t)$ – интегральные матрицы уравнений $d\mathbf{U}/dt = \mathbf{A}(t)\mathbf{U}$ ($\mathbf{U}(0) = \mathbf{E}$), $d\mathbf{V}/dt = \mathbf{V}\mathbf{B}(t)$ ($\mathbf{V}(0) = \mathbf{E}$), $\mathbf{E}$ – единичная матрица;

$\mathbf{P}_{uv}(t) = \int_0^\omega \mathbf{U}(\tau)(\Phi^{-1}(\mathbf{N} - \mathbf{M}))\mathbf{V}(\tau)d\tau$, $\mathbf{Q}_{uv}(t) = \mathbf{U}(t)(\Phi^{-1}(\mathbf{N} - \mathbf{M}))\mathbf{V}(t)$; Φ – линейный оператор,

$$\Phi \mathbf{Z}(t) = \int_0^\omega \mathbf{U}(\tau)\mathbf{Z}(t)\mathbf{V}(\tau)d\tau, \quad \mathbf{Z}(t) = \mathbf{U}^{-1}(t)\mathbf{Y}(t)\mathbf{V}^{-1}(t); \quad (5)$$

$L_i = L(\rho_1, \rho_2)$, ($i = 1, 2$) – постоянные Липшица для $\mathbf{F}(t, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$ в области G ; $\square_1, \square_2$ – интегральные операторы

$$\square_1(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \int_0^t \mathbf{U}(\varphi)\Phi^{-1} \left(\int_0^\omega \left(\int_\tau^\omega \mathbf{K}_U(\tau, s)(\mathbf{C}_1(s)\mathbf{Y}(s)\mathbf{C}_2(s) + \right. \right. \\ \left. \left. + \mathbf{D}_1(s)\mathbf{X}(s)\mathbf{D}_2(s) + \mathbf{F}(s, \mathbf{X}(s), \mathbf{Y}(s))\right)\mathbf{K}_V(s, \tau)ds \right) d\tau \right) \mathbf{V}(\varphi)d\varphi, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \square_2(X, Y) = U(t) \Phi^{-1} \left(\int_0^t \int_{\tau}^{\omega} K_1(\tau, s) (C_1(s) Y(s) C_1(s) + D_1(s) X(s) D_1(s) + \right. \\ \left. + F(s, X(s), Y(s))) K_2(s, \tau) ds \right) V(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Оператор Φ имеет известный матричный аналог [1]. Способы построения Φ^{-1} и оценки для $\|\Phi^{-1}\|$ даны в [9].

С помощью метода регуляризации [7] задача (1), (2) сведена к эквивалентной интегральной задаче

$$X(t) = M + P_{UV}(t) + \square_1(X, Y), \quad (8)$$

$$Y(t) = Q_{UV}(t) + \square_2(X, Y). \quad (9)$$

На основе применения модификации [7, § 3.4] обобщенного принципа сжимающих отображений [10, с. 94] доказана теорема.

Теорема. Пусть оператор Φ однозначно обратим и выполнены условия

$$p_1 \rho_1 + q_1 \rho_2 + h_1 \leq \rho_1, \quad p_2 \rho_1 + q_2 \rho_2 + h_2 \leq \rho_2, \quad (10)$$

$$p_1 + q_2 < 1. \quad (11)$$

Тогда задача (3), (4) однозначно разрешима в области G , при этом справедлива оценка

$$Z \leq (E - P)^{-1} H. \quad (12)$$

В случае когда $A(t) \equiv 0$, $B(t) \equiv 0$, $C_i(t) \equiv 0$, $D_i(t) \equiv 0$, для соответствующей векторной задачи [11, с. 496] имеет место следствие, аналогичное [1, 2].

Для построения решения задачи (3), (4) воспользуемся классическим методом последовательных приближений (см., например, [12, с. 606])

$$X_m(t) = M + P_{UV}(t) + \square_1(X_{m-1}, Y_{m-1}), \quad (13)$$

$$Y_m(t) = Q_{UV}(t) + \square_2(X_{m-1}, Y_{m-1}), \quad m=1, 2, \dots, \quad (14)$$

где в качестве начального приближения $(X_0(t), Y_0(t))$ принимаем произвольные матрицы класса $\square(I, \square^{n \times n})$, принадлежащие множеству G .

Используя условие (5), можно показать, что все приближения, определяемые алгоритмом (13), (14), принадлежат множеству G . По методике [1] установлено, что эти приближения удовлетворяют условиям (2).

Далее изучим вопросы сходимости, скорости сходимости последовательности $\{X_m(t), Y_m(t)\}_0^\infty$, построенной по алгоритму (13), (14). Используя известный прием (см., например, [13, с. 54]), эти вопросы заменим эквивалентным вопросом сходимости матричных рядов

$$X_0(t) + (X_1(t) - X_0(t)) + \dots + (X_m(t) - X_{m-1}(t)) + \dots, \quad (15)$$

$$Y_0(t) + (Y_1(t) - Y_0(t)) + \dots + (Y_m(t) - Y_{m-1}(t)) + \dots \quad (16)$$

Построим для рядов (15), (16) соответствующие мажорантные числовые ряды. На основе (13), (14) имеем

$$X_{m+1}(t) - X_m(t) = \square_1(X_m, Y_m) - \square_1(X_{m-1}, Y_{m-1}), \quad (17)$$

$$Y_{m+1}(t) - Y_m(t) = \square_2(X_m, Y_m) - \square_2(X_{m-1}, Y_{m-1}). \quad (18)$$

Выполнив оценки по норме в (17), (18), получим рекуррентные оценки (19)

$$\mathbf{Z}_m \leq \mathbf{P} \mathbf{Z}_{m-1} \leq \mathbf{P}^m \mathbf{Z}_0, \quad m = 1, 2, \dots, \quad (19)$$

где $\mathbf{Z}_k = colon(\|\mathbf{X}_{k+1}(t) - \mathbf{X}_k(t)\|_C, \|\mathbf{Y}_{k+1}(t) - \mathbf{Y}_k(t)\|_C)$, $k = 0, 1, 2, \dots$

С использованием оценки (19) можно доказать, что ряды (15), (16) сходятся равномерно по $t \in I$ к функциям $\mathbf{X}(t)$, $\mathbf{Y}(t)$, представляющим собой решение системы интегральных уравнений (8), (9). На основе (19) получена оценка погрешностей для приближенных решений $(\mathbf{X}_m(t), \mathbf{Y}_m(t))$ системы (8), (9)

$$\mathbf{Z}_m \leq (\mathbf{E} - \mathbf{P})_{-1}^{-1} \mathbf{P}_m \mathbf{Z}_0,$$

где $\mathbf{Z}_m = colon(\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_m\|_C, \|\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_m\|_C)$.

Аналогично имеем оценку области локализации решения задачи (3), (4), определяемую на основе алгоритма (13), (14),

$$\mathbf{Z} \leq \mathbf{Z}_0 + (\mathbf{E} - \mathbf{P})^{-1} \mathbf{Z}_0, \quad (20)$$

где $\mathbf{Z}_0 = colon(\|\mathbf{X}_0\|, \|\mathbf{Y}_0\|)$.

Полагая $\mathbf{X}_0 = 0, \mathbf{Y}_0 = 0$, из оценки (20) имеем оценку (12), при этом $\mathbf{Z}_0 = 0, \mathbf{Z}_0 = \mathbf{H}$.

При решении конкретных задач выбор начального приближения определяется на основе анализа структуры правой части уравнения (1).

Список использованных источников и литературы

1. Кашпар, А. И. Разрешимость и построение решения краевой задачи Валле-Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка / А.И. Кашпар, В.Н. Лаптинский // Дифференциальные уравнения. – 2020. – № 5. – С. 570–583.
2. Кашпар, А. И. Анализ разрешимости и построение решения краевой задачи Валле-Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка // Актуальные проблемы науки и техники : матер. II Междунар. науч.-техн. конф., посв. 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Сарапул, 19–21 мая 2022 г.). – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 40–44.
3. Кашпар, А. И. Регуляризация задачи Валле-Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка / А.И. Кашпар // Теория управления и математическое моделирование: матер. Всероссийской конф. с междунар. участием, посв. памяти профессора Н.В. Азбелева и профессора Е. Л. Тонкова.- Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022.- С. 64-67.
4. Кашпар, А. И. Разрешимость и построение решения задачи Валле-Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка // XX Международная научная конференция по дифференциальным уравнениям (Еругинские чтения –2022 : тез. докл. Междунар. науч. конф., Новополюцк, 31 мая – 03 июня 2022 г. – Ч. 1. – Новополюцк : Полоцкий государственный университет, 2022. – С. 56–59.
5. Кашпар, А. И. К разрешимости и построению решения задачи Валле-Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка // XXI Международная

научная конференция по дифференциальным уравнениям (Еругинские чтения – 2023 : тез. докл. Междунар. науч. конф., Могилев, 23–27 мая 2023 г. – Ч. 1. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 76–78.

6. *Лаппо-Данилевский, И. А.* Применение функций от матриц к теории линейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. – Москва : ГИТТЛ, 1957. – 456 с.

7. *Лаптинский, В. Н.* Конструктивный анализ управляемых колебательных систем. – Минск : ИМ НАН Беларуси, 1998. – 300 с.

8. *Демидович, Б. П.* Лекции по математической теории устойчивости. – Москва : Наука, 1967. – 472 с.

9. *Кашпар, А. И.* О краевой задаче Валле-Пуссена для матричного уравнения Ляпунова второго порядка / А. И. Кашпар, В. Н. Лаптинский // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навукі: матэматыка, фізіка, біялогія. – 2021. – № 2 (58). – С. 16–27.

10. Приближённое решение операторных уравнений / М. А. Красносельский [и др.]. – Москва : Наука, 1969. – 456 с.

11. *Хартман, Ф.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. – Москва : Мир, 1970. – 720 с.

12. *Канторович, Л. В.* Функциональный анализ / Л. В. Канторович, Г. П. Акилов. – Москва : Наука, 1977. – 744 с.

13. *Бибиков, Ю. Н.* Курс обыкновенных дифференциальных уравнений. – Москва : Высш. шк., 1991. – 304 с.

Сведения об авторе

Александр Иванович Кашпар, начальник координационного центра межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет» (Республика Беларусь, г. Могилев), alex.kashpar@tut.by

СЕКЦИЯ № 4 НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО

УДК 622.276.057

Влияние условий эксплуатации штанговых насосных установок на изменение форм динамограмм

А. П. Ильин, А. Г. Миловзоров

В работе рассмотрен способ диагностирования состояния штанговых глубинных насосов по результатам динамометрирования. Проведен анализ влияния условий эксплуатации на признаки практической динамограммы.

Ключевые слова: штанговые глубинные насосные установки, оценка результатов динамометрирования, динамограмма, усилие на полированном штоке.

Influence of operating modes of a deep-well pumping unit on changes in dynamogram shapes

A. P. Ilyin, A. G. Milovzorov

The paper discusses a method for diagnosing the condition of sucker rod pumps based on the results of dynamometer testing. An analysis of the influence of operating modes on the characteristics of a practical dynamogram was carried out.

Keywords: sucker rod pumping units, evaluation of the results of dynamometer testing, dynamometer chart, force on a polished rod.

Штанговые глубинные насосные установки (ШГНУ) широко применяются в нефтяной и газовой промышленности для добычи углеводородов из скважин. Они являются одним из наиболее распространенных типов насосных установок.

Основным способом диагностирования состояния ШГНУ в процессе их эксплуатации является динамометрирование. В нефтедобыче этому вопросу уделяется большое внимание. Поскольку оперативное определение показателей работы глубинно-насосного оборудования без прекращения эксплуатации скважины позволяет минимизировать издержки в процессе эксплуатации ШГНУ.

В настоящее время на смену гидравлическим динамографам пришли электронные устьевые, среди которых большое распространение получили переносные динамографы. Но с развитием цифровизации систем контроля и управления работой насосного оборудования неуклонно растет доля стационарных динамографов [1].

Для исключения влияния человеческого фактора и оперативности получения информации о состоянии глубинно-насосного оборудования разрабатываются программные обеспечения расшифровки результатов динамометрирования.

Целью данного исследования является определение влияния эксплуатационных параметров ШГНУ на изменение форм динамограмм, которые могут быть реализованы в алгоритмах работы программ по автоматической обработке динамограмм.

Для того чтобы по результатам динамометрирования достоверно распознавать нарушения в работе глубинного насосного оборудования, необходимо учитывать отклонения практической динамограммы от теоретической. За простейшую теоретическую динамограмму ABCD (рис. 1) принимают динамограмму работы ШГНУ при отсутствии сил трения и коэффициенте подачи равном единице. Но в реальности невозможно избежать влияния сил трения и инерционных нагрузок в работе оборудования, что в свою очередь влияет на форму практической динамограммы A'B'C'D'.

В ряде работ проведен подробный анализ участков изменения нагрузки P на полированный шток при перемещении S плунжера за один цикл [2, 3].

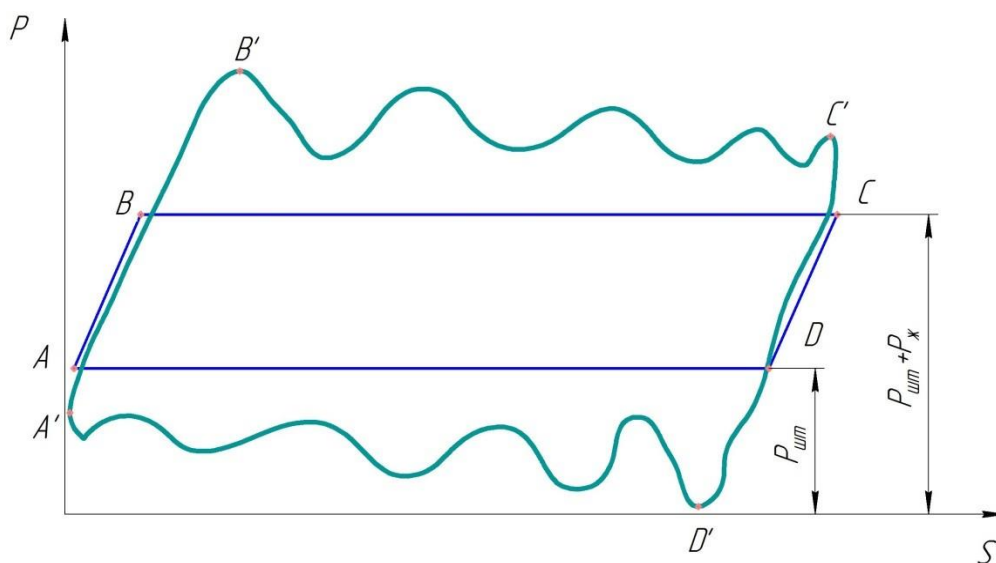


Рис. 1. Теоретическая и практическая динамограмма

Рассмотрим влияние эксплуатационных характеристик на форму практической динамограммы при нормальной работе глубинно-насосного оборудования при ходе полированного штока вверх.

Участок B'C' есть непериодическая кривая с переменными амплитудами, которая соответствует ходу полированного штока вверх. Математическая модель изменения нагрузки на полированном штоке описывается уравнением [4]:

$$u(t) = u_0 + \sum_{i=1}^n u_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \phi),$$

где $u(t)$ – результирующая амплитуда; u_0 – отклонение нулевой линии первой амплитуды от горизонтальной оси; u_i – величина i -й амплитуды; ω – частота; ϕ – фаза.

Участок восприятия нагрузки AB_1 практической динамограммы (рис. 2) в большинстве случаев при нормальной работе можно усреднить прямой. Угол наклона α отклоняется незначительно от простейшей теоретической динамограммы. Значение данного угла зависит от состояния нагнетательного клапанного узла, числа ходов плунжера в минуту и вязкости добываемой жидкости.

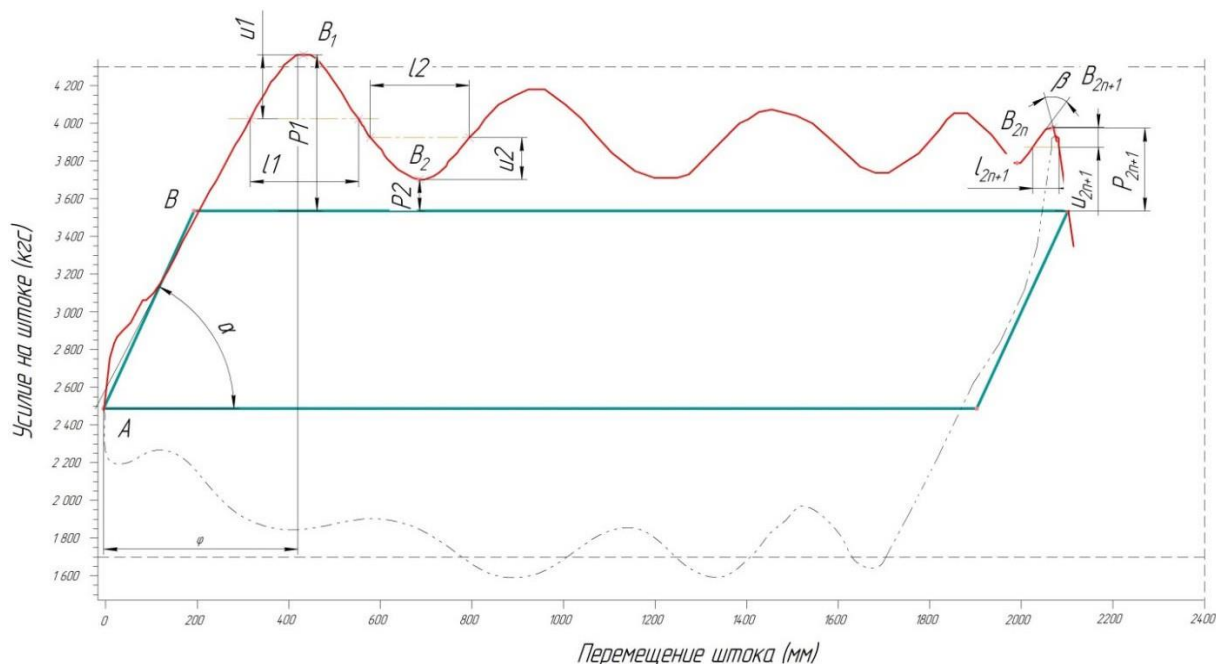


Рис. 2. Динамограммы нормальной работы ШГНУ

В зависимости от состояния глубинно-насосного оборудования и условий его эксплуатации наиболее информативны первые две амплитуды практической динамограммы. Для их анализа введем в рассмотрение следующие параметры: P_i – отклонение i -й по счету амплитуды от теоретической динамограммы; l_i – полупериод.

Результаты исследований при ходе полированного штока вверх представлены в табл. 1. Аналогично, введем в рассмотрение параметры для последующих амплитуд колебаний.

Большой интерес представляет правый верхний угол практической динамограммы (последняя амплитуда). В ходе исследований выделены следующие признаки: отклонение практической динамограммы от теоретической P_{2n+1} , величина последней амплитуды u_{2n+1} , полупериод l_{2n+1} , угол β между прямыми, образующими амплитуду.

Таблица 1. Влияние условий эксплуатации на первые две амплитуды практической динамограммы

Параметр	Угол наклона α участка восприятия нагрузки	Отклонение от теоретической динамограммы P_i	Амплитуда u_i	Полупериод l_i	Отношение полупериодов первой и второй амплитуды l_1/l_2
Условия эксплуатации	1) состояние нагнетательного клапанного узла; 2) число ходов плунжера за 1 минуту; 3) вязкость жидкости	1) влияние сил трения в подземной части ШГНУ; 2) инклинометрия скважины; 3) асфальтосмолопарафиновые отложения	1) инерционные силы, возникающие в системе штанги-трубы-жидкость; 2) состояние нагнетательного клапанного узла	1) влияние сил трения в подземной части ШГНУ; 2) состояние нагнетательного клапанного узла; 3) динамический уровень	

Результаты исследований правого верхнего угла практической динамограммы приведены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние условий эксплуатации на конечную амплитуду практической динамограммы при ходе штока вверх

Параметр	Отклонение от теоретической динамограммы P_{2n+1}	Амплитуда u_{2n+1}	Полупериод l_{2n+1}	Угол β между прямыми, образующими амплитуду
Условия эксплуатации	1) инерционные силы, возникающие в системе штанги-трубы-жидкость; 2) состояние нагнетательного клапанного узла; 3) число ходов; 4) динамический уровень.			1) инерционные силы; 2) состояние нагнетательного клапанного узла; 3) динамический уровень.

Таким образом, в работе проведен анализ параметров практической динамограммы для оценки состояния глубинного насосного оборудования. В результа-

те исследования установлено, что на все описанные параметры влияет состояние нагнетательного клапанного узла ШГНУ. О степени асфальтосмолопарафиновых отложений служат отклонения амплитуд от простейшей теоретической динамограммы.

Результаты работы могут быть реализованы в алгоритмах работы программ по автоматической обработке динамограмм.

Список использованных источников и литературы

1. Гаус, П. О. Анализ применимости динамографов с прямым и косвенным способами измерения нагрузки на полированный шток и его перемещения / П. О. Гаус, В. В. Лавров // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 9. – С. 78–81.

2. Миловзоров, Г. В. Анализ форм динамограмм при нормальной работе штанговой глубинно-насосной установки / Г. В. Миловзоров, А. П. Ильин, Р. М. Гареев // Приборостроение в XXI веке – 2022. Интеграция науки, образования и производства : сборник материалов XVIII Всероссийской научно-технической конференции, Ижевск, 23–25 ноября 2022 года. – Ижевск : УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. – С. 223–229.

3. Диагностирование глубиннонасосных скважин динамометрированием / Г. Г. Гилаев и др. – Ижевск : Парацельс, 2008. – 212 с.

4. Моделирование состояния глубинного насосного оборудования на основе результатов динамометрирования / Г. В. Миловзоров, П. Э. Широбоков, А. П. Ильин, Р. М. Гареев // Актуальные проблемы науки и техники : материалы II Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», Сарапул, 19–21 мая 2022 года. – Ижевск : УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 337–343.

Сведения об авторах

Алексей Петрович Ильин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели и установки», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (Россия, г. Ижевск), ilalp@mail.ru

Алексей Георгиевич Миловзоров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», УдГУ (Россия, г. Ижевск), mag1895@yandex.ru

Численное моделирование однофазной изотермической фильтрации флюида при интерпретации ГДИС

Д. Н. Майков, С. С. Макаров

Приводится параметрический анализ численного решения дифференциального уравнения пьезопроводности. Показано сравнение расчетов численного и аналитического метода решения модели вертикальной скважины в однородном квадратном пласте с границей постоянного давления.

Ключевые слова: уравнение пьезопроводности, численное решение, ГДИС, изотермическая фильтрация, граница постоянного давления.

Numerical simulation of single-phase isothermal fluid flow in the reservoir

D. N. Maykov, S. S. Makarov

The parametric analysis of the diffusivity differential equation numerical solution is carried out. The comparison of the numerical and analytical method calculations for solving vertical well model in a homogeneous square formation with a constant pressure boundary is shown.

Keywords: diffusivity equation, numerical solution, PTA, isothermal flow, constant pressure bound.

Введение

При разработке нефтяных и газовых месторождений требуется проводить гидродинамические исследования скважин (ГДИС). Благодаря средствам ГДИС определяют энергетическое состояние пласта, фильтрационно-емкостные свойства коллектора и т. д.

При интерпретации результатов ГДИС на неустановившихся притоках флюида используется численное и аналитическое решение дифференциального уравнения пьезопроводности. Численное решение дает возможность задать зонную неоднородность коллектора, но время и точность расчетов будут зависеть от типа сетки, ее плотности, а также от способа решения. В конечном виде численное решение сводится к системе уравнений, которая решается с помощью прямых и итерационных методов.

Целью работы является проведение параметрического анализа численного решения дифференциального уравнения пьезопроводности.

Постановка задачи

Процесс фильтрации однофазного слабосжимаемого флюида, находящегося в элементарном образце слабосжимаемой пористой среды постоянной температуры, описывается при помощи уравнения пьезопроводности [1]:

$$\varphi c_t \frac{\partial p}{\partial t} = \operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} \nabla p \right) + q \quad (1)$$

где φ – пористость, p – давление, μ – вязкость жидкости, k – тензор проницаемости, q – источник/сток.

Конечно-разностная аппроксимация уравнения 1 для декартовой неструктурированной нерегулярной сетки Вороного имеет следующий вид [2]:

$$\sum_{j=1}^n T_{ij} \left(\frac{r}{\mu B} \right) (P_j^n - P_i^n) = \frac{V_{bi}}{\Delta t} (P_i^n - P_i^{n-1}) + Q_i^n, \quad (2)$$

$$T_{ij} = \left(\frac{f k h b \cos(\alpha)}{d} \right)_{ij}$$

$$V_{bi} = \frac{V_i \varphi c_t}{B},$$

где T – коэффициент проводимости на грани, c_t – коэффициент общей сжимаемости, V – объем ячейки, B – объемный коэффициент флюида, P – давление в ячейке, h – высота ячейки, α – угол между линией, соединяющей центр двух соседних блоков сетки, и ее горизонтальной проекцией, f – коэффициент усиления пропускаемости, d – расстояние между блоками (примем $f = 1$), n – шаг времени, k_r – относительная фазовая проницаемость (при однофазной фильтрации $k_r = 1$).

В качестве начальных условий примем при $t=0$ давление во всех ячейках равно начальному давлению P_i . В качестве граничных условий примем границу первого рода $P(0, t) = \text{const}$, что является «границей постоянного давления». Переток между забоем скважины и расчетной ячейкой будет рассчитываться по методу Писмена [3], где эффективный радиус будет определяться для сетки Вороного [4].

Численное исследование будет осуществляться на основе уравнения 2 с использованием принятых начальных и граничных условий.

Численное исследование

Сопоставим численное решение с аналитическим. Для этого смоделируем работу вертикальной скважины в однородном пласте квадратной формы с границей постоянного давления. Аналитическое решение было взято из работы [1]. Параметры модели приведены в таблице. Скважина работает 10^5 часов. Сетка Вороного будет строиться по алгоритму Форчуна [5]. Количество расчетных ячеек сетки составило 798. Построенная сетка приведена на рис. 1. Расчет системы линейных уравнений численного решения осуществлялся при помощи стабилизированного метода бисопряженных градиентов (BiCGStab) с ILU(0) предобуславливанием [6]. Сопоставление численного и аналитического расчета изменения давления на забое скважины приведено на билогарифмическом диагностическом графике Бурде [7]. Время расчета численного решения составило 0.821 с, аналитического – 0,062 с.

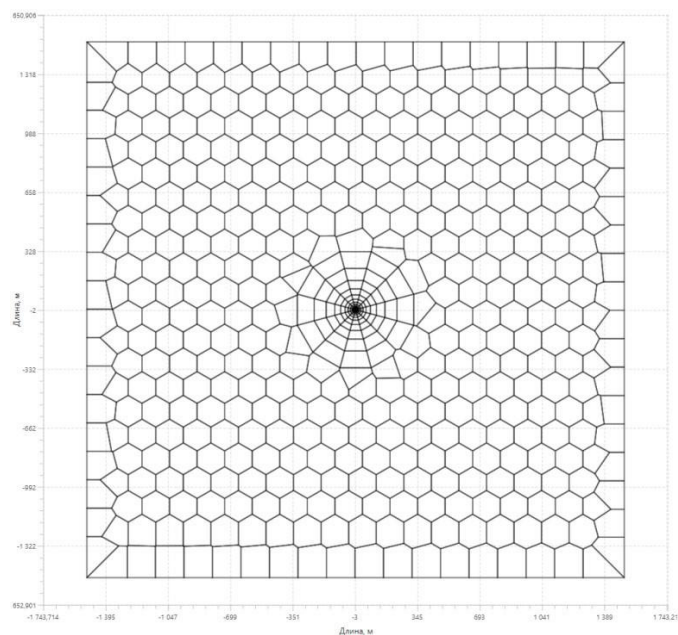


Рис. 1. Расчетная сетка

Параметры модели

Параметр	Значение
Толщина пласта, h	10 м
Проницаемость пласта, k	100 мД
Общая сжимаемость, c_t	0.00005 атм^{-1}
Пористость, ϕ	0.2
Объемный коэффициент, B	$1 \text{ м}^3/\text{ст.м}^3$
Вязкость флюида, μ	5 сПз
Общий дебит, q	$100 \text{ м}^3/\text{сут}$
Ширина пласта, w	1500 м
Длина пласта, l	1500 м

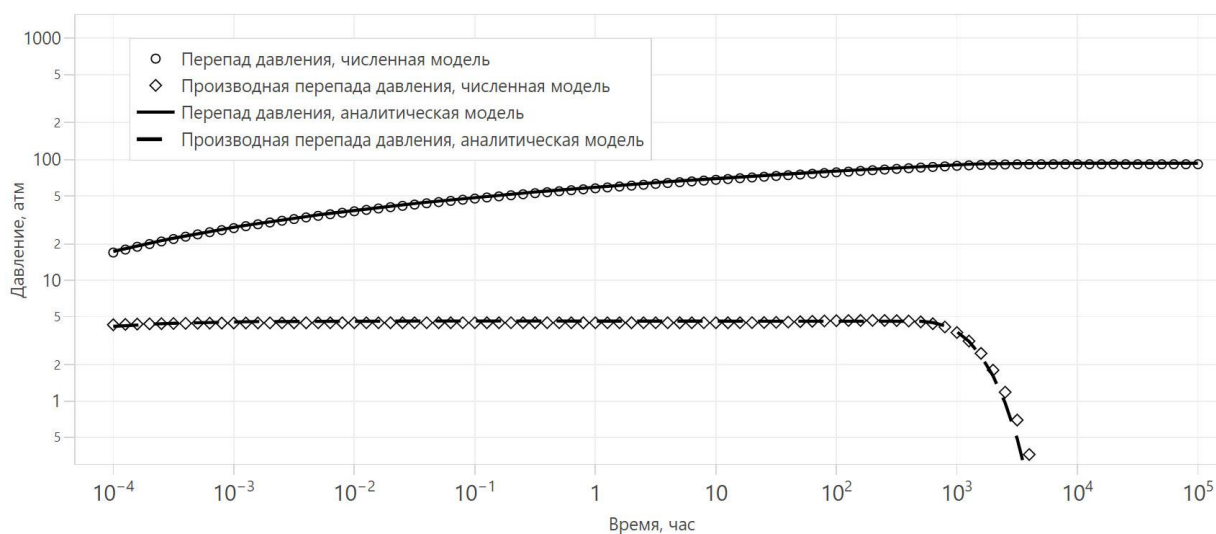


Рис. 2. Сопоставление расчетов на диагностическом графике Бурде

На диагностическом графике видно, что численное решение согласуется с аналитическим, среднее отклонение расчетного перепада давления по численному методу от аналитического составило 0,44 %. Отклонение производной перепада давления в интервале времени 10^3 – 10^4 ч произошло из-за большого шага по времени в численном методе.

Заключение

В работе приведено численное моделирование однофазной изотермической фильтрации при работе вертикальной скважины. Сопоставлены расчеты численного и аналитического решения модели вертикальной скважины в квадратном пласте с границей постоянного давления. Численное решение сходится с аналитическим, среднее отклонение расчетного перепада давления составило 0,44 %, при этом численный расчет при 798 ячейках в 13,24 раза медленнее, чем аналитический. Из-за большого шага по времени, на производной диагностического графика наблюдается отклонение численного расчета от аналитического.

Список использованных источников и литературы

1. Well test design and analysis // Stewart G. // PennWell Corp., 2011.
2. Use of Voronoi Grid in Reservoir Simulation // Cesar Luiz Palagi, Stanford U., Petrobnis and Khalid Aziz, Stanford U // SPE 22889, 1994 Society of Petroleum Engineers, pp. 69-77.
3. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation with non-square grid blocks and anisotropic permeability // Peaceman, D. W. // Society of Petroleum Engineers Journal, 23(03), 1983, pp. 531–543.
4. Simulation on Discrete Fracture Network Using Flexible Voronoi Grid System // Syihab Z. // Petroleum Engineering, Texas A&M University. PHD, 2009.
5. A Sweepine Algorithm for Voronoi Diagrams // Fortune S. // Algorithmica, 1987, pp. 153-174.
6. Iterative methods for sparse linear systems // Saad Y. // SIAM, 2003.
7. A new set of type curves simplifies well test analysis // Bourdet D. et al. // World Oil, 1983, pp. 95-106.

Сведения об авторах

Дмитрий Николаевич Майков, ведущий специалист ООО «Сиам Мастер»; младший научный сотрудник, ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (г. Ижевск, Россия), dimaMS2@mail.ru

Сергей Сергеевич Макаров, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (Россия, г. Ижевск), ssmak15@mail.ru

Модели внутрипластовой водоносной системы в гидрофобном коллекторе

А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин

Предложены статическая и динамическая модели внутрипластовой водоносной системы, с позиций которых можно объяснить различия имеющейся экспериментальной информации о химическом составе пластовой воды. Приведены взаимодействующие объекты внутрипластовой системы, находящейся в гидрофобном коллекторе. Рассмотрен механизм преобразования природных объектов системы в техногенные объекты. Показано, что из скважин производится отбор проб извлеченной воды, а не пластовой воды.

Ключевые слова: пластовая вода, извлеченная вода, внутрипластовая система, внутрипластовый объект, модель, химический состав, гидрофобный коллектор, техногенные воздействия, проба воды.

Models of an intra-reservoir aquifer system in a hydrophobic reservoir

A. V. Sorokin, V. D. Sorokin

Static and dynamic models of the intra-reservoir aquifer system are proposed, from the positions of which it is possible to explain the differences in the available experimental information on the chemical composition of reservoir water. The interacting objects of an intra-reservoir system located in a hydrophobic reservoir are presented. The mechanism of transformation of natural objects of the system into technogenic objects is shown. It is shown that extracted water is sampled from wells, and not reservoir water.

Keywords: reservoir water, extracted water, intra-reservoir system, intra-reservoir object, model, chemical composition, hydrophobic collector, technogenic effects, water sample.

Цели данной статьи – показать, что существующая модель пластовой воды не может объяснить имеющуюся экспериментальную информацию о ее составе и свойствах, предложить иные модели, в которых пластовая вода является одним из объектов внутрипластовой системы. В задачи данной статьи входят: предложить модели природной и техногенной внутрипластовых систем, привести их взаимодействующие объекты в гидрофобном коллекторе и оценить последствия влияния техногенного воздействия на внутрипластовую систему на химический состав и свойства проб извлеченной воды.

Экспериментально обнаружено, что концентрации ионов одних и тех же химических элементов в пробах извлеченной воды разных скважин одного пласта одного месторождения разнятся на несколько порядков, предварительный анализ этой информации приведен в работах [1, 2]. По результатам анализа составов проб извлеченной воды при последовательном их отборе из одной скважи-

ны также наблюдается значительная разница в содержании ионов в химическом составе ее проб. Нередко встречаются водоносные пласты, имеющие коллекторы с гидрофобной поверхностью, однако отсутствует модель внутрипластовой водоносной системы, на основании которой можно объяснить имеющуюся экспериментальную информацию.

В настоящее время природный пласт подземной воды рассматривается как закрытая система, находящаяся в квазиравновесном состоянии до техногенного воздействия на нее. С внешней средой она обменивается энергией через поля (гравитационное, электромагнитное, тепловое и пр.) разных напряженностей и переменных во времени. На данный момент в практике применяется предельно упрощенная однородная и изотропная модель пластовой воды, в которой она в коллекторах с любым типом смачиваемости рассматривается в качестве единственного внутрипластового объекта. В соответствии с данной моделью состав и свойства пластовой воды в разных зонах пласта не должны иметь различий. Также в данной модели не предусмотрен учет влияния известных процессов на изменение состава «пластовой» воды, вызванных многочисленными видами техногенных воздействий, обзор которых приведен в работе [3]. Как следствие, применения данной модели, химический состав и значения свойств проб извлеченной воды из пласта отождествляются с составом и значениями свойств пластовой воды без обоснованного доказательства данного факта.

В результате экспериментальных исследований проб «пластовой» воды получено, что ее химический состав для каждой скважины имеет разные значения как при первоначальных исследованиях, так и в процессе последовательных и неоднократных отборов проб. Различия концентраций ионов и общей минерализации разных проб «пластовой» воды, отобранных из одной скважины, на несколько порядков превышают погрешности их определений [1,2]. С позиций данной модели такие результаты объяснить невозможно даже на качественном уровне.

Различия химических составов и физико-химических свойств «пластовой» воды можно объяснить рядом причин, которые можно разделить на три группы: природные, техногенные и методические. Природной причиной являются естественные различия химического состава пластовой воды в разных зонах пласта.

К техногенным причинам относятся:

- неравновесное, динамическое состояние системы, из которой производится отбор проб;
- внутрипластовое техногенное воздействие на пластовую систему, приводящее к изменению составов и свойств ее объектов;
- внепластовое техногенное воздействие на извлеченную воду при выводе ее из пласта и отборе, хранении, в процессе исследования ее проб.

К методическим причинам можно отнести:

- применение однородной и изотропной модели «пластовой» воды;
- использование методик отбора проб, исследований состава и свойств, подобранных или разработанных под выбранную модель;

- использование несовершенных методов отбора проб и неподходящего пробоотборного оборудования;
- возможность отбора проб извлеченной воды возникает только после вывода неопределенной ее части из пласта.

Имеющиеся различия химического состава одновременно отобранных проб «пластовой» воды из одной скважины, полученные при экспериментах, объяснимы результатом одновременного действия вышеуказанных причин. Следовательно, химический состав пробы воды характеризует только состояние пробы извлеченной воды, отобранной в данной точке, в данный момент времени и данным оборудованием при конкретном режиме работы скважины. Поэтому не обосновано отождествление химического состава пробы извлеченной воды и химического состава воды, из которой она отобрана. Еще одним недостатком однородной и изотропной модели «пластовой» воды является то, что изучаются разные объекты (пластовая вода и извлеченная вода), а модель предполагает, что это один и тот же объект, что является терминологическим недостатком данной модели.

Имеющийся опыт авторов в области разработки моделей внутрипластовых водонефтяных систем [4], дает возможность предложить следующую модель внутрипластовой водоносной системы, находящейся в гидрофобном коллекторе. По предлагаемой неоднородной и неизотропной модели, внутрипластовая водоносная система состоит из определенного набора взаимодействующих пластовых объектов в поровом пространстве водоносного пласта с гидрофобной поверхностью коллектора. На рисунке приведена схема взаимодействующих объектов внутрипластовой водоносной системы в коллекторе с гидрофобной поверхностью. В статическом состоянии системы (до техногенного воздействия на нее) природные пластовые объекты приведены на рисунок, *а*, в динамическом состоянии системы (в процессе техногенного воздействия на нее) техногенные пластовые объекты представлены на рисунке, *б*. Взаимодействующими объектами природной внутрипластовой водоносной системы до техногенного воздействия на нее являются: гидрофобный коллектор, природный адсорбционный слой на ней, природные разделительные пленки с растворенными в них углеводородными и неуглеводородными соединениями и природная пластовая вода с растворенными в ней органическими и неорганическими соединениями (рисунок, *а*). В общем случае, в воде могут быть растворены углеводородные компоненты, в основном гомологи метана, неуглеводородные газы (азот, диоксид углерода и др.) и соли. Насыщенность адсорбционных слоев, раствора воды и пленок газовыми компонентами и минеральными солями по отношению к пластовому давлению так же может быть разной. Она зависит от величин общей минерализации, температуры, пластового давления и др. Концентрации индивидуальных компонентов и ионов в каждом природном объекте имеют разные значения. До техногенного воздействия внутрипластовая система находится в квазиравновесном состоянии и является закрытой системой и состоит из двух природных взаимодействующих объектов, содержащих молекулы воды: пластовой воды и природных разделительных пленок.



Взаимодействующие объекты внутрипластовых водоносных систем
в гидрофобном коллекторе: *a* – до техногенного воздействия;
б – в процессе техногенного воздействия

В порах разного размера соотношение масс природных объектов различно, следовательно, и интегральные химические составы объектов, содержащих молекулы воды в каждой поре, различаются. Следовательно, внутрипластовая водоносная система должна описываться неоднородной, а при анизотропии свойств коллектора – неізотропной моделью. В данной модели наличие внутренних структур объектов не учитывается. При накоплении достаточного объема результатов изучения внутренних структур объектов возникнет необходимость в их учете в модели внутрипластовой водоносной системы. Структуры, составы и свойства перечисленных объектов на данный момент не изучены, за исключением коллектора.

Для сравнения составов природных объектов водоносной системы в порах разного размера необходимо знание масс данных объектов. Толщины, состав и свойства адсорбционного слоя и разделительных пленок зависят от термобарических условий, состава пластовой воды и свойств поверхности коллектора. Толщины адсорбционного слоя и разделительных пленок в разных порах имеют близкие размеры, а площадь их поверхности пропорциональна площади поверхности порового пространства. Для оценки предположим, что эти площади равны. Тогда объе-

мы, занимаемые адсорбционным слоем и разделительными пленками, равны произведению их толщин на площадь поверхности коллектора. То есть массы данных объектов в пласте пропорциональны плотности веществ, из которых они состоят, их толщинам и площади поверхности коллектора. Соответственно, масса пластовой воды пропорциональна ее плотности и оставшемуся объему пор. Отсюда следует, что в порах разного размера и формы отношение суммы масс адсорбционного слоя и разделительных пленок к массе пластовой воды имеет разные значения. Следовательно, сумма масс адсорбционного слоя и разделительных пленок пропорциональна площади поверхности поры, а масса пластовой воды – занимаемому ей объему поры. Поскольку объем пор не пропорционален площади их поверхности, то приходим к выводу, что интегральный состав вещества в порах разного размера различен вследствие разного состава вещества объектов, из которого состоят адсорбционный слой, разделительные пленки и пластовая вода и отношения их масс. По оценкам, в поровом пространстве массы природных объектов внутрипластовой системы могут иметь один порядок.

Известно, например, что структура, плотность, вязкость, другие физические свойства и фазовые диаграммы жидкостей, находящихся в межфазных пленках (в несколько молекулярных слоев), отличаются от соответствующих параметров для жидкостей, находящихся в свободном объеме [5].

Плотность жидкости на границе с газом, как правило, ниже, а на границе с твердым телом – выше, чем у этой жидкости в свободном объеме. В том и другом случае зависимость плотности жидкости от толщины ее слоя имеет несколько максимумов и минимумов, при уменьшении амплитуды с увеличением расстояния до межфазной границы. То есть изотропная жидкость, находящаяся в свободном объеме, в межфазных слоях обладает выраженными анизотропными свойствами, а с удалением от границы раздела переходит в изотропную жидкость.

В работе [5] показано, «плотность воды в граничных пленках глинистого песчаника на 5–10 % выше, чем плотность воды в свободном объеме, а температура замерзания на 10–20 °С ниже». Следовательно, свойства граничных пленок, состоящих из дистиллированной воды, отличаются от свойств воды в свободном объеме.

Гидрофобная поверхность коллектора состоит из разных атомов и молекул, в разных зонах пласта имеет неоднородный состав с разными значениями энергии взаимодействия с ионами солей, растворенных в пластовой воде. В статическом состоянии внутрипластовая система: коллектор, пластовая вода, адсорбционный слой, разделительные пленки между жидкостью и поверхностью коллектора находятся в квазиравновесном состоянии. После приложения техногенного воздействия на внутрипластовую систему, в результате активного и диффузионного массопереноса в зону пласта дренируется техногенная вода, имеющая иной химический состав. В соответствии с законами фазового равновесия растворов, и химическое и термодинамическое равновесие системы нарушится, в результате могут проходить разнонаправленные процессы: образование твердой фазы на поверхности коллектора или ее растворение, химиче-

ские реакции, образование газовой фазы и разделительных пленок между газом и жидкостью – новых техногенных объектов, что приведет к увеличению числа внутрипластовых объектов в системе. Образование на поверхности коллектора солей в твердой фазе приведет к гидрофилизации его поверхности. Данный процесс неизбежно приведет к изменению химического состава внутрипластовых техногенных объектов и к перераспределению масс вещества между техногенными объектами внутрипластовой системы, изменению ее внутренней энергии и структуры. Исследование влияния ряда процессов, происходящих во внутрипластовой системе, приводящих к изменению химического состава ее объектов и свойств коллектора, остается за рамками данной статьи. Водоносные пласты с только гидрофобной поверхностью представить сложно, в них встречаются участки с гидрофильной поверхностью, что усложняет статическую модель внутрипластовой водоносной системы.

При техногенном воздействии на водоносный пласт часть техногенных объектов не может быть полностью переведена в подвижное состояние: это часть техногенной пластовой воды, часть газа разгазирования техногенной воды, часть техногенных разделительных пленок, часть газа разгазирования техногенных пленок и адсорбционных слоев. Техногенный адсорбционный слой на поверхности коллектора остается полностью неподвижным. В процессе дренирования подвижных техногенных объектов по порам разного сечения, с разной площадью поверхности вследствие их массообменного взаимодействия с подвижными и неподвижными техногенными объектами разного состава, постоянно изменяются составы, соотношения масс внутрипластовых объектов, скорости их движения. При образовании техногенных разделительных пленок изменяется внутренняя энергия внутрипластовой системы, происходит массоперенос вещества по пласту не только в сторону добывающей скважины, но и между разными объектами системы. Так как материалом для создания новых масс пленок в основном является техногенная вода, то при этом происходит изменение не только ее массы, но и химического состава. Аналогичные процессы происходят при разрушении части техногенных разделительных пленок.

При образовании газовой фазы в системе, в дополнение к имеющимся разделительным пленкам, происходит образование новых объектов – техногенных разделительных пленок, разделяющих поверхность коллектора и газ, жидкость и газ. Техногенные пленки, разделяющие разные объекты, имеют разные массы, толщины, химические составы. При дренировании газожидкостной смеси по поровому пространству с разными размерами пор масса, составы и площадь разделительных пленок, массы и составы техногенного газа и техногенной воды постоянно изменяются, следовательно, изменяется соотношение масс всех техногенных объектов. Изменение составов объектов приводит к изменению сил поверхностного натяжения между ними, что дополнительно изменяет внутреннюю энергию внутрипластовой системы и изменяет гидравлическое сопротивление перемещению дренируемых потоков в разных зонах пласта. Следовательно, все эти факторы приводят к непрогнозируемому изменению состава дренируемой газожидкостной смеси в локальных зонах пласта в процессе добычи воды.

В зону стягивания попадает только часть подвижных техногенных объектов: часть техногенной пластовой воды, часть газа разгазирования техногенных объектов и часть техногенных разделительных пленок. Данная газожидкостная смесь стягивается в пласте к добывающей скважине. Переход газожидкостной смеси из порового пространства в скважину является техногенным воздействием на нее. В момент перехода прекращается взаимодействие газожидкостной смеси с объектами внутрипластовой системы, поэтому с этого момента она не является частью внутрипластовой системы и, следовательно, дальнейшее ее изучение не характеризует техногенную внутрипластовую систему. В момент попадания газожидкостной смеси в свободный объем (скважину) изменяется ее внешняя структура – слияние пузырьков газа, капель жидкости с одновременным разрушением части разделительных пленок, что приводит к изменению масс, составов газа и жидкости данной смеси [6]. Здесь уместно отметить, что только с момента попадания этой смеси в скважину появляется возможность отбора ее проб.

По сложившейся терминологии при использовании однородной и изотропной модели пластовой воды отобранная проба данной газожидкостной смеси называется пробой «пластовой» воды. По терминологии при использовании неоднородной и неизотропной модели внутрипластовой системы данная проба является пробой извлеченной воды. Различия между пластовой и извлеченной водой заключаются в следующем: пластовая вода является одним из объектов природной внутрипластовой системы, находящейся в статическом квазиравновесном состоянии, а извлеченная вода – продукт техногенной деятельности, смесь неопределенных частей техногенных объектов техногенной системы, находящейся в динамическом неравновесном состоянии. С позиций вышеописанного подхода к изучению внутрипластовых водоносных систем и предложенной неоднородной и неизотропной модели внутрипластовой водоносной системы с гидрофобным коллектором можно объяснить различия химических составов проб «пластовой» воды, отобранных как из разных зон водоносного пласта, так и из одной скважины.

Выводы

1. Предложены природная и техногенная модели внутрипластовых водоносных систем, находящихся в гидрофобном коллекторе, с позиции которых объяснима имеющаяся экспериментальная информация о различиях химического состава проб «пластовой» воды.
2. Приведены причины различий химических составов проб «пластовой» воды, отобранных из разных скважин в процессе эксплуатации водоносного пласта.
3. Методики и пробоотборное оборудование, используемые для отбора проб «пластовой» воды, методики и лабораторное оборудование для изучения их составов разработаны в соответствии с однородной и изотропной моделью пластовой воды.
4. Не проведены комплексы работ по доказательству соответствия состава и свойств: проб «пластовой» воды по составу и свойствам пластовой воды; дренируемой по пласту техногенной воды по составу и свойствам пластовой воды.
5. Выявлено, что из скважин производится отбор проб извлеченной воды, а не пластовой воды.

Список использованных источников и литературы

1. *Мулюков, Т. Р.* Результаты анализа химического состава подземных вод нефтяных месторождений Западной Сибири. / Т. Р. Мулюков, В. Д. Сорокин // *Инновации. Интеллект. Культура. : матер. V междунар. науч.-практ. конф., посвященной 435-летию основания г. Тобольска, году Даниила Чулкова в г. Тобольске 22 апр. 2022 г. – Тюмень, 2022. – С. 39–43.*
2. *Сорокин, В. Д.* Анализ химического состава подземных вод нефтяных месторождений Западной Сибири. / В. Д. Сорокин, Т. Р. Мулюков // *Материалы междунар. науч.-практ. конф. им. Д. И. Менделеева. В 3 т. Т. 3. – Тюмень, 2023. – С. 216–219.*
3. *Сорокин, А. В.* Техногенные воздействия на пластовую водную систему / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // *Водные ресурсы – основа глобальных и региональных проектов обустройства России, Сибири и Арктики в XXI веке: нац. науч.-техн. конф. с междунар. участием 22 марта 2023 г. – Тюмень, 2023. – С. 86–96.*
4. *Сорокин, А. В.* Взаимодействующие объекты пластовых нефтяной и нефтегазовой залежей в гидрофильном и гидрофобном коллекторах / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // *Актуальные проблемы науки и техники : матер. II Междунар. науч.-техн. конф., посв. 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», Сарапул, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск, 2022. – С. 373–377.*
5. *Хуан, Янь-джан.* Микроскопическое исследование обратной конденсации и механизм фильтрации газоконденсатной системы / Янь-джан Хуан, Вей-яо Чжу // *Разработка газоконденсатных месторождений : междунар. конф. 1990 г. – Краснодар, 1990. – Т. 6. – С. 50–56.*
6. *Сорокин, А. В.* Изменение структуры и свойств водогазовой смеси при переходе из порового пространства в канал перфорации / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // *Водные ресурсы – основа глобальных и региональных проектов обустройства России, Сибири и Арктики в XXI веке : нац. науч.-техн. конф. с междунар. участием 22 марта 2023 г. – Тюмень, 2023. – С. 97–102.*

Сведения об авторах

Александр Владимирович Сорокин, генеральный директор ООО «Омега-К» (Россия, г. Тюмень), sorokin_omega@list.ru

Владимир Дмитриевич Сорокин, эксперт ООО «Омега-К» (Россия, г. Тюмень), sorokin_omega@list.ru

Анализ общих ошибок при использовании традиционных подходов к изучению внутрипластовых газожидкостных систем

А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин

Проанализированы традиционные подходы к получению информации о внутрипластовых газожидкостных системах, для их изучения использованы подходы, разработанные для изучения твердых тел. Перенос данного подхода на изучение внутрипластовых газожидкостных систем неправомерен по причине того, что в процессе изучения на них оказано техногенное воздействие, приводящее к изменению состава и свойств их объектов. Необходима разработка нового подхода к изучению внутрипластовых газожидкостных систем.

Ключевые слова: внутрипластовая газожидкостная система, состав, свойства, подход к изучению, техногенное воздействие.

Analysis of common errors when using traditional approaches to the study of intra-reservoir gas-liquid systems

A.V. Sorokin, V. D. Sorokin

The traditional approaches to obtaining information about intra-reservoir gas-liquid systems are analyzed, and approaches developed for the study of solids are used to study them. The transfer of this approach to the study of intra-layer gas-liquid systems is illegal due to the fact that in the process of studying them, technogenic effects have been exerted on them, leading to a change in the composition and properties of their objects. It is necessary to develop a new approach to the study of intra-reservoir gas-liquid systems.

Keywords: intra-reservoir gas-liquid system, composition, properties, approach to study, technogenic impact.

Работа выполнена в рамках общей задачи – разработки системного подхода к изучению внутрипластовых газожидкостных систем [1]. Целью работы является выявление влияния ошибочных представлений о внутрипластовой системе на процесс изучения составов и свойств ее объектов. Задачами, поставленными в данной работе, является проведение анализа традиционно используемых подходов, выявление их недостатков и формулирование основ нового подхода к изучению пластовых газожидкостных систем.

Пластовые газожидкостные системы состоят из определенного набора взаимодействующих объектов, в общем случае: коллектора, пластовой жидкости/газа, адсорбционных слоев, разделительных пленок, являющихся разделом несмешивающихся фаз [2]. При изучении внутрипластовых газожидкостных систем проботборным методом производится отбор подвижных частей внутрипластовых

объектов, например пробы адсорбционных слоев – неподвижных объектов системы не могут быть отобраны, поэтому их изучение остается за рамками возможностей традиционных методов изучения газожидкостных систем. То есть некорректна постановка задачи: изучать отдельные интересующие объекты, а не весь набор внутрипластовых объектов и без взаимосвязей между ними.

Природные внутрипластовые системы, находящиеся в твердом состоянии, многокомпонентные жидкости и газы, до техногенного воздействия на них, являются системами, находящимися в квазиравновесном состоянии. Это означает, что они в данный момент времени находятся в зоне действия стационарных полей определенных напряженностей (электромагнитных, тепловых, гравитационных и т. д.). Обмен с внешней средой происходит посредством изменения внутренней энергии внутрипластовой системы, изменений компонентного состава и массы системы за период наблюдения не происходит. На данный момент применяется научно необоснованно одинаковый подход к изучению ископаемых твердых тел и многокомпонентных внутрипластовых газожидкостных систем. Но процесс изучения последних имеет особенности, которые не учитываются при их исследовании газожидкостных систем, что приводит к возникновению ошибок. Применение подхода, разработанного для изучения твердых тел, к изучению газожидкостных систем приводит к возникновению ряда ошибок, имеющих разные основания. Для начала нужно разделить ошибки на группы. Первая группа объединяет ошибки, возникшие при некорректной постановке задачи, вторая группа – ошибки, возникшие при ее решении.

Основой первой группы ошибок является использование предельно упрощенной однородной и изотропной модели внутрипластовой системы, которая предполагает изучение не полного набора внутрипластовых объектов, а только имеющих практическое применение объектов. Как следствие, при применении данной модели не учитывается взаимодействие между внутрипластовыми объектами. При решении задачи изучаются отдельные объекты внутрипластовой системы (пластовая нефть, пластовая вода, пластовый газ), остальные внутрипластовые объекты (адсорбционные слои, разделительные пленки) остаются за границами интересов ученых и практиков. То есть первой ошибкой является неверно сформулированная и поставленная задача – изучить внутрипластовый объект без взаимодействия с другими объектами или проигнорировав результаты их межобъектного взаимодействия. На данном этапе в такой постановке задача не может быть решена по причине отсутствия экспериментальных возможностей. Вторая методическая ошибка заключается в том, что изучается внутрипластовая система, выведенная из статического квазиравновесного состояния, находящаяся в динамическом неравновесном состоянии, а результаты изучения последней без обоснования переносятся на статическую систему.

Ко второй группе ошибок относятся ошибки, обусловленные научно необоснованным переносом методов и средств, разработанных для изучения твердых тел, на газожидкостные системы многокомпонентного состава. Залежи природ-

ных твердых тел (руд, каменных углей, нерудных ископаемых), до техногенного воздействия также можно считать находящимися в квазиравновесном состоянии. При вскрытии пласта, отборе проб и дальнейшем изучении состава и свойств образцов твердых тел система переходит в открытое состояние. Отбор пробы из внутрипластовой системы является одним из видов техногенного воздействия на нее. Если внешние техногенные воздействия, произошедшие при отборе и хранении образца, не приводят к изменению его свойств, например не превышают предела упругости материала и не происходит изменения состава или свойств образца в результате взаимодействия с окружающей средой, то можно считать, что новая система (образец) хоть и стала открытой и находится под воздействием изменяющихся напряженностей полей и контакта с внешними агентами при транспортировке, хранении и изучении образца, но не изменит свои первоначальные состав и свойства. Далее производится изучение образца, и полученная информация о его составе и свойствах переносится на первоначальную внутрипластовую систему, из которой отобран данный образец. При отсутствии влияния граничных условий (трещин, разломов) в случае однородности системы такой подход к получению информации о составе и свойствах твердых тел внутрипластовых систем, в большинстве случаев, можно считать оправданным по следующим основаниям:

- изучается только один объект, совпадающий с системой;
- атомы и молекулы твердых тел в результате приложенного к системе техногенного воздействия не меняют места первоначального расположения;
- изменение внутренней энергии атомов или молекул образца не приводит к критическому изменению состава и значений его свойств.

Рассмотрим внутрипластовую систему, в поровом пространстве которой содержатся многокомпонентные жидкости и/или газы, например водоносный, водонефтяной или водогазовый пласты. В этом случае с точки зрения изучения имеем более сложную систему. Теперь в задачу входит необходимость проведения изучения не только твердого тела (коллектора), но и вмещающих жидкостей и газов. Поэтому задача усложняется – необходимо провести изучение системы, состоящей из нескольких объектов, с учетом взаимодействий между ними. Если в результате внутрипластового техногенного воздействия на систему при отборе керна и внепластового техногенного воздействия – получении образца из него, предназначенного для исследований его свойств, величина внешнего давления или внутренних напряжений превысит пределы упругости материала, то в результате возникновения трещин изменится величина удельной площади поверхности керна/образца. При контакте вновь образованной поверхности с вмещающими жидкостями и газами за счет действия сорбционных процессов изменятся как свойства керна/образца, так и свойства насыщающих его жидкостей и газов. То есть одной из множества причин изменения состава и свойств вмещающих жидкостей и газов является изменение свойств твердого тела. В процессе транспортировки и хранения керна он контактирует с внешней средой, которая окажет техногенное воздействие на состав и свойства содержащихся в его

поровом пространстве многокомпонентных жидкостей/газов. В результате возникает необходимость доказывать соответствие характеристик керна и находящихся в нем жидкостей/газов соответствующим объектам исходной внутрипластовой системы. В практике изучения газожидкостных систем этот этап не практикуется по причине отсутствия задачи в такой постановке.

Для организации движения жидкостей/газов в поровом пространстве на внутрипластовую систему оказывается значительное количество видов внутрипластовых техногенных воздействий [3]. Внутрипластовая система становится неравновесной, и в результате массообменных процессов между внутрипластовыми объектами происходит изменение составов всех внутрипластовых объектов. Атомы и молекулы жидкостей и газов в результате приложенного к системе техногенного воздействия изменяют места первоначального расположения и перераспределяются между объектами системы, изменяя составы внутрипластовых объектов. В результате производится изучение неравновесной техногенной внутрипластовой системы с и непрерывным изменением составов ее объектов. При неоднократных отборах проб, извлеченных из пласта жидкостей/газов из таких систем, составы их проб различаются, что многократно подтверждается результатами экспериментов [4].

Внешнее техногенное воздействие на внутрипластовую систему является фактором, выводящим исходную систему из квазиравновесного состояния, изменяет ее внутреннюю энергию, следовательно, и внутреннюю энергию атомов или молекул, из которых состоят внутрипластовые объекты системы, что в свою очередь, запускает массообменные процессы перераспределения вещества между объектами, что приводит к изменению их составов. Этот факт необходимо учитывать при изучении такого рода систем. Техногенное воздействие на внутрипластовую газожидкостную систему исключает возможность получения первоначальных составов объектов до техногенного воздействия на нее. Изучение подобных систем необходимо проводить методами, не оказывающими техногенного воздействия на систему.

При решении задачи изучения составов и свойств жидкостей и газов, находящихся в поровом пространстве, используются только пробные методы, основанные на предположении, что представительные пробы интересующих объектов можно отобрать в отрыве от других объектов системы. Процесс отбора проб жидкостей и газов имеет следующие отличия от процесса отбора проб твердых тел: во-первых, необходимостью вывода жидкости или газа из порового пространства [5]; во-вторых, организацией процесса перевода жидкости/газа в пробоотборное устройство; в-третьих, наличием пробоотборного устройства; в-четвертых, наличием сосудов для отбора и хранения отобранных проб. На всех этапах процесса отбора проб на пробу жидкости/газа оказываются разные виды внепластового техногенного воздействия.

Многочисленные внепластовые техногенные воздействия, оказанные на пробу жидкости/газа, можно разделить на три группы: при вводе пробы в пробоотборное устройство, при нахождении ее в пробоотборном устройстве, при выводе пробы из него для хранения и дальнейших исследований.

Практически не изучены вопросы, касающиеся влияния техногенного воздействия, оказываемого на пробу жидкости/газа, приводящие к изменению ее состава и свойств при ее отборе. Для отбора проб жидкости/газа используются разные варианты методики отбора части изучаемого объекта. Техногенное воздействие на отбираемую пробу жидкости/газа возникает в процессе ввода части изучаемого объекта в пробоотборное устройство. В результате этого действия изменяются граничные условия нахождения пробы, она теряет связь со всеми объектами внутрислоевого системы. В пробоотборное устройство вводится часть объекта, причем с неконтролируемой скоростью. В работе [6] приведены условия, соблюдение которых позволит отобрать пробу жидкости с составом, соответствующим составу жидкости, из которой она отобрана. Однако невозможно обеспечить и проконтролировать соблюдение этих условий при использовании известных методов и пробоотборного оборудования. Следовательно, предположение о равенстве составов исходной жидкости и отобранной из нее пробы доказать невозможно, что подтверждается результатами анализа исследований химического состава проб извлеченной воды [7,8] и компонентного состава проб извлеченной нефти [4] при неоднократных и последовательных их отборах.

После ввода пробы воды в пробоотборное устройство или лабораторное оборудование, изменяются граничные условия нахождения пробы жидкости/газа и внутренняя энергия их молекул и атомов, находящихся в пробе веществ, они начинают взаимодействовать с поверхностями оборудования. Взаимодействие может быть физическим и химическим, то и другое приводит к изменению состава пробы жидкости/газа.

Вследствие неизвестности химического состава жидкости/газа заранее невозможно подобрать оборудование с химически инертными поверхностями. Поэтому возникает проблема: не зная состав исходной жидкости/газа, какое необходимо использовать оборудование для их отбора пробы с целью качественного определения состава? Химическое взаимодействие пробы жидкости/газа с поверхностями оборудования изменит содержание компонентов, имевшихся в ней, и добавит новые соединения, образованные в результате химических реакций.

При нахождении пробы жидкости/газа в оборудовании не удастся избежать физического взаимодействия пробы с поверхностями оборудования, оно описывается следующей моделью. В результате адсорбционных процессов молекулы жидкости/газа взаимодействуют с молекулами поверхностей оборудования с образованием новых объектов. При взаимодействии поверхности и молекул веществ, находящихся в пробе, поверхности для одних веществ – фильные, для других – фобные. Поэтому разные вещества, находящиеся в жидкости/газе, избирательно взаимодействуют с поверхностями оборудования сложного состава, что приведет к изменению состава пробы жидкости/газа. В результате, часть веществ пробы, энергия связей молекул которых с поверхностью выше, чем с остальными молекулами жидкости пробы, после взаимодействия образует на фильных поверхностях оборудования адсорбци-

онный слой, который, во-первых, имеет состав, отличающийся от состава жидкости пробы, во-вторых, приведет к изменению состава жидкости/газа пробы, в-третьих, останется на поверхностях оборудования при переводе пробы жидкости/газа в другой сосуд, что приведет к изменению состава жидкости/газа в другом сосуде и т. д.

Между фобными поверхностями оборудования и жидкостью образуются техногенные разделительные пленки. В пробе жидкости может присутствовать газовая фаза внешнего и/или внутреннего происхождения. Газовая фаза в пробоотборном оборудовании предопределяет наличие в системе еще нескольких техногенных объектов, а именно, техногенных разделительных пленок, являющихся границами разделов: жидкости и газа, жидкости и фобных поверхностей оборудования, то есть части объектов, не присутствовавших в жидкости вне пробоотборного оборудования. В итоге, в оборудовании находится система со следующим набором техногенных объектов: жидкость и газ с измененными составами, адсорбционные слои на фильных поверхностях, разделительные пленки на фобных поверхностях. Компонентные составы и массы всех техногенных объектов, во-первых, разные и, во-вторых, неизвестны.

Поверхности оборудования, где находится проба жидкости/газа, могут иметь такие составы, в которых могут раствориться отдельные компоненты жидкости/газа или, наоборот, перешедшие в жидкость/газ из элементов оборудования, что приведет к изменению концентрации компонентов жидкости/газа пробы.

Таким образом, внутри каждого оборудования формируются свои многообъектные системы, состоящие из разных объектов техногенного происхождения. По этой причине жидкость/газ, находящиеся внутри оборудования, нельзя считать пробой жидкости/газа, из которых они отобраны. Каждую из этих систем необходимо рассматривать как независимую.

Вывод жидкости/газа из оборудования и процесс лабораторных определений их составов описывается следующей динамической моделью. При выводе жидкости/газа (еще один вид техногенного воздействия на систему, находящуюся внутри оборудования), часть объектов останется полностью неподвижной (адсорбционные слои), часть объектов приобретет подвижность частично (часть разделительных пленок) и не могут быть выведены из него. По этой причине компонентный состав выведенной из оборудования жидкости не тождественен ни компонентному составу введенных в оборудование жидкости/газа, ни компонентному составу жидкости/газа, находившихся внутри оборудования. При неоднократных переводах жидкости/газа между разным оборудованием, на компонентах с разной концентрацией эти процессы отразятся избирательно. Макроконцентрации компонентов изменятся незначительно, в большей степени эти процессы отразятся на компонентах в микроконцентрациях. При лабораторных исследованиях составов жидкости/газа их объем делят на части, этот процесс также оказывает техногенное воздействие на них, причем разное для каждой части. Определение каждого параметра проводится по разным методикам, с переводом в разное оборудо-

вание, перевод каждой части в которое, сам процесс исследования, также оказывает техногенное воздействие на каждую часть. Следовательно, определение разных параметров проводится не для одной, а для разных частей объема жидкости/газа, каждая из которых имеет свой уровень накопленного техногенного воздействия. При этом бездоказательно считается, что состав и свойства проб жидкости/газа в процессе изучения остаются неизменными, авторам неизвестны работы, в которых экспериментально изучался этот вопрос. Таким образом, еще одним ошибочным представлением является то, что отобранная проба жидкости/газа остается неизменной в процессах ее отбора, хранения и изучения. Следовательно, применение данного подхода – отбора проб жидкости/газа и их изучение вне условий системы, из которой они отобраны, не может дать объективных представлений о компонентном составе жидкости/газа исходной системы.

Вышеописанные процессы, происходящие при вводе, нахождении и при выводе жидкости/газа из оборудования, остаются за рамками интересов исследователей, и их влияние на компонентный состав проб жидкости/газа не изучено по причинам отсутствия знаний в данной области и не осознания наличия таких проблем. В итоге, вся полученная в результате изучения проб жидкости/газа информация сводится воедино и бездоказательно приписывается исходной системе, из которой проведен отбор пробы жидкости/газа.

На данный момент при изучении внутрипластовых многокомпонентных газожидкостных систем применяется именно вышеприведенный подход – изучение неравновесной техногенной газожидкостной системы пробными методами. При отборе проб жидкостей и газов из внутрипластовых систем и дальнейшем изучении составов и свойств их проб пропускаются этапы доказательности соответствия отобранных проб исходным объектам и неизменности пробы в процессах ее отбора, хранения, изучения. В данном случае применение пробоотборного метода к изучению газожидкостных систем, без доказательств идентичности состава пробы составу исходной системы, уже нельзя считать оправданным.

Главным недостатком пробного метода изучения многокомпонентных газожидкостных систем является то, что он не учитывает внутрипластовые техногенные воздействия на исходную систему, предшествующие отбору проб из нее. По этой причине пробный метод неприменим для изучения таких систем. Поэтому результаты изучения проб нельзя переносить на природные и техногенные объекты таких систем. Анализ вышеизложенного не дает оснований для сопоставления и совместного анализа всего объема полученной информации о составе разных проб жидкости/газа, даже отобранных из одного источника. Процесс изучения многокомпонентных газожидкостных систем должен проводиться методами, которые позволяют проводить изучение состава объектов и измерение всех параметров системы в ненарушенном природном ее состоянии.

Накопленные неопределенные ошибки, привнесенные в результаты исследований состава и свойств при многократных техногенных воздействиях разного

уровня сначала на внутрипластовую систему, а затем и на отобранную пробу, ставят под сомнение достоверность полученной информации о составах и свойствах проб «пластовых» жидкостей и газов. Анализ вышеизложенного не дает оснований для сопоставления и совместного анализа всего объема полученной информации о составе и свойствах объектов внутрипластовых газожидкостных систем. Поэтому отождествление состава и свойств изученных проб составу и свойствам объектов исходной внутрипластовой системы нельзя считать оправданным.

В результате анализа подхода к изучению многокомпонентных внутрипластовых газожидкостных систем выявлено, что используется те же методы, что и при изучении систем, находящихся в твердом состоянии, но приводящие к многочисленным методическим ошибкам. Для получения объективной информации о структуре внутрипластовых газожидкостных многокомпонентных систем, составах и свойствах ее объектов необходима разработка иного подхода, исключающего техногенное воздействие на внутрипластовую систему с применением беспробных методов ее изучения.

Список использованных источников и литературы

1. *Сорокин, А. В.* Системный подход к изучению пластовой нефти / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Современные технологии нефтегазовой геофизики : междунар. науч.-практ. конф. 16–17 мая 2019 г. – Тюмень, 2019. – С. 124–134.
2. *Сорокин, А. В.* Взаимодействующие объекты пластовых нефтяной и нефтегазовой залежей в гидрофильном и гидрофобном коллекторах / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Актуальные проблемы науки и техники: матер. II Междунар. науч.-техн. конф., посв. 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», Сарапул, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск, 2022. – С. 373–377.
3. *Сорокин, А. В.* Обзор техногенных воздействий на пластовую систему при добыче трудноизвлекаемых запасов нефти / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Современные технологии нефтегазовой геофизики: нац. науч.-практ. конф. 19–20 мая 2022 г. – Тюмень, 2022. – С. 98–111.
4. *Бутакова, Т. А.* Результаты анализа экспериментальной информации о физико-химических свойствах нефти, используемых для подсчета ее запасов / Т. А. Бутакова, А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Информационные системы и технологии в геологии и нефтегазодобыче: междунар. науч.-техн. конференция 11–12 нояб. 2021 г. – Тюмень, 2022. – С. 91–100.
5. *Сорокин, А. В.* Изменение структуры и свойств водогазовой смеси при переходе из порового пространства в канал перфорации / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Водные ресурсы – основа глобальных и региональных проектов обустройства России, Сибири и Арктики в XXI веке: нац. науч.-техн. конф. с междунар. участием 22 марта 2023 г. – Тюмень, 2023. – С. 97–102.
6. *Сорокин, В. Д.* Обеспечение изокINETических условий отбора проб при исследованиях газоконденсатных скважин // Проблемы геологии и разработки нефтяных месторождений Западной Сибири : труды СибНИИНП. – Тюмень, 1990. – С. 192–196.

7. *Мулюков, Т. Р.* Результаты анализа химического состава подземных вод нефтяных месторождений Западной Сибири / Т. Р. Мулюков, В. Д. Сорокин // Инновации. Интеллект. Культура : матер. V междунар. науч.-практ. конф., посвященной 435-летию основания г. Тобольска, году Даниила Чулкова в г. Тобольске 22 апр. 2022 г. – Тюмень, 2022. – С. 39–43.

8. *Сорокин, В. Д.* Анализ химического состава подземных вод нефтяных месторождений Западной Сибири / В. Д. Сорокин, Т. Р. Мулюков // Материалы междунар. науч.-практ. конф. им. Д. И. Менделеева. В 3 т. Т. 3. – Тюмень, 2023. – С. 216–219.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Сорокин, генеральный директор ООО «Омега-К» (Россия, г. Тюмень), sorokin_omega@list.ru

Владимир Дмитриевич Сорокин, эксперт ООО «Омега-К» (Россия, г. Тюмень), sorokin_omega@list.ru

Анализ методологических и методических подходов к отбору и исследованию проб «пластовой» воды

А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин

Проведен анализ методов отбора проб воды из скважин. Даны качественные оценки влияния процессов отбора проб извлеченной воды и их дальнейшего изучения на результаты исследования проб. Сделан вывод о том, что пробы извлеченной воды из скважины отобраны из техногенной внутрипластовой системы с измененными свойствами пластовых объектов вследствие техногенного воздействия, оказанного на внутрипластовую систему. Отождествлять состав и свойства пластовой воды и извлеченной воды из скважины нет оснований.

Ключевые слова: пластовая вода, извлеченная вода, отбор проб, методы, пробоотборник, неравновесная система, техногенное воздействие, состав, свойства.

Analysis of methodological and methodical approaches to the selection and study of samples of "reservoir" water

A. V. Sorokin, V. D. Sorokin

The analysis of methods of sampling water from wells is carried out. Qualitative assessments of the influence of the processes of sampling extracted water and their further study on the results of the study of samples are given. It is concluded that samples of extracted water from the well were taken from a technogenic intra-reservoir system with altered properties of reservoir objects due to the technogenic impact on the intra-reservoir system. There is no reason to identify the composition and properties of reservoir water and extracted water from the well.

Keywords: reservoir water, extracted water, sampling, methods, sampler, nonequilibrium system, technogenic impact, composition, properties.

Вода является самым распространенным объектом потребления человечеством, для ее эффективного использования необходимо знать ее химический состав и свойства, получаемые в результате ее изучения. Цель статьи – показать несовершенство существующих подходов к изучению внутрипластовых водных систем. Для водных систем, находящихся в свободном объеме, например в открытых водоемах, в которых граничные условия (дно, поверхность водоема) можно считать не влияющими на внутреннюю энергию молекул воды вдали от них. Поэтому такая водная система с приемлемой для практики точностью может быть описана однородной и изотропной моделью с одним объектом – свободной водой.

Внутрипластовые водные системы, находящиеся в поровом пространстве коллектора, описываются многообъектными моделями. До техногенного воздействия природная внутрипластовая водная система состоит из следующих

объектов: коллектора, природной пластовой воды с растворенными в ней солями, газами и т. д., природных адсорбционных слоев на поверхности коллектора, природных разделительных пленок и находится в квазиравновесном состоянии. Природная пластовая вода в пласте может иметь внутреннюю структуру [1]. В поровом пространстве молекулы водных растворов взаимодействуют с молекулами других объектов внутрипластовой водной системы: молекулами адсорбционных слоев, расположенными на поверхности коллектора, молекулами разделительных пленок [2]. Состав и свойства адсорбционных слоев, разделительных пленок и пластовой воды имеют разные значения, массы этих объектов могут иметь один порядок (в зависимости от свойств коллектора). Поэтому в разных точках порового пространства с разными значениями свойств коллектора, составы и свойства пластовой воды имеют разные значения.

В процессе добычи воды на внутрипластовую систему оказывается значительное количество видов техногенных воздействий [3]. В результате техногенного воздействия на внутрипластовую систему, начиная с буровых работ, она выводится из квазиравновесного состояния, становится неравновесной. В ней возникают процессы, стремящиеся вернуть систему в новое состояние равновесия, за счет перераспределения энергии и компонентов между взаимодействующими объектами, что, в свою очередь, приводит к изменению: структуры техногенной воды; внутренней энергии молекул поверхности коллектора и остальных внутрипластовых объектов; составов: техногенной воды, адсорбционных слоев и разделительных пленок, а следовательно, к изменению значений свойств всех пластовых объектов. В результате происходящих изменений природные пластовые объекты изменяют свои массы, составы и значения свойств и не могут более считаться природными объектами, становятся техногенными, и вся система преобразуется в техногенную внутрипластовую водную систему. Приложение техногенного воздействия к внутрипластовой системе не приводит к дренированию всех объектов техногенной пластовой системы. Часть из них остается полностью неподвижной (коллектор, техногенные адсорбционные слои), часть приобретает частичную подвижность (техногенная вода, техногенные разделительные пленки). Подвижные объекты движутся по порам разного размера, при этом в каждой поре изменяется соотношение масс воды, адсорбционных слоев, разделительных пленок и внутренняя энергия их молекул. Вследствие массообменных процессов и изменения внутренней энергии системы происходит перераспределение молекул между техногенными: водой, адсорбционными слоями и разделительными пленками, что постоянно при дренировании объектов приводит к изменению их составов. После попадания техногенной воды из пласта в скважину прекращается взаимодействие ее молекул с поверхностью коллектора, другими неподвижными объектами внутрипластовой системы. В процессе перехода масса разделительных пленок существенно уменьшится, их компоненты перейдут в техногенную воду с возможным появлением газовой фазы, изменяя состав и внутреннюю энергию молекул объектов. Следовательно, извлеченная из пласта вода потеряла связь с остальными внутри-

пластовыми объектами, стала внепластовым объектом, в отличие от пластовой воды, которая является объектом природной внутрипластовой системы. Поэтому воду, попавшую из пласта в скважину, нельзя считать природной внутрипластовой (за исключением воды мономолекулярного состава) по причине ее неравновесности, влекущей за собой непрерывное изменение ее состава и значений свойств. Эта вода имеет техногенное происхождение, что влечет использование иной терминологии, других методов отбора проб, применения соответствующего методам пробоотборного оборудования, изменения методов анализа полученных результатов. Пробу воды, отобранной из скважины, по аналогии со сложившейся нефтяной терминологией, следует называть пробой извлеченной воды [4], а не пробой пластовой воды. Состав и свойства проб извлеченной воды зависят от большого количества факторов: изначального состава и свойств пластовой воды, свойств коллектора, совокупности техногенных воздействий на внутрипластовую систему, методов отбора проб, методов и средств для изучения ее состава, свойств и т. д.

Наиболее распространенным методом изучения состава и свойств извлеченной воды является исследование ее проб. Методики отбора проб различной воды можно разделить по их особенностям на три группы. Методики для отбора проб: с поверхности открытых водоемов, из глубин открытых водоемов и из скважин. Для всех случаев состояние водных систем, из которых проводится отбор проб, необходимо характеризовать как неравновесное. По этой причине внедрение пробоотборного устройства в водную систему дополнительно усиливает техногенное воздействие на нее и ставит вопрос представительности отбираемой пробы. Задачами статьи являются проведение анализа методов отбора проб и анализа влияния техногенного воздействия на объективность информации о составе проб извлеченной воды, отбираемой из скважин.

Широко применяемое пробоотборное оборудование, используемое для отбора глубинных проб воды из скважин, основано на разных конструктивных решениях (проточные и непроточные конструкции). Применение устройств с разными конструкциями может дать различные результаты изучения составов проб извлеченной воды. Величина давления открытия/закрытия впускных и выпускных клапанов устанавливается при подготовке пробоотборника к работе. Глубинные пробоотборные устройства имеют ряд недостатков:

- при неизвестной плотности водного раствора открытие и закрытие клапанов пробоотборника произойдет на неизвестной глубине;
- особенности механической конструкции приводов клапанов пробоотборного устройства позволяет им неконтролируемо срабатывать при разных давлениях (на разных глубинах);
- имеющиеся конструкции пробоотборников исключают возможность пропорционального отбора разных фаз исследуемой среды в одно пробоотборное устройство;
- избирательная сорбционная способность поверхностей материалов пробоотборного оборудования к разным веществам приводит к изменению состава пробы воды.

Наличие в воде свободного газа в зоне отбора накладывает на пробоотборное оборудование дополнительные ограничения. Анализ конструкций пробоотборного оборудования позволяет сделать вывод о том, что для отбора проб двухфазных сред применяемое оборудование не разрабатывалось под эти задачи, а используется имеющееся. Для известных конструкций пробоотборных устройств при наличии газовой фазы в отбираемой среде невозможно организовать пропорциональное попадание обеих фаз в пробоотборник, что неизбежно приведет к непредставительности пробы воды [5]. В этом случае для отбора проб воды со свободной газовой фазой необходимо использование конструкций пробоотборного оборудования, специально разработанных для решения этой задачи.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос постоянства состава извлеченной воды в точке отбора проб. Например, при анализе баз данных о составах «пластовой» воды обнаружено, что различия концентраций одних и тех же ионов в воде одного пласта различаются на несколько порядков [6]. Если несколько отобранных проб воды из одной точки и в одно время имеют разные составы (что экспериментально обнаруживается в большинстве случаев), различия между которыми превышают погрешность измерений, то можно констатировать: либо методика отбора проб некорректна, т. е. не обеспечивает представительность пробы, либо изучаемый объект в процессе отбора проб так изменяется, что отобранная проба характеризует его динамическое состояние исключительно в точке отбора и в момент отбора. В случае нестационарности и динамического состояния среды отбор нескольких проб не дает представления о ее состоянии в процессе изучения. В итоге, можно констатировать, что существующий подход к отбору проб (отбор единичных проб) подходит для исследования статичных, стационарных систем.

Отбор пробы извлеченной воды из скважины является технологической операцией и, следовательно, одним из видов техногенного воздействия на отобранную пробу, в результате которого происходит дальнейшее изменение состава и свойств пробы извлеченной воды. В процессе проведения исследовательских работ проба извлеченной воды разделяется на части, которые из пробоотборника переводятся в разное исследовательское оборудование с оказанием разного и неконтролируемого техногенного воздействия на них. Разные части пробы извлеченной воды отличаются по своему составу и свойствам вследствие разного уровня техногенного воздействия на них. В результате, каждый показатель определяется для своей измененной части пробы извлеченной воды. Далее показатели, определенные для разных частей пробы извлеченной воды, сводятся в один массив информации и бездоказательно приписываются конкретной пробе извлеченной воды и затем также, без веских оснований, состав и свойства пробы извлеченной воды отождествляются с составом и свойствами пластовой воды.

Поскольку применяемое пробоотборное и исследовательское оборудование не разработано под решение задачи – отбор проб воды из пористой среды, а использовано разработанное для отбора проб и исследования состава и свойств мономолекулярных жидкостей в свободном объеме, то необходимо обозначить

следующую проблему. Пластовая вода имеет полимолекулярный состав, часть компонентов содержится в ней в микроконцентрациях. После попадания подобной воды в пробоотборное устройство часть этих компонентов может адсорбироваться его поверхностью и при переводе пробы воды из пробоотборника частично остаться на ней. Для исключения влияния взаимодействия любых компонентов, находящихся в отобранной пробе, с поверхностями пробоотборника и исследовательского оборудования на изменение состава пробы все элементы поверхностей, с которыми контактирует проба воды, должны быть фобными к любым компонентам, содержащимся в ней. В другом случае необходимо изучать данный вопрос и вносить коррективы в результаты исследований. По этой причине можно констатировать, что требования к пробоотборному оборудованию, отраженные в нормативной документации (ГОСТ 17.1.5.05, ГОСТ Р 51592), носят общий характер.

Выводы

- при изучении внутрипластовых водных систем из них производится отбор проб извлеченной воды, а не пластовой воды;
- используемое пробоотборное оборудование не позволяет получить представительную пробу извлеченной воды;
- используемые методы и оборудование для изучения состава и свойств проб воды оказывают неконтролируемое техногенное воздействие на изучаемый объект;
- использование адекватной модели внутрипластовой водной системы даст возможность получить более объективную информацию об изучаемых объектах.

Список использованных источников и литературы

1. Хуан, Янь-джан. Микроскопическое исследование обратной конденсации и механизм фильтрации газоконденсатной системы / Янь-джан Хуан, Вей-яо Чжу // Разработка газоконденсатных месторождений : междунар. конф. 1990 г. – Краснодар, 1990. – Т. 6. – С. 50–56.
2. Сорокин, А. В. Взаимодействующие объекты пластовых нефтяной и нефтегазовой залежей в гидрофильном и гидрофобном коллекторах/ А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Актуальные проблемы науки и техники : матер. II Междунар. науч.-техн. конф., посв. 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», Сарапул, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск, 2022. – С. 373–377.
3. Сорокин, А. В. Статическая модель пластовой нефти для подсчета запасов углеводородов/ А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Современные технологии нефтегазовой геофизики : междунар. науч.-практ. конф. 16–17 мая 2019 г. – Тюмень, 2019. – С. 134–142.
4. Sorokin, A. V. Information structure of in-situ oil/ A. V. Sorokin, V. D. Sorokin – Text: direct// ROGTEC. - 2007. - № 8. - P .12-20.

5. *Сорокин, В. Д.* Обеспечение изокINETических условий отбора проб при исследованиях газоконденсатных скважин // Проблемы геологии и разработки нефтяных месторождений Западной Сибири: труды СибНИИ НП. – Тюмень, 1990. – С. 192–196.

6. *Мулюков, Т. Р.* Результаты анализа химического состава подземных вод нефтяных месторождений Западной Сибири / Т. Р. Мулюков, В. Д. Сорокин // Инновации. Интеллект. Культура : матер. V междунар. науч.-практ. конф., посвященной 435-летию основания г. Тобольска, году Даниила Чулкова в г. Тобольске 22 апр. 2022 г. – Тюмень, 2022. – С. 39–43.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Сорокин, генеральный директор ООО «Омега-К» (Россия, г. Тюмень), sorokin_omega@list.ru

Владимир Дмитриевич Сорокин, эксперт ООО «Омега-К» (Россия, г. Тюмень), sorokin_omega@list.ru

Обзор техногенных воздействий на пластовую водогазовую систему при добыче газа

А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин

Приведен обзор техногенных воздействий на внутрипластовые системы, содержащие водогазонасыщенные толщины при разработке этих залежей. Показано, что в процессе разработки водогазовой залежи на нее оказано значительное количество видов техногенных воздействий, которые приводят к заметному изменению состава и свойств пластовых объектов. Сделан вывод о том, что объективная информация о составе, свойствах и подсчетных параметрах пластового газа отсутствует.

Ключевые слова: техногенное воздействие, запасы газа, внутрипластовая система, пластовый газ, техногенный газ, состав, свойства, подсчетные параметры, техногенный объект.

Overview of technogenic impacts on the reservoir water and gas system during gas production

A.V. Sorokin, V. D. Sorokin

An overview of technogenic impacts on intra-reservoir systems containing water-gas-saturated thicknesses during the development of these deposits is given. It is shown that during the development of a water-gas deposit, a significant number of types of technogenic impacts have been exerted on it, which lead to a noticeable change in the composition and properties of reservoir objects. It is concluded that there is no objective information about the composition, properties and calculation parameters of the reservoir gas.

Keywords: technogenic impact, gas reserves, intra-reservoir system, reservoir gas, technogenic gas, composition, properties, calculation parameters, technogenic object.

В процессе подсчета запасов углеводородов водогазовых залежей, выявляются проблемы получения обоснованных подсчетных параметров, основанных на значениях свойств углеводородов, которые также применяются в качестве параметров при создании гидродинамической модели вытеснения углеводородов из залежи и расчета ее добычных возможностей. При разработке водогазовых залежей на пластовую систему оказывается широкий спектр техногенных воздействий, которые заключаются в проведении буровых работ, освоении скважин, организации притока, закачки вытесняющих агентов и поверхностно активных веществ, обработки призабойной зоны, глушении скважины при ремонтных работах, использовании методов повышения газоотдачи, при гидроразрыве пласта и т. д.

На разных этапах разработки водогазовой залежи часть или все эти техногенные воздействия предшествуют процессу отбора проб газа, который сам по

себе также является техногенным воздействием на внутрипластовую систему и на пробу. При транспортировке, хранении, изучении состава и свойств пробы газа на нее оказывается еще ряд внепластовых техногенных воздействий. Так как целью исследований состава и свойств проб газа является получение характеристик пластового газа, которые были у него до техногенного воздействия, возникает вопрос: что характеризуют полученные параметры отобранной пробы газа?

Целями данной работы являются: проведение обзора, обобщение, установление последовательности комплекса техногенных воздействий на пластовую водогазовую систему и оценка его влияния на нее в период от бурения скважины до отбора пробы газа на любой стадии разработки газовой залежи. Реализация поставленных целей решается в рамках неоднородной и неизотропной модели внутрипластовой водогазовой системы [1].

Всем природным пластовым углеводородным системам, содержащим газ, присущ определенный набор взаимодействующих объектов [1]. Для водогазовой залежи с гидрофильно-гидрофобным коллектором набор взаимодействующих объектов природной внутрипластовой системы исчерпывается следующим списком: пластовый газ, пластовая вода в водо- и газонасыщенных толщинах, адсорбционные слои воды на гидрофильной поверхности коллектора, адсорбционные слои углеводородов на гидрофобной поверхности коллектора водо- и газонасыщенных толщин и разделительные пленки в водо- и газонасыщенных толщинах залежи. Выделение адсорбционных слоев воды и углеводородов, разделительных пленок в водо- и газонасыщенных толщинах обусловлено их различными составами в этих толщинах. Массы природных внутрипластовых объектов водогазовой залежи могут иметь один порядок.

Природная внутрипластовая водогазовая система до техногенного воздействия находится в квазиравновесном состоянии, это означает, что она находится в зоне действия стационарных полей определенных напряженностей (электромагнитных, тепловых, механических и т. д.). Обмен с внешней средой происходит посредством изменения внутренней энергии пластовой системы, изменения компонентного состава и массы системы не происходит.

После начала техногенного воздействия на внутрипластовую систему она переходит в открытое состояние. В процессе проведения буровых работ, освоения скважин, работ по отбору проб, добыче газа, на водогазовую залежь в разные периоды оказывается значительный ряд техногенных воздействий разного уровня, в результате которых внутрипластовая система выводится из состояния термодинамического и химического равновесий. Часть видов техногенных воздействий имеет локальный и кратковременный характер, например действия и процессы при проведении буровых работ и освоении скважин ограничиваются призабойной зоной залежи, техногенные воздействия при разработке залежи охватывают значительную ее часть и действуют на протяжении всего периода разработки. На этом этапе в залежи происходят фазовые переходы, организуются массообменные процессы, образуются новые техногенные объекты, изменяются массы, составы всех внутрипластовых объектов, внутренняя энергия,

структура и масса внутрипластовой системы. Она становится неравновесной, и, в конечном счете, в зону стягивания попадает не пластовый газ, а техногенный газ, состав и значения свойств которого не соответствуют составу и значениям свойств пластового газа [1–3]. Техногенным воздействием внутрипластовая система переводится в неравновесное, динамическое состояние.

Наиболее полный список видов техногенных воздействий, оказываемый на внутрипластовую водогазовую систему, приведен в работе [4]. Ниже систематизированы виды техногенных воздействий, оказывающие влияние на разрабатываемые водогазовые пластовые системы, приведены последствия данных воздействий, для этого использована следующая терминология.

Техногенное воздействие на внутрипластовую систему – любое воздействие человеческой деятельности на внутрипластовую систему, приводящее к изменению хотя бы одного из показателей: значения свойства, состава, структуры, внутренней энергии, массы ее объекта (ов).

Техногенная внутрипластовая система – неравновесное состояние внутрипластовой системы, вызванное техногенным воздействием на нее, которое отличается от квазиравновесного состояния природной пластовой системы.

Техногенный объект – элемент техногенной системы, образованный в результате техногенного воздействия на систему из природных объектов.

Перечень техногенных воздействий, оказываемых на водогазовую внутрипластовую систему достаточно обширен, часть из них приведена в работах [5–9 и др.]. Ряд авторов считает, что техногенные воздействия оказаны на пластовый газ, часть – на внутрипластовую систему. По нашему мнению, техногенное воздействие оказано на все объекты внутрипластовой системы, которое переводит систему в неравновесное состояние. Каждый объект внутрипластовой системы на разные виды техногенного воздействия реагирует по-разному, образовавшиеся в результате воздействия техногенные объекты начинают массообменно взаимодействовать между собой. Массообменные процессы, происходящие между внутрипластовыми объектами, стремятся вернуть водогазовую систему в новое состояние равновесия. По этим причинам вся экспериментальная информация о составе и свойствах отобранных проб отражает последствия этих взаимодействий. Ниже рассмотрены техногенные воздействия на водогазовые внутрипластовые системы в хронологическом порядке, в том числе не обсужденные ранее. Здесь нужно отметить, что часть техногенных воздействий оказывается на внутрипластовую систему последовательно, часть – одновременно. В разные периоды разработки водогазовых залежей и для разных залежей набор видов техногенных воздействий может быть разным. В результате техногенных воздействий все природные внутрипластовые объекты приобретают статус техногенных объектов, с возможным образованием новых техногенных объектов, например, при фазовых переходах вещества объектов.

Ниже приведены виды техногенных воздействий, оказываемых на внутрипластовую водогазовую систему, изменяющих внутреннюю энергию, массу, структуру, компонентный состав и свойства пластовых объектов, начиная от буровых работ до окончания эксплуатации водогазовой залежи:

- процесс бурения скважины;
- процесс проникновения бурового раствора в пласт при бурении скважины;
- процесс освоения скважины;
- процесс изменения давления в пласте;
- процесс изменения температуры в пласте;
- изменение фазового состояния внутрипластового техногенного объекта (явление фазового перехода);
- процесс тепломассопереноса между внутрипластовыми техногенными объектами;
- процесс избирательного дренирования части внутрипластовых техногенных объектов;
- процесс организации внутрипластовых потоков;
- явление изменения структуры внутрипластовых техногенных объектов;
- процесс перемещения водогазового контакта в пласте;
- процесс закачки в пласт внешних (внепластовых) объектов;
- явление изменения смачиваемости поверхности пород коллектора, произошедшее под воздействием внутрипластовых или внешних объектов;
- процесс изменения химического состава внутрипластовых техногенных объектов;
- процесс перехода частей внутрипластовых техногенных объектов в канал перфорации.

Первым по хронологии видом техногенного воздействия на водогазовую залежь является процесс бурения скважины. При анализе последствий этого воздействия возникает ряд вопросов: произошло ли изменение механических свойств коллектора, какова глубина зон проникновения, время их расформирования в эксплуатируемой скважине, насколько призабойная зона залежи будет выведена из равновесного состояния, в течение какого времени пластовая система призабойной зоны залежи вернется в новое равновесное состояние в районе неэксплуатируемой скважины? В призабойной зоне эксплуатируемой газовой скважины равновесное состояние внутрипластовой системы за время эксплуатации не будет достигнуто, по причине непрерывности техногенного воздействия на нее.

При проведении буровых работ, как правило, величина репрессии превышает пластовое давление в 1,5 раза. При вскрытии водяной или газовой толщин пласта возможен их гидроразрыв, в результате которого необратимо увеличится удельная площадь поверхности коллектора и на вновь образованной поверхности появятся адсорбционные слои, увеличится их масса и масса разделительных пленок. В зависимости от свойств поверхности, они сформированы из молекул воды, компонентов бурового раствора и углеводородных компонентов, материалом для которых являются компоненты природных объектов и внедренного объекта – бурового раствора. Внедренный буровой раствор вытеснит часть природных компонентов, изменив массу, состав и структуру вещества этой зо-

ны залежи. В результате чего произойдут изменения термодинамического, химического равновесий, массы и составы жидкого и газообразного вещества призабойной зоны залежи. После снятия репрессии часть вытесненных компонентов вернется в призабойную зону, в необратимо измененном состоянии, вследствие чего внутрипластовая водогазовая система не вернется в первоначальное равновесное состояние. Измененными останутся: пористость коллектора, удельная площадь поверхности коллектора, состав и значения свойств объектов призабойной зоны залежи и т. д.

В результате оказываемой при бурении репрессии часть бурового раствора проникает в призабойную зону пласта. Обсуждение вопроса величины зоны проникновения приведено в работе [5]. По мнению авторов, в призабойной зоне бурящейся скважины возникают радиальные зоны с разным количеством внедренного в них бурового раствора. Частицы глины, цемента и шлама проникают и остаются в порах и образованных трещинах. По причинам разных свойств коллектора, разных коэффициентов сжимаемости воды и газа, в каждой из этих толщин размеры зон проникновения будут разными, методику и примеров численного расчета размеров зон проникновения авторы в работе [5] не приводят.

В работе [8] приведено время расформирования зон проникновения для эксплуатационного фонда скважин. В ней отмечено, что время расформирования имеет сильную зависимость от проницаемости, «в коллекторах с проницаемостью 0,2–0,3Д за полмесяца-месяц она полностью расформировывается, а при проницаемости 0,01–0,05Д этот процесс может длиться полгода-год».

Вопрос о физико-химическом взаимодействии компонентов бурового раствора с поверхностью коллектора разной смачиваемости не изучен, в какой степени оно повлияет на свойства поверхности коллектора призабойной зоны, остается открытым. Например, если в гидрофильный коллектор газонасыщенной толщины внедрены частицы с гидрофобной поверхностью, то в зоне проникновения на их поверхности возникнет адсорбционный слой, сформированный из высокомолекулярных компонентов газа. Произойдет изменение состава и значений свойств газа, находящегося в этой зоне, изменятся фильтрационно-емкостные свойства коллектора в зоне проникновения [10] и т. д. Изменяются также параметры термодинамического и химического равновесия внутрипластовой системы этой зоны, что повлечет за собой изменение компонентного состава и значений свойств объектов внутрипластовой системы в этих зонах залежи.

В работе [10] приведены результаты многочисленных экспериментов по влиянию пористой среды на свойства фильтратов буровых растворов. Эксперименты проводились на образцах керна, отобранного на нефтяных месторождениях Западной Сибири. При анализе результатов возникает следующий методический аспект: поскольку для проведения эксперимента были использованы образцы керна, то они, без сомнения, уже были подвергнуты техногенному воздействию процессами бурения, подготовки к эксперименту, последствия которых обсуждены выше.

Анализ проведенных работ по фильтрации буровых растворов на водной основе показал, что, во-первых, после прохождения бурового раствора через образец керна свойства фильтрата бурового раствора существенно изменились, во-вторых, большая часть присадок к воде осталась в поровом пространстве коллектора, в-третьих, коллекторские свойства образца керна восстановились не полностью [10].

Следующим по хронологии идет процесс освоения скважины. Одной из задач, решаемых в этот период, является освобождение призабойной зоны пласта от компонентов внедренного бурового раствора. В практике эта задача решается несколькими методами, в том числе и путем создания необходимой величины депрессии. При этом избежать деформационных изменений коллектора в призабойной зоне не удастся, в результате происходит изменение физико-химических свойств породы коллектора. Для «сохранения физико-химической стабильности пластовой системы» авторы работы [11] предлагают после изучения свойств керна подбирать растворы или реагенты для более успешного освоения скважины с минимальным нарушением равновесного состояния призабойной зоны. Перед отбором проб газа исследования по расформированности области проникновения бурового раствора не проводятся, следовательно, велика вероятность проведения отборов проб из нерасформированных зон с техногенными нарушениями и заведомо неравновесными термобарическим и химическим состояниями техногенной внутрипластовой системы в призабойной зоне залежи.

Таким образом, часть техногенных воздействий на внутрипластовую систему оказывается на нее еще в период до момента отбора проб, первый раз – буровыми работами, второй раз – процессами освоения. Вопрос влияния этих процессов на изменение состава и значений свойств внутрипластовой водогазовой системы по причине изменения термодинамического и химического равновесий, не изучен. Следовательно, правомерен вопрос о том, является ли отобранная проба представительной и какое состояние пластовой системы она отражает? Также имеется методическая проблема обработки информации, полученной вследствие исследования проб, отобранных из техногенной внутрипластовой системы, находящейся в неравновесном, динамическом состоянии. Данная проблема нуждается в отдельном рассмотрении.

Следующим по времени техногенным воздействием на залежь является создание необходимых депрессий на пласт при отборе проб газа. Как правило, это происходит при гидродинамических исследованиях скважины с подъемом газа на поверхность. Отбор проб при разных величинах депрессии влияет на компонентный состав проб газа [2, 12], требований о нормированности ее величины нет. При этом на внутрипластовую систему призабойной зоны залежи, как минимум, еще раз оказывается техногенное воздействие.

В продуктивных залежах с большими газонасыщенными толщами, с высокой проницаемостью коллектора величина депрессии составляет незначительную долю от пластового давления, размеры воронки депрессии также невелики. На низкопродуктивных залежах при исследовании их малодебитными скважинами величина депрессии составляет значительную долю от пластового давле-

ния, размер воронки депрессии распространяется на значительную часть залежи. В этом случае более обширная зона пласта оказывается подверженной техногенному воздействию и его уровень значительно выше, большее количество внутрипластовых процессов техногенного происхождения оказывают влияние на техногенную внутрипластовую систему в этой зоне и, соответственно, изменяют компонентный состав и свойства ее объектов, что подтверждается результатами исследования отобранных проб [2].

Снижение давления в призабойной зоне залежи приводит к частичному разгазированию пластовой воды, разделительных пленок и адсорбционных слоев, находящихся на поверхности коллектора этой зоны залежи. При одновременном снижении температуры данный процесс может привести к внутрипластовому образованию углеводородного конденсата из смеси газов: техногенного газа и газов частичного разгазирования техногенных объектов системы.

Стационарный режим градиента давления в работающей скважине устанавливается в течение временного периода, равного от нескольких часов до 1–2 суток в зависимости от величины депрессии и проницаемости коллектора. В этот период в призабойной зоне залежи проходят массообменные процессы между внутрипластовыми объектами, что влечет за собой изменение их составов. Следовательно, в процессе отбора проб из системы в пробоотборные устройства попадет техногенный газ, по составу и значениям свойств отличающийся от составов и значений свойств пластового газа до момента начала техногенного воздействия на залежь.

При организации потока жидкости или газа в призабойной зоне залежи в результате снижения давления в ней происходит изменение температуры. При длительной добыче газа за счет проявления эффекта Джоуля – Томпсона температура в призабойной зоне может понизиться на несколько десятков градусов [13]. Градиент температуры зависит от величины депрессии и проницаемости коллектора: чем больше величина депрессии и чем ниже проницаемость, тем выше температурный градиент. Снижение температуры и давления газа в призабойной зоне залежи ведет к образованию в ней углеводородного конденсата, перераспределению углеводородных компонентов газа: из части их образуется углеводородный конденсат, часть их растворится в конденсате, адсорбционных слоях и охлажденной пластовой воде, что приведет к изменению составов техногенных объектов, находящихся в этой зоне залежи. Из техногенных воды, адсорбционных слоев и разделительных пленок в газовую фазу перейдет часть углеводородных компонентов и водяного пара.

Время установления стационарного температурного режима в призабойной зоне залежи значительно больше времени установления стационарного давления, следовательно, процесс добычи газа в период отбора его пробы из разведочной скважины происходит в неизобарическом, неизотермическом и нестационарном режиме работы призабойной зоны. Эти процессы определяют непрерывное изменение состава извлеченного газа. Его состав и значения свойств зависят от видов и параметров техногенного воздействия на внутрипластовую систему и временного интервала между началом работы скважины и отбором пробы.

В процессе организации отбора проб внутрипластовая водогазовая система в призабойной зоне выводится из состояния термодинамического равновесия. В результате фазовых переходов возникнут новые фазы (новые техногенные объекты измененной внутрипластовой системы) [1]. Массообменные процессы между всеми техногенными объектами стремятся вернуть систему в новое состояние равновесия. Техногенная вода частично разгазится, часть паров воды конденсируется, из техногенных адсорбционных слоев выделятся газовые фазы – пары воды и/или углеводородный газ (в зависимости от состава адсорбционного слоя), из техногенных разделительных пленок выделятся те же газовые фазы, часть компонентов техногенного газа перейдет в жидкое состояние. Следовательно, состав техногенного газа в призабойной зоне газонасыщенной толщины пласта претерпит определенные изменения, по тем же причинам изменятся состав и значения свойств содержимого водонасыщенной толщины в призабойной зоне пласта.

В гидрофобном коллекторе при снижении давления в призабойной зоне газонасыщенной толщины пласта происходит частичное разгазирование техногенных углеводородных слоев, адсорбированных поверхностью коллектора. Смесь техногенного газа, газов частичного разгазирования техногенной воды водонасыщенной толщины пласта и углеводородов техногенных адсорбционных слоев взаимодействует с водой в паровой фазе и образовавшимся в призабойной зоне углеводородным конденсатом, вследствие чего изменятся массы и составы всех техногенных объектов системы.

В зоне пониженного давления газонасыщенной толщины пласта образуется углеводородный конденсат – новый техногенный объект. При значительных величинах депрессии происходит существенное снижение температуры газа, что усиливает процесс конденсации части компонентов смеси газов, и конденсат, в свою очередь, взаимодействует с остальными объектами водо- и газонасыщенных толщин залежи, в результате чего изменятся компонентные составы всех техногенных взаимодействующих объектов. При этом изменятся массы, значения свойств и внутренняя энергия всех взаимодействующих объектов водо- и газонасыщенных толщин пласта. Водогазовая внутрипластовая система переходит в неравновесное состояние и за время проведения эксперимента не успевает вернуться в новое равновесное состояние. В призабойной зоне залежи происходят разнонаправленные нестационарные процессы, которые приводят к изменению состава и свойств техногенного газа.

В результате фазовых переходов происходят изменения внутренней энергии, масс, составов и значений свойств внутрипластовых взаимодействующих объектов с образованием новых техногенных взаимодействующих объектов из их вещества. В результате фазовых переходов в залежи происходит перераспределение компонентов между техногенными объектами с изменением их масс.

При создании градиента давления приложенное внешнее техногенное воздействие на внутрипластовую систему переводит в подвижное состояние не все ее техногенные объекты. Неподвижными остаются техногенные адсорбционные слои, техногенный углеводородный конденсат, часть техногенной пластовой воды, часть техногенных разделительных пленок. По этой причине из

скважины можно отобрать пробу только части подвижных техногенных объектов внутрипластовой техногенной системы, в частности, извлеченного газа, который по определению является продуктом техногенной деятельности, но не пластового газа. Компонентный состав и свойства извлеченного газа зависят от текущих и предшествующих видов техногенных воздействий на внутрипластовую систему.

В разрабатываемой залежи одним из видов техногенного воздействия является организация внутрипластовых потоков жидкости или газа. Так как составы пластовой воды и пластового газа в разных точках залежи до начала ее разработки различны [4], то при дренировании их подвижных составляющих из разных зон залежи в зону стягивания образуются их смеси, которые имеют разные и переменные во времени составы и значения свойств, тем более что не весь объем техногенного газа переходит в подвижное состояние [3]. Так как не все природные внутрипластовые объекты приобретают подвижность полностью или частично, то в результате отсутствия равновесного состояния и различий внутренней энергии разных частей внутрипластовой системы взаимодействия переменных масс и составов между ними начинают происходить массообменные процессы, приводящие к изменению составов всех техногенных объектов.

Например, если в зону с неподвижным техногенным газом внедрится более легкий (более тяжелый) техногенный газ, то при снижении молярной массы новой смеси в данной поре изменится внутренняя энергия микросистемы, ограниченной размерами поры и на поверхности гидрофобного коллектора произойдет уменьшение толщины адсорбционного слоя. В случае увеличения молярной массы техногенного газа произойдет обратный процесс. В результате изменится соотношение подвижных и неподвижных составляющих техногенного газа в этой зоне залежи, изменятся их массы, составы и значения свойств, изменятся фильтрационно-емкостные свойства коллектора.

Одним из видов техногенного воздействия является организация массообменных процессов между внутрипластовыми объектами. В водогазовой залежи при внедрении в зону стягивания газа с более низкими значениями молярной массы наряду со снижением молярной массы смеси газов начнет происходить процесс ретроградного испарения, образовавшегося ранее в этой зоне конденсата. Данный процесс приведет к дополнительному изменению состава смеси газов (ее молярная масса увеличится), с другой стороны, при этом произойдет снижение температуры в данной зоне залежи. При внедрении в зону стягивания техногенного газа с более высокими значениями молярной массы, произойдет увеличение молярной массы смеси газов, интенсифицируется процесс внутрипластового конденсатообразования, что приведет к повышению температуры в этой зоне залежи. В результате значение молярной массы смеси газов в этой зоне залежи снизится. По причине неизвестности массы образовавшегося или испарившегося конденсата, неизвестности его состава, масс и теплот испарения индивидуальных компонентов, перешедших в другую фазу, эти процессы проконтролировать невозможно. На данном этапе при проведении серий целенаправленных экспериментов возможно

только зафиксировать происходящие в этой зоне залежи тенденции происходящих процессов по результатам анализа изучения состава проб извлеченного газа.

К техногенным воздействиям необходимо отнести внедрение в газонасыщенную толщину залежи внутрипластовых объектов, например пластовой воды из водонасыщенной толщины пласта. При этом происходит изменение внутренней энергии системы, происходит организация фазовых переходов и изменение состава и значений свойств углеводородных жидкостей и/или газов данной зоны залежи. Запускается непрерывный процесс изменения составов внутрипластовых техногенных объектов, что ведет к дальнейшему изменению внутренней энергии и т. д.

Внедрение в залежь внешних объектов (закачанной воды с химическим составом, отличным от пластовой воды с растворенными в ней газами, ПАВ, ШФЛУ в газоконденсатную залежь, микрофлоры, химических реагентов, использование сайклинг-процесса, фрайклинг-процесса и других методов интенсификации добычи газа или индивидуальных его компонентов) приводит к ряду последствий. При внедрении в газонасыщенную толщину залежи внешних (неприродных) объектов произойдет изменение соотношений масс внутрипластовых техногенных объектов и изменение внутренней энергии пластовой системы, что приведет к нарушению термодинамического и химического равновесий. Изменяются соотношения масс, составы и значения свойств всех находящихся в пласте техногенных объектов. Деятельность микрофлоры приведет к изменению составов объектов пластовой системы [14]. Внедрение в пласт внешних объектов активизирует внутрипластовые массообменные процессы между находившимися в пласте, внешними и вновь организованными внутри пласта техногенными объектами. С закачанными в пласт агентами в него попадут не содержащиеся в нем химические вещества. Изменение химического состава системы также провоцирует изменение: термодинамического равновесия, интенсивности процессов тепломассопереноса, толщин, составов техногенных разделительных пленок и техногенных адсорбционных слоев, находящихся на поверхности коллектора. Данные процессы в еще большей степени приводят к увеличению размеров разных зон внутрипластовой техногенной водогазовой системы с термодинамической и химической неравновесностью.

Последним видом внутрипластового техногенного воздействия на техногенный газ является процесс перехода его из порового пространства в скважину (перфорационный канал). При нахождении и движении жидкости и газа в поровом пространстве они взаимодействуют с его поверхностью, на которой находятся те или иные техногенные адсорбционные слои или техногенные разделительные пленки. При переходе газожидкостной смеси из порового пространства в скважину, во-первых, прекращается взаимодействие дренируемых жидкости и газа с поверхностью коллектора и неподвижными техногенными объектами, во-вторых, происходит разрушение большей части техногенных разделительных пленок. После разрушения техногенных углеводородных разделительных пленок их углеводородные компоненты переходят в извлеченный газ. Если в извлеченной продукции присутствует вода, то разрушатся межфазные пленки во-

ды. Углеводородные компоненты, растворенные в пленках воды, перейдут в извлеченный газ, компоненты воды – в извлеченную воду. При сохранении термобарических условий в момент перехода суммарный состав извлеченных газа и воды не изменится, но в результате разрушения техногенных разделительных пленок скачком изменятся состав, значения физико-химических свойств, извлеченных газа и воды и значения их внутренней энергии. При этом интегральное значение массы смеси и ее интегральный состав останутся неизменными, а структура смеси и значения ее физико-химических свойств претерпят изменения, в ряде случаев изменится и фазовое состояние смеси.

Только после попадания извлеченного газа в скважину появляется возможность отбора его проб. В процессе промыслового эксперимента отбираются пробы извлеченного газа, который является продуктом техногенной деятельности, но на данный момент его компонентный состав принято отождествлять с составом пластового газа, что делать недопустимо по вышеприведенным соображениям.

В результате большого количества разнообразных видов техногенных воздействий на залежь разного уровня в период отбора проб и дальнейшей эксплуатации залежи в пласте появляется некоторое количество техногенных непластовых веществ и техногенных объектов (газы разгазирования техногенных пластовых объектов, водяной пар, продукты химических реакций, продукты биоценоза и т. д.). Это изменяет и усложняет компонентный и химический состав техногенной внутрипластовой системы, приводит к изменению ее внутренней энергии, активизации массообменных процессов между внутрипластовыми техногенными объектами, перераспределению компонентов и их групп между подвижными и неподвижными объектами, увеличивает градиенты состава и значений свойств жидкостей и газов, находящихся в разных зонах разрабатываемого пласта. В разрабатываемом пласте происходят разнонаправленные нестационарные процессы, которые приводят к изменению составов и свойств всех техногенных объектов внутрипластовой системы.

Из анализа предшествующего материала следует, что из скважины отбирается проба извлеченного газа, который сам является продуктом техногенной деятельности (частью техногенного газа). В водогазовых залежах техногенные воздействия на внутрипластовую систему приводят к изменению: состава и значений свойств извлеченного газа, содержания $C_{5+в}$ в его составе, массы, состава и значений свойств конденсата, образованного в пласте, значений газоконденсатной характеристики, коэффициента внутрипластовых потерь конденсата, коэффициента конденсатоотдачи.

Как было показано выше, число видов техногенных воздействий при разработке водогазовой залежи, достаточно велико. Влияние части из них уже известно, поэтому негативное их действие может быть учтено как минимум при отборе проб, как максимум при разработке залежи. Влияние большинства видов техногенных воздействий на пластовую водогазовую систему детально не изучено. Можно предположить, что не все из них отрицательно скажутся на процессе добычи газа. По этой причине необходимо провести исследования по оценке влияния каждого вида техногенного воздействия на эффективность про-

цесса добычи газа. Разделить их на влияющие негативно или позитивно с целью целенаправленного усиления позитивного влияния одних и ослабления влияния других в условиях разработки конкретной залежи.

В итоге можно сделать следующий вывод: водогазовая внутрипластовая система имеет сложное строение, при ее разработке в ней происходят разнонаправленные процессы, перераспределяющие компоненты между ее техногенными объектами. Для получения объективных результатов исследования внутрипластовых водогазовых систем необходима разработка нового подхода к их изучению, включающего применение адекватных моделей таких систем, разработку новой методической базы, новых принципов организации промысловых и лабораторных исследований, основанных на системном подходе.

Выводы:

- приведен перечень видов техногенных воздействий на внутрипластовую водогазовую систему при бурении, освоении, эксплуатации залежи приводящих к изменению состава и значений свойств техногенных объектов внутрипластовой системы;
- при техногенном воздействии на залежь происходят фазовые переходы, в результате которых в разных зонах залежи появляются новые техногенные внутрипластовые объекты.
- в результате организованного движения в пласте техногенных жидкостей и газов, имеющих разные составы, изменяются составы и значения свойств их смесей в разных зонах залежи и в зоне стягивания;
- внедрение внешних объектов в залежь приводит к увеличению различий составов и значений свойств техногенных объектов в разных зонах залежи;
- компонентный состав и значения физико-химических свойств отобранной пробы извлеченного газа – продукта техногенной деятельности – зависят от набора видов техногенных воздействий на внутрипластовую систему;
- для получения качественной информации для целей подсчета запасов газа и создания адекватной модели его вытеснения необходимо моделирование влияния техногенных воздействий на внутрипластовую водогазовую систему;
- при существующей системе получения информации о составе и свойствах «пластового» газа невозможно получать обоснованные значения его подсчетных параметров и проводить эффективное управление процессами добычи газа;
- обоснованная информация о составе, свойствах и подсчетных параметрах пластового газа отсутствует;
- изучение составов и свойств внутрипластовых жидкостей и газов вне порового пространства не имеет смысла.

Список использованных источников и литературы

1. *Сорокин, А. В.* Статическая модель пластовой водогазоконденсатной системы / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин. – Текст: непосредственный // Информационные системы и технологии в геологии и нефтегазодобыче: междунар. науч.-техн. семинар 14–15 нояб. 2019 г. – Тюмень, 2020. – С. 116–122.

2. *Сорокин, А. В.* Анализ результатов исследований на газоконденсатность малодебитного фонда скважин / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Нефтегазовый терминал : междунар. науч.-техн. конф. им. проф. Н. А. Малюшина. – Вып. 18. – Тюмень, 2020. – С. 252–260.
3. *Sorokin, A. V.* Information structure of in-situ oil / A. V. Sorokin, V. D. Sorokin // ROGTEC. – 2007. – № 8. – Р. 12–20.
4. *Сорокин, А. В.* Статическая модель пластовой нефти для подсчета запасов углеводородов / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Современные технологии нефтегазовой геофизики : междунар. науч.-практ. конф. 16–17 мая 2019 г. – Тюмень, 2019. – С. 134–142.
5. *Федин, Л. М.* Новые представления о зоне проникновения / Л. М. Федин, В. Г. Рейтенбах // Нефтяное хозяйство. – 1988. – № 8. – С. 28–33.
6. *Титов, В. И.* Изменение состава пластовых нефтей при разработке месторождений (Обзор) / В. И. Титов, С. А. Жданов // Нефтяное хозяйство. – 1988. – № 8. – С. 26–28.
7. *Сургучев, М. Л.* Факторы, влияющие на состояние остаточной нефти в заводненных пластах / М. Л. Сургучев, Э. М. Симкин // Нефтяное хозяйство. – 1988. – № 9. – С. 31–36.
8. *Санин, В. П.* О переходной зоне от газа к нефти на газонефтяных залежах Сургутского района Тюменской области и ее учет на стадиях подсчета запасов и разработки / В. П. Санин, Н. Я. Медведев // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений (сборник). – Москва: Нефтяная и газовая промышленность, 1996. № 1. – С. 9–13.
9. *Сорокин, А. В.* Закономерности распределения компонентов в составе нефти месторождений Западной Сибири / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин. – Тюмень, 2019. – Тюмень : Вектор-Бук, 2015. – 370 с.
10. *Бастриков, С. Н.* Строительство скважин с кустовых площадок на нефтяных месторождениях Западной Сибири. – Тюмень: Вектор Бук, 2000. – 256 с.
11. Пат. SU 1775556 A1. СССР, МПК E21B49/00 E21B47/00. Способ прогнозирования сохранения физико-химической стабильности пластовой системы при освоении скважины: заявл. 19.06.1989; опубл. 15.11.1992 / Щепеткин Ю. В.
12. *Сорокин, А. В.* Недостатки исходной информации о физико-химических свойствах газа и конденсата, поступающей на экспертизу для подсчета их запасов / А. В. Сорокин, В. Д. Сорокин // Информационные системы и технологии в геологии и нефтегазодобыче : междунар. науч.-техн. семинар 14–15 нояб. 2019 г. – Тюмень, 2020. – С. 100–107.
13. *Бондарев, Э. А.* Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа / Э. А. Бондарев, В. И. Васильев. – Новосибирск : Наука, 1988. – 272 с.
14. *Овсянникова, В. С.* Влияние микробиологического воздействия на углеводородный состав при увеличении нефтеотдачи пластов нефтевытесняющими композициями с регулируемой щелочностью : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2008. – 23 с.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Сорокин, генеральный директор, ООО «Омега-К» (Россия, г. Тюмень), sorokin_omega@list.ru

Владимир Дмитриевич Сорокин, эксперт ООО «Омега-К» (Россия, г. Тюмень), sorokin_omega@list.ru

Котел отопительный типа КВ-ЦБ

А. П. Ильин, Е. П. Поздняков, К. В. Стерхов, А. А. Трифонов, А. З. Файзрахманов

Рассматривается конструкция котла, работающего на попутном нефтяном газе для отопления бытовых помещений установок подготовки нефти.

Ключевые слова: котел отопительный, попутный нефтяной газа, установка подготовки нефти, отопление, автоматика безопасности и управления.

Heating boiler type KV-CB

A. P. Ilyin, E. P. Pozdnyakov, K. V. Sterkhov, A. A. Trifonov, A. Z. Faizrakhmanov

The design of a boiler operating on associated petroleum gas for heating domestic premises of oil treatment plants is considered.

Key words: heating boiler, associated petroleum gas, oil treatment plant, heating, safety and control automation.

АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова стремится максимально использовать попутный нефтяной газ. Процент его полезного использования в компании составляет более 95 %. Попутный нефтяной газ используется как на технологические нужды – для нагрева нефти, так и на бытовые – отопление бытовых помещений.

На крупных установках подготовки нефти попутный нефтяной газ используют полностью. Энергию, получаемую от сжигания ПНГ, используют для выработки тепла и направляют на технологические нужды и отопление помещений. Здесь применяют промышленные котлы, путевые подогреватели нефти, теплогенераторы и рекуператоры. Объемы потребления ПНГ данным оборудованием измеряется в тысячах кубических метров в сутки. Однако существуют установки сбора и подготовки нефти, где данное оборудование использовать нецелесообразно т. к. потребление тепловой энергии не значительно.

Существует большое количество производителей, предлагающих котлы отопительные, работающие на природном газе. Котлы, работающие на попутном нефтяном газе (ПНГ) на рынке отсутствуют. Сложность использования попутного нефтяного газа заключается в его компонентном составе. В ПНГ присутствуют: вода, капли нефти, целевые углеводороды (пропан, бутан и т. д.), сероводород. Это осложняет горение газа, способствует отложению сажи и сернистых соединений на поверхности теплообменника и приводит к преждевременному износу оборудования.

Работниками АО «Белкамнефти» им. А. А. Волкова разработан котел отопительный для работы на попутном нефтяном газе. Конструкция котла представ-

лена на рис. 1. Котел соответствует обязательным требованиям [1–3]. Оформлен сертификат соответствия № RU C- RU.НА83.B.01419/22. Оригинальность конструкции защищена патентом № 2778029.

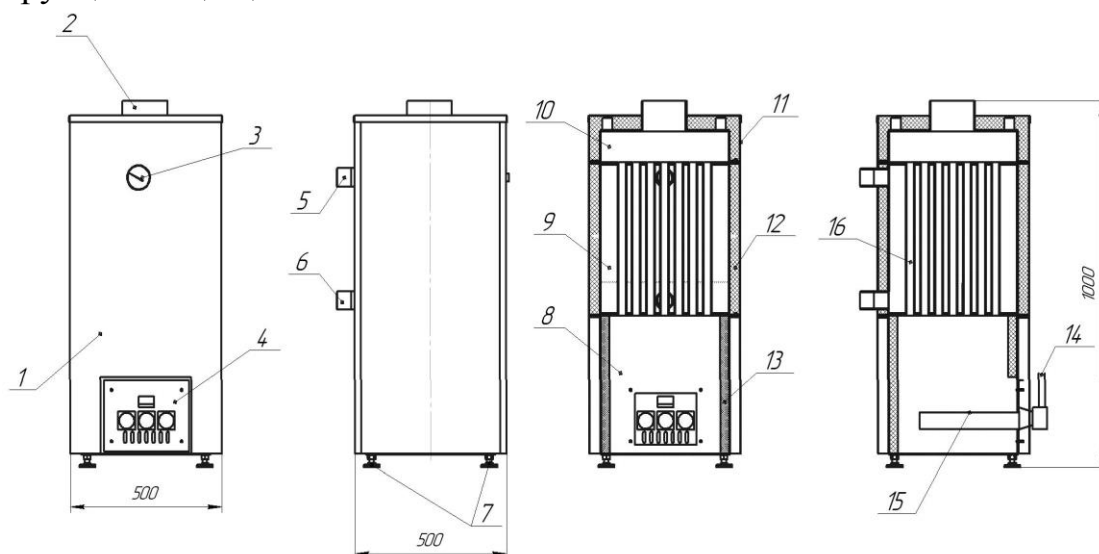


Рис. 1. Общий вид котла отопительного типа КВ-ЦБ: 1 – передняя панель котла; 2 – посадочное место дымохода; 3 – термометр; 4 – горелка; 5 – выходной патрубок; 6 – входной патрубок; 7 – ножки котла; 8 – топочная камера; 9 – теплообменник; 10 – дымосборная часть; 11 – облицовка котла; 12 – наружный утеплитель; 13 – внутренний утеплитель топочной камеры; 14 – патрубок подключения горелки к газу; 15 – горелка; 16 – дымовые трубки теплообменника

Фотография котла КВ-ЦБ, расположенного на установке подготовки нефти представлена на рис. 2.



Рис. 2. Котел КВ-ЦБ на установке подготовки нефти

При разработке котла КВ-ЦБ на первое место поставлены требования простоты и надежности конструкции, ремонтпригодности в условиях удаленности от сервисных центров.

Основным элементом котла является теплообменник. После анализа конструкций различных котлов принято решение использовать жаротрубный, (дымогарный) теплообменник. Основными недостатками данного теплообменника являются его большая масса и относительно невысокий КПД. Но теплообменник прост в изготовлении, обслуживании и имеет высокую ремонтпригодность.

Для проведения испытаний был изготовлен опытный образец котла. Исследования теплообменника показали высокую неравномерность распределения температуры продуктов сгорания между дымовыми трубками. На рис. 3 показана температура продуктов сгорания на выходе из дымовых трубок. Видно, что температура газов, проходящих через боковые трубки, значительно ниже, чем проходящих через центральные трубки. Средняя температура продуктов сгорания составила 473 °С.

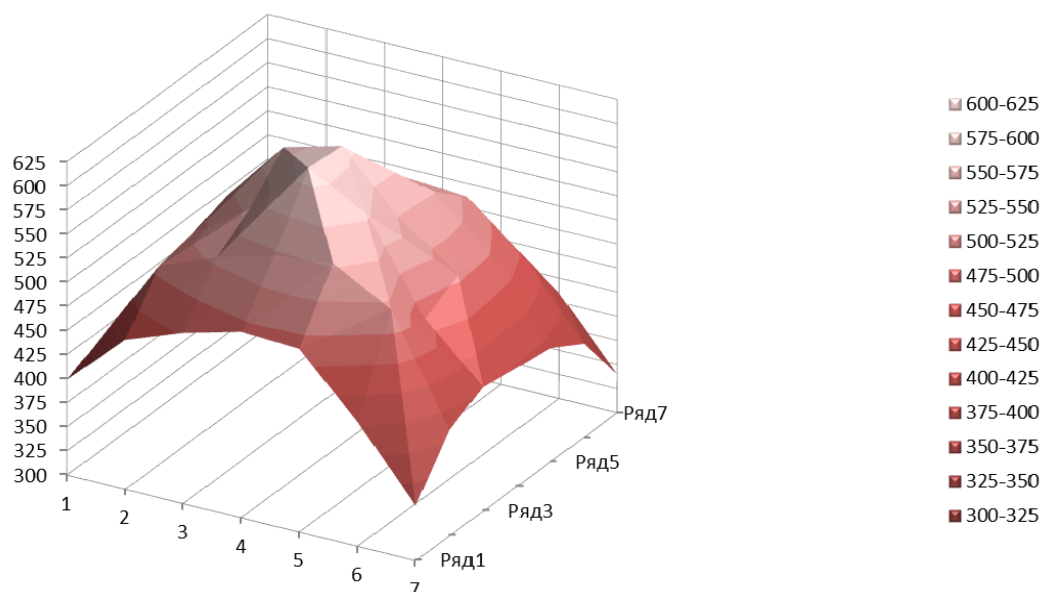


Рис. 3. Температура продуктов сгорания на выходе из дымовых трубок

Для выравнивания температуры продуктов сгорания в дымовых трубках и улучшения теплопередачи в трубки установили завихрители (рис. 4).



Рис. 4. Конструкция завихрителя

На рис. 5 представлен график температур продуктов сгорания на выходе из дымовых трубок после установки завихрителей. Температура продуктов сгорания между трубками распределилась более равномерно. Средняя температура снизилась до 229 °С. Установка завихрителей позволила уменьшить потери тепла с уходящими газами и увеличить коэффициент полезного действия котла на 4 %.

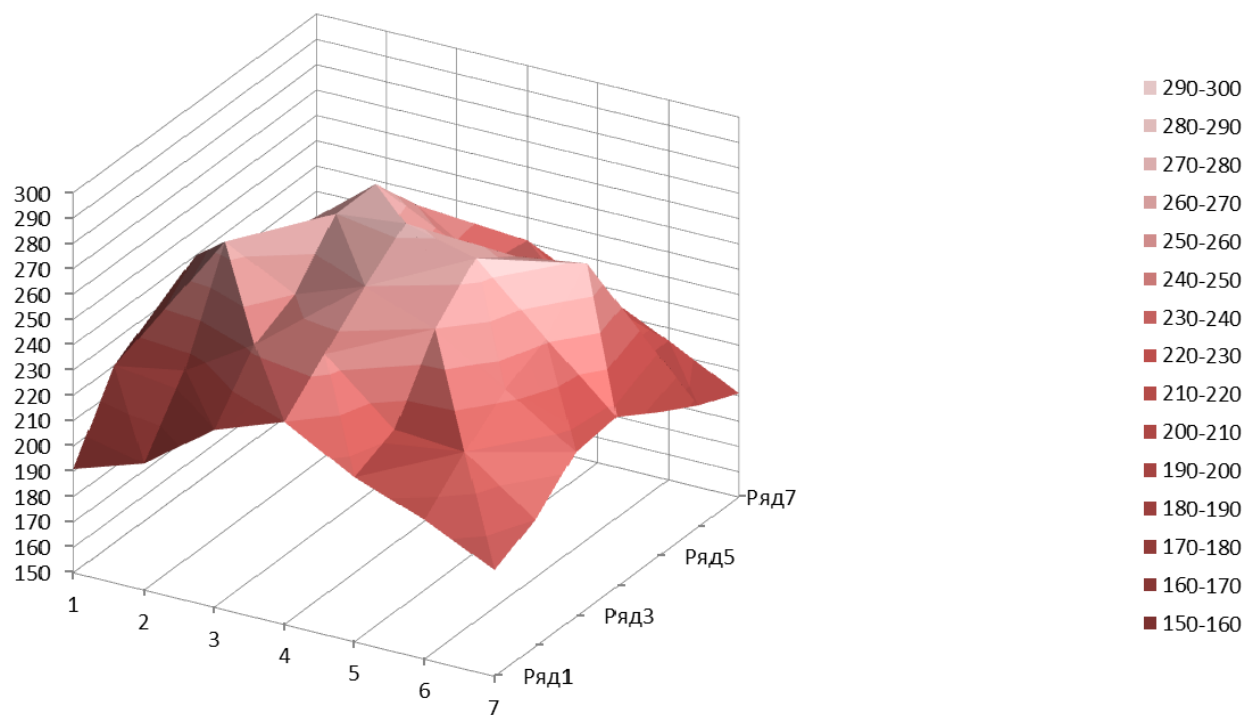


Рис. 5. Температура продуктов сгорания на выходе из дымовых трубок после установки завихрителей.

Исследуя процесс горения ПНГ, выявлено, что высота топочной камеры сильно влияет на полноту сгорания попутных нефтяных газов. После проведения экспериментов определено, что при недостаточной высоте камеры на нижней части теплообменника и внутри трубок происходит отложение сажи.

При недостаточной высоте топочной камеры происходит неполное сгорание ПНГ. В дымовых газах появляется значительное количество угарного газа (СО). Увеличение подачи воздуха не приводит к снижению выделения угарного газа и отложений сажи. Было сделано заключение, что активное горение прекращается при соприкосновении с поверхностью теплообменника. Определено, что высота топочной камеры не должна быть ниже 250 мм от поверхности горелки.

Совместно с конструкцией котла разработан алгоритм работы автоматики безопасности и регулирования. Основные требования при разработке автоматики являются: обеспечение работы котла в соответствии с обязательными требованиями, максимальное применение оборудования отечественного производства, применение оборудования, используемого в нефтедобывающей отрасли.

Функциональная схема работы автоматики представлена на рис. 6.

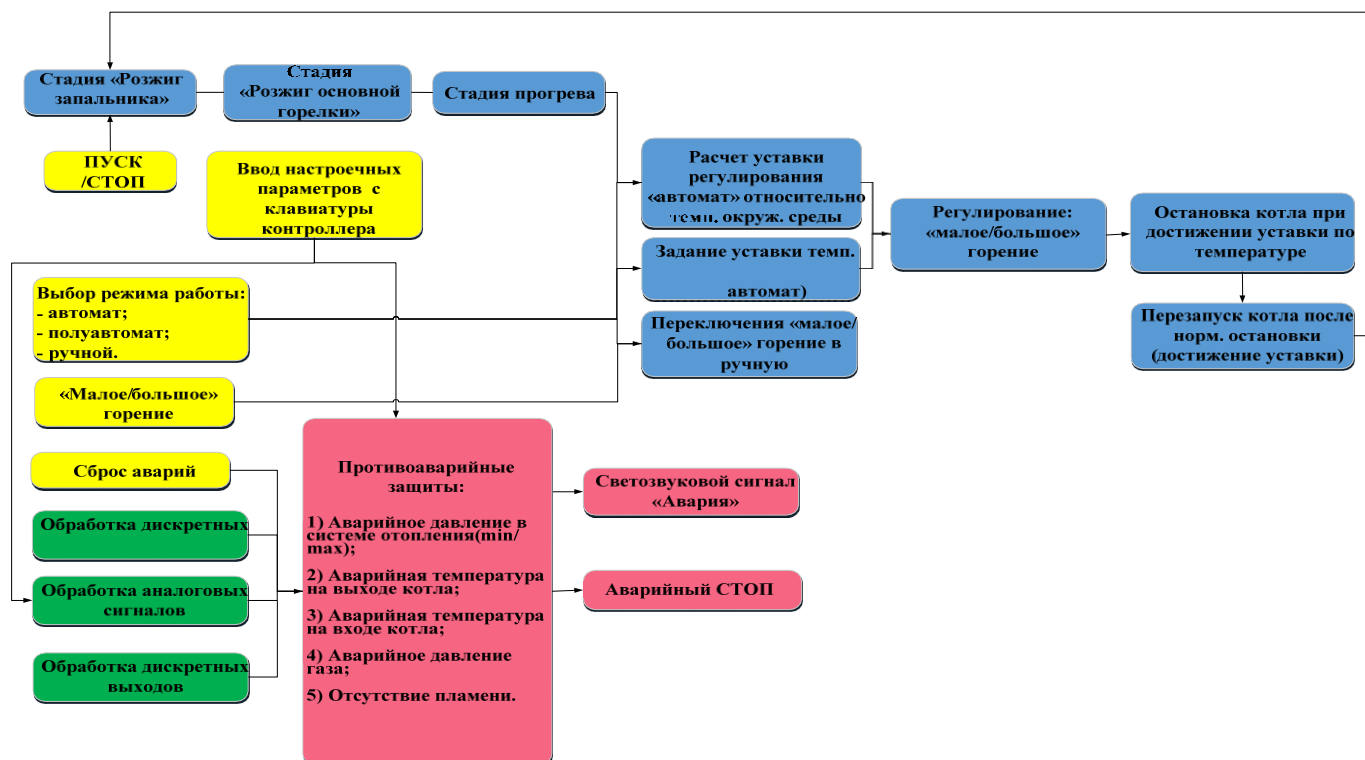


Рис. 6. Функциональная схема работы котла

Предусмотрено три режима работы котла: автоматический, полуавтоматический и ручной. Переключение режимов осуществляется переключателем на панели шкафа управления. В любом режиме производится контроль параметров безопасности.

Автоматический	Работа котла осуществляется контроллером без присутствия оператора. Температура сетевой воды (системы отопления) регулируется автоматически, в зависимости от температуры окружающего воздуха, в соответствии с режимной картой
Полуавтоматический	Температура сетевой воды задается оператором. Контроллер осуществляет поддержание установленной температуры
Ручной	Управление горелкой производится оператором

Полуавтоматический режим предназначен для временного использования в случае выхода из строя датчиков контроля температуры окружающего воздуха. Ручной является технологическим режимом. Он используется при наладке и регулировке работы котла.

Упрощенная схема управления автоматикой представлена на рис. 7.

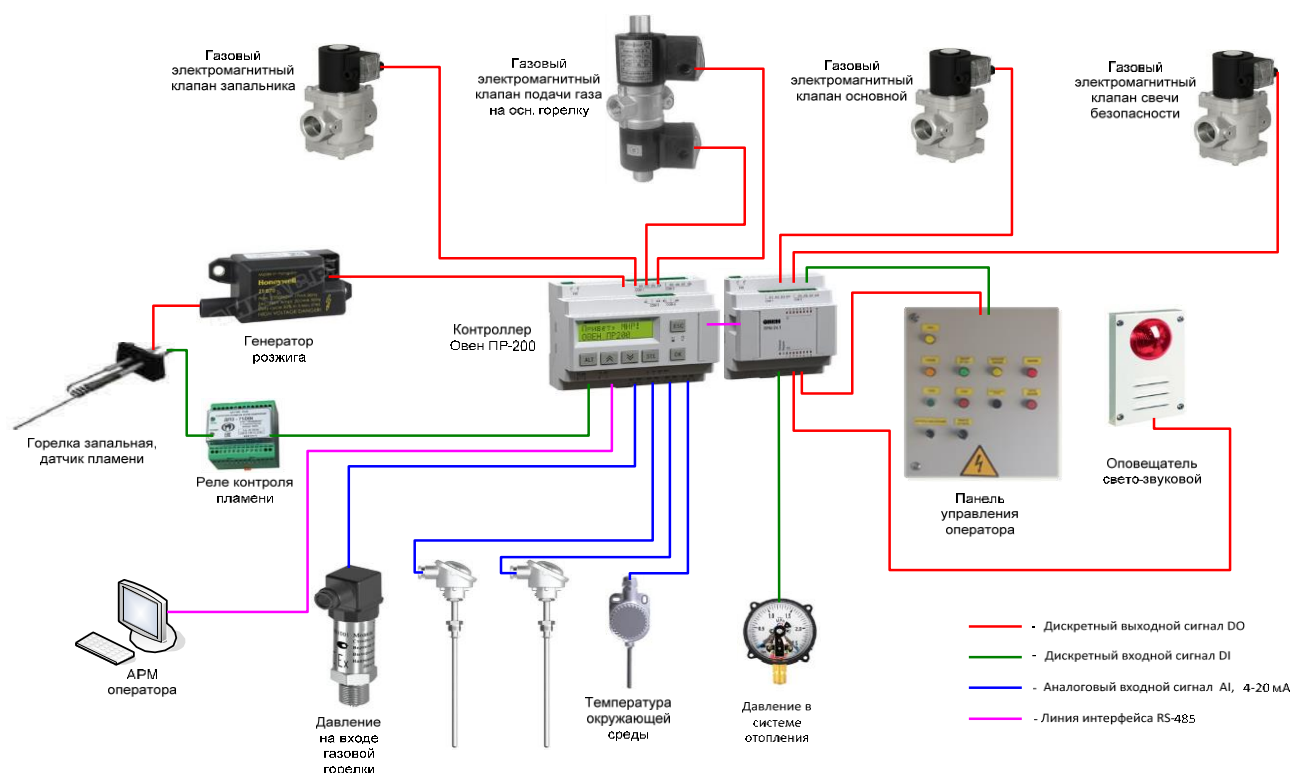


Рис. 7. Схема управления автоматикой

В результате проведения конструкторских и исследовательских работ был изготовлен котел отопительный, работающий на попутном нефтяном газе, удовлетворяющий обязательным требованиям, действующим в Российской Федерации [1–3].

Список использованных источников и литературы

1. ТР ТС 016/2011. О безопасности аппаратов, работающих на газообразном топливе: технический регламент Таможенного союза: издание официальное: утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 № 875: введен впервые: – 29с.
2. ГОСТ 20548-93. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью до 100 кВт. Общие технические условия: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 июня 2020 г. № 258-ст-ст : взамен ГОСТ 20548-87. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 12 с.
3. СП 281.1325800.2016. Установки теплогенераторные мощностью до 360 кВт, интегрированные в здания. Правила проектирования и устройства: свод правил Российской Федерации: издание официальное: утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 949/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г.: введен впервые. – Москва : Минстрой России, 2016. – 52 с.

Сведения об авторах

Алексей Петрович Ильин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели и установки», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Ижевск), ilalp@inbox.ru

Евгений Павлович Поздняков, начальник отдела автоматизированной системы управления производством управления автоматизации производственных процессов, АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), pozdneyakov@belkam.com

Константин Викторович Стерхов, ведущий инженер-технолог отдела подготовки и реализации газа управления подготовки нефти и газа, АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), sterhovkv@belkam.com

Алексей Александрович Трифонов, начальник отдела подготовки и реализации газа управления подготовки нефти и газа, АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), trifonovaa@belkam.com

Альберт Зинурович Файзрахманов, ведущий инженер службы главного технолога нефтегазодобывающего управление № 2 АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), fajzrakhmanovaz@belkam.com

Горелка газовая типа ГГУ

А. П. Ильин, К. В. Стерхов, А. А. Трифонов, А. З. Файзрахманов

Рассматривается конструкция горелки и вопросы технологии одновременного совместного сжигания двух видов попутных нефтяных газов на одной горелке.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, горелка, кинематическое горение газа, диффузионное горение газа, испытательная.

Gas burner type GGU

A. P. Ilyin, K. V. Sterkhov, A. A. Trifonov, A. Z. Faizrakhmanov

The design of the burner and issues of technology for simultaneous co-combustion of two types of associated petroleum gases on one burner are considered.

Keywords: associated petroleum gas, burner, kinematic gas combustion, diffusion gas combustion, test.

При подготовке нефти, в зависимости от технологического процесса, производится ее сепарация (дегазация) с выделением попутного нефтяного газа (ПНГ). Количество сепараций может быть одна, две и более. Их называют ступенями сепарации. Выделившийся попутный нефтяной газ на каждой ступени имеет разный компонентный состав, объем выделения, рабочее давление. На каждой последующей ступени сепарации в составе ПНГ больше углеводородов, меньше объем выделения газа и ниже рабочее давление. Несмотря на то, что они все называются попутными нефтяными газами, это разные виды газов.

В основном ПНГ сжигают на газоиспользующем оборудовании для получения тепла. Использовать одновременно два вида газов сложно. В зависимости от состава и объемов подачи газа каждое горелочное устройство должно обеспечивать подачу достаточного количества воздуха для полного сгорания обоих газов. Задача осложняется тем, что количество ПНГ различных ступеней может изменяться в течение суток и даже часов.

В газоиспользующем оборудовании существует два типа горения: диффузионное и кинематическое. Диффузионное горение происходит без предварительной подачи в газ первичного воздуха. Кинематическое горение происходит, когда в газе уже имеется определенное количество воздуха. Скорость кинематического горения выше, чем диффузионного, т. к. зависит только от скорости химической реакции горения. В диффузионном горении должен произойти еще процесс смешивания кислорода с топливом.

Работниками АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова разработана конструкция атмосферной горелки мощностью от 0,5 до 10 МВт с возможностью одновременного использования 2 видов газа.

Разработанная горелка имеет следующие классификационные признаки:

- 1) способ подачи компонентов – инжекция первичного воздуха газом, подача вторичного воздуха за счет разрежения в рабочем пространстве;
- 2) степень подготовки горючей смеси – с частичной подачей первичного воздуха;
- 3) характер потока, истекающего из горелки – прямоточный, вертикальный;
- 4) номинальное давление газа перед горелкой – низкое (до 5 кПа), среднее (до критического перепада давлений);
- 5) необходимость регулирования коэффициента избытка воздуха – с нерегулируемым коэффициентом избытка воздуха;
- 6) возможность использования тепла продуктов сгорания – без подогрева воздуха и газа.

Принципиальная схема горелки представлена на рис. 1.

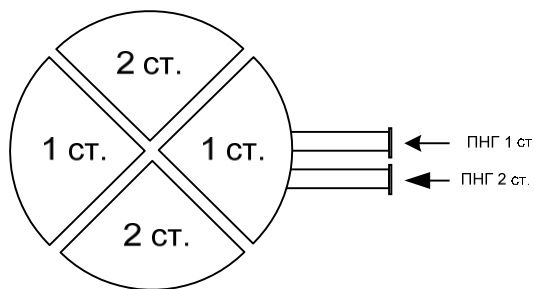


Рис. 1. Принципиальная схема горелки

На рис. 1 видно, что газ ПНГ 1-й и 2-й ступеней поступает по отдельным газопроводам. Далее распределяется по секторам. Горение одного и того же газа осуществляется в противоположных секторах.

Каждый сектор состоит из отдельных горелок, объединенных в блоки. Схема отдельной горелки представлена на рис. 2.

Отдельные горелки состоят из газовой трубки 1, форсунки 2, смесительной камеры 4 с отверстиями подачи первичного воздуха 3.

Работа горелки производится следующим образом: газ (ПНГ) поступает по газовой трубке 1 и через форсунку 2 подается в смесительную камеру 4. Вытекающая из форсунки, газ создает разрежение возле отверстий подачи первичного воздуха 3. Через отверстия в смесительную камеру поступает первичный воздух и перемешивается с газом в смесительной камере 4. Количество первичного воздуха напрямую зависит от скорости истечения газовой струи и площади отверстий 3. Между горелками поступает вторичный (основной) воздух 7. Сгорание ПНГ 5 происходит над смесительными камерами 4.

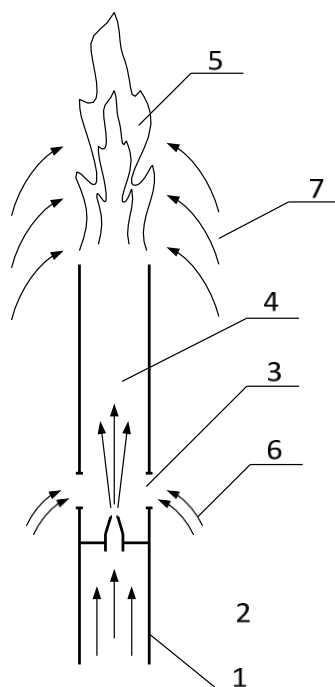


Рис. 2. Схема отдельной горелки блока: 1 – газовая трубка; 2 – форсунка; 3 – отверстие подачи первичного воздуха; 4 – смесительная камера; 5 – пламя; 6 – подача первичного воздуха; 7 – подача вторичного воздуха

Отдельные горелки, в том числе и горелки отдельных секторов, расположены на расстоянии, обеспечивающем стабильный розжиг одной горелки от другой. Тем самым обеспечивается эффект «бегущий огонь», когда розжиг одной отдельной горелки обеспечивает розжиг рядом стоящих горелок.

Компоновка горелки и конструкция отдельных горелок обладают следующими преимуществами.

1. При конструировании горелки изменение ее мощности производится путем увеличения или уменьшения количества отдельных горелок в секторе (блоке). Размер блока определяется исходя из конфигурации камеры сгорания газоиспользующего оборудования.

2. Разделение горелки на сектора (блоки), а далее на отдельные горелки позволяет подобрать их под характеристики конкретного газа.

3. Противоположное расположение секторов одного газа позволяет более равномерно распределить тепло в камере сгорания газоиспользующего оборудования.

4. Применение однотипных отдельных горелок позволяет достичь высокой унификации деталей и уменьшить номенклатуру используемых материалов.

Были проведены испытания горелки на открытой площадке с применением стенда. Схема стенда приведена на рис. 3. В сечении стенд выполнен в виде шестигранника.

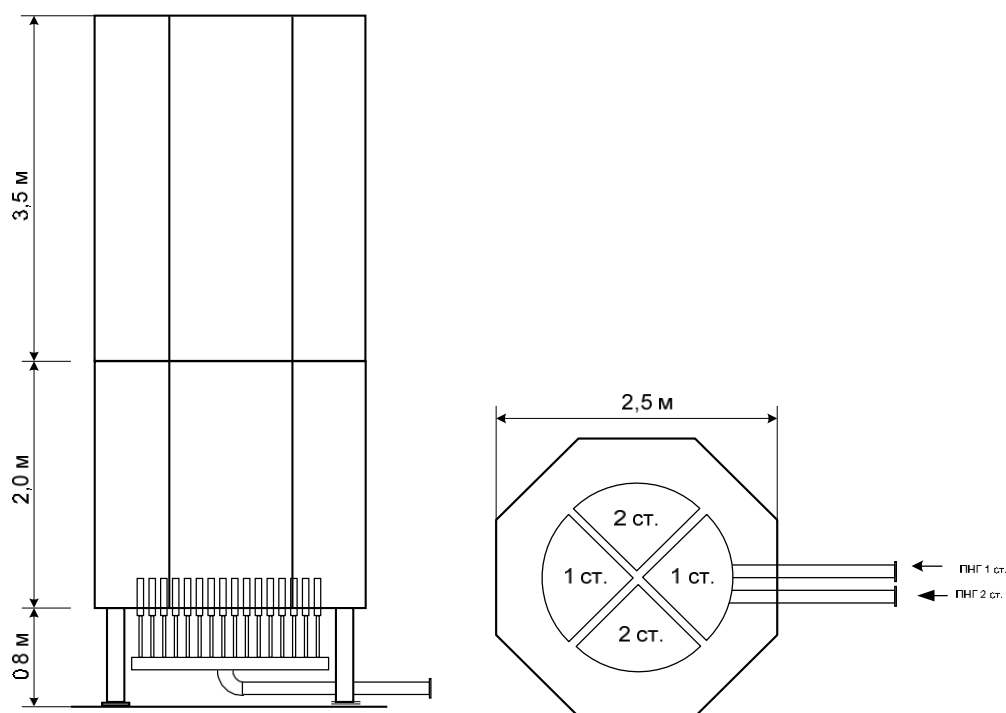


Рис. 3. Схема стенда испытания

Испытания проводились на двух газах со следующими характеристиками.

Вид ПНГ	Низшая теплота сгорания, МДж	Плотность относительная	Плотность абсолютная, кг/м ³	Давление, кПа	Число Воббе
Газ 1-й ступени сепарации	30,3	1,1106	1,338	20,0	31,34
Газ 2-й ступени сепарации	72,1	1,4491	1,745	1,2	65,10

Цели испытаний заключались в следующем:

1. Определение возможности одновременного сжигания двух видов газа на горелке данной конструкции.
2. Обеспечение на всех режимах бездымного горения без регулирования подачи воздуха.
3. Определение минимального и максимального значения количества подаваемого газа при раздельной подаче и при совместном сгорании обеих ступеней ПНГ.
4. Определение мощности горелки.
5. Определение зависимости конструктивных размеров отдельных горелок от вида газа.

В процессе проведения испытаний получены следующие результаты:

1. Горелка способна обеспечивать горение каждого газа в отдельности и при совместной подаче. Путем подбора диаметра форсунок, площади отверстий,

подачи первичного воздуха отдельных горелок и регулирования количества подачи общего воздуха обеспечено стабильное горение, без отрывов и проскоков пламени.

2. При одних и тех же площадях отверстий подачи первичного воздуха в горелках 1-й и 2-й ступеней сгорание происходило по-разному. При сгорании ПНГ 1-й ступени сепарации пламя склонно к отрыву. При сгорании ПНГ 2-й ступени сепарации происходит сгорание с дымом, что свидетельствует о неполноте сгорания.

Было выявлена следующая зависимость. Подача первичного воздуха значительно влияет на бездымное горение газов с высокой теплотой сгорания и отрыв пламени для газов с низкой теплотой сгорания. При определенном значении теплоты сгорания необходимо исключать подачу первичного воздуха и обеспечивать вместо кинетического горения диффузионное.

На рис. 4 показано горение газов 1-й и 2-й ступеней.



Рис. 4. Горение газов 1-й и 2-й ступеней

3. Минимальный расход ПНГ, обеспечивающий стабильный розжиг горелки на одном газе, соответствует для 1-й ступени сепарации – $150 \text{ м}^3/\text{ч}$, 2-й ступени сепарации – $130 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Максимальный объем сгорания на одном газе соответствует для 1-й ступени сепарации – $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$, 2-й ступени сепарации – $470 \text{ м}^3/\text{ч}$. При совместном сжигании – $3470 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствует максимальному объему выработки на установке подготовки нефти. Горелка работает без дыма, отрыва и проскока пламени. При максимальном расходе ПНГ в газопроводе давление не увеличивается. Это свидетельствует о том, что максимальное потребление горелки не достигнуто.

4. Мощность горелки составила от 1,3 до 39,3 МВт, коэффициент рабочего регулирования [1] составляет 30,2 при требуемом 5.

В результате проведенных работ получена конструкция горелки, обеспечивающая:

- необходимые эксплуатационные характеристики;
- простоту и надежность конструкции;
- простоту обслуживания;
- работу без принудительной подачи воздуха и его регулирование во время работы;
- возможность настройки и регулировки в зависимости от состава газа на месте применения горелки.

Список использованных источников и литературы

1. ГОСТ 21204-97. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 17 сентября 1997 г. № 313 взамен ГОСТ 21204-83. – 14 с.

Сведения об авторах

Алексей Петрович Ильин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели и установки», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Ижевск), ilalp@inbox.ru

Константин Викторович Стерхов, ведущий инженер-технолог АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), sterhovkv@belkam.com

Алексей Александрович Трифонов, начальник отдела подготовки и реализации газа управления подготовки нефти и газа АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), trifonovaa@belkam.com

Альберт Зинурович Файзрахманов, ведущий инженер, службы главного технолога нефтегазодобывающего управление № 2 АО «Белкамнефть» им. А.А. Волкова (Россия, г. Ижевск), fajzrakhmanovaz@belkam.com

Горелка для водогрейного котла на попутном нефтяном газе мощностью до 100 кВт

А. П. Ильин, К. В. Стерхов, А. А. Трифонов, А. З. Файзрахманов

Рассматривается конструкция горелки и вопросы технологии сжигания попутного нефтяного газа в котле отопительном.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, основная горелка запальная горелка, теплота сгорания, первичный воздух, вторичный воздух, число Воббе.

Burner for a hot water boiler using associated petroleum gas with a power of up to 100 kW

A. P. Ilyin, K. V. Sterkhov, A. A. Trifonov, A. Z. Faizrahmanov

The design of the burner and the technology of burning associated petroleum gas in a heating boiler are considered.

Keywords: associated petroleum gas, main burner, pilot burner, calorific value, primary air, secondary air, Wobbe number.

Максимально полезное использование попутного нефтяного газа является одной из приоритетных задач нефтедобывающих предприятий.

С одной стороны, этому способствует ужесточение законодательства, вводящее фактический запрет на сжигание ПНГ на факелах, а сейчас и контроль за количеством выбросов углекислого газа. С другой стороны, более полезное использование ПНГ позволит снизить потребление других источников энергии. В частности, электрической.

Сложность использования попутного нефтяного газа (ПНГ) заключается в его компонентном составе. В составе ПНГ Удмуртской Республики преобладает инертный газ – азот. Его концентрация, в среднем составляет 70...75 %. Данному ПНГ характерно большое количество углеводородов C_{3+} . К ним относятся пропан, бутан, пентан, гексан и т. д. Их количество в среднем 12 %. Также в составе ПНГ находятся пар воды и вода с частичками нефти в капельной форме.

Компонентные составы ПНГ отдельных месторождений отличаются друг от друга. Все это делает ПНГ Удмуртской Республики сложным в использовании.

В АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова разработан котел КВ-ЦБ, работающий на ПНГ. Помимо сложности в разработке и изготовлении котла, разработчики столкнулись и с проблемой выбора конструкции горелки для котла.

Сложность выбора заключается в том, что ее конструкция должна обладать сразу несколькими отличительными характеристиками: простота конструкции,

надежность, ремонтпригодность, возможность настройки под ПНГ с разным компонентным составом без изменения конструкции, розжиг ПНГ с высоким содержанием азота. Кроме того, к горелке предъявляются и обязательные требования законодательства РФ. Горелка должна соответствовать требованиям [1].

Внешний вид горелки представлен на рис. 1.

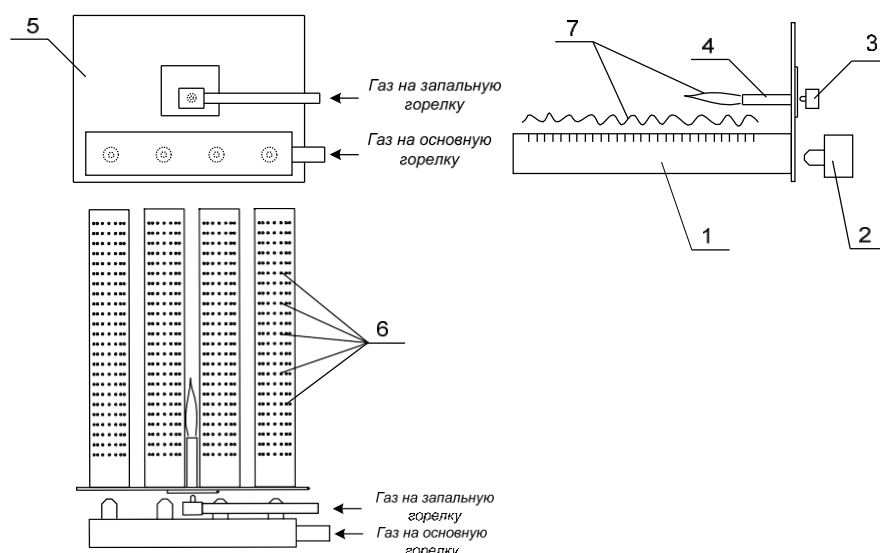


Рис. 1. Внешний вид горелки: 1 – смесительные камеры основной горелки; 2 – топливная рампа основной горелки с форсунками; 3 – топливная рампа запальной горелки с форсункой; 4 – горелочное устройство запальной горелки; 5 – панель горелки фронтальная; 6 – горелочные отверстия

В соответствии с [1] была определена горелка со следующими характеристиками:

1. С предварительным смешиванием газа с воздухом.

Подача первичного воздуха осуществляется за счет инжекции газом, вторичного – за счет разрежения в рабочем пространстве камер сгорания.

Горелка представляет собой топливную рампу с присоединенными к ней смесительными камерами. Смесительные камеры расположены горизонтально и имеют в верхней части горелочные отверстия, через которые выходит газозвоздушная смесь и сгорает. Данная конструкция позволяет изменять мощность горелки путем изменения количества и длины смесительных камер.

Горелка работает следующим образом. Газ поступает в рампу основной горелки и по ней распределяется к отдельным форсункам. Форсунки подают газ в смесительные камеры. Газ, истекая из форсунки, за счет инжекции подхватывая часть воздуха, (первичный воздух), поступает в смесительную камеру.

Далее газозвоздушная смесь распределяется по смесительной камере и через горелочные отверстия выходит в камеру сгорания котла. В котле имеются отверстия для подачи вторичного воздуха, который засасывается за счет разрежения в трубе котла.

Испытания горелки были проведены на разных попутных нефтяных газах с различным компонентным составом. На графике 2 показана зависимость расхода ПНГ и получаемого при этом тепла 4 газов. Теплоту сгорания 34,92 МДж/куб. м³ имеет природный газ.

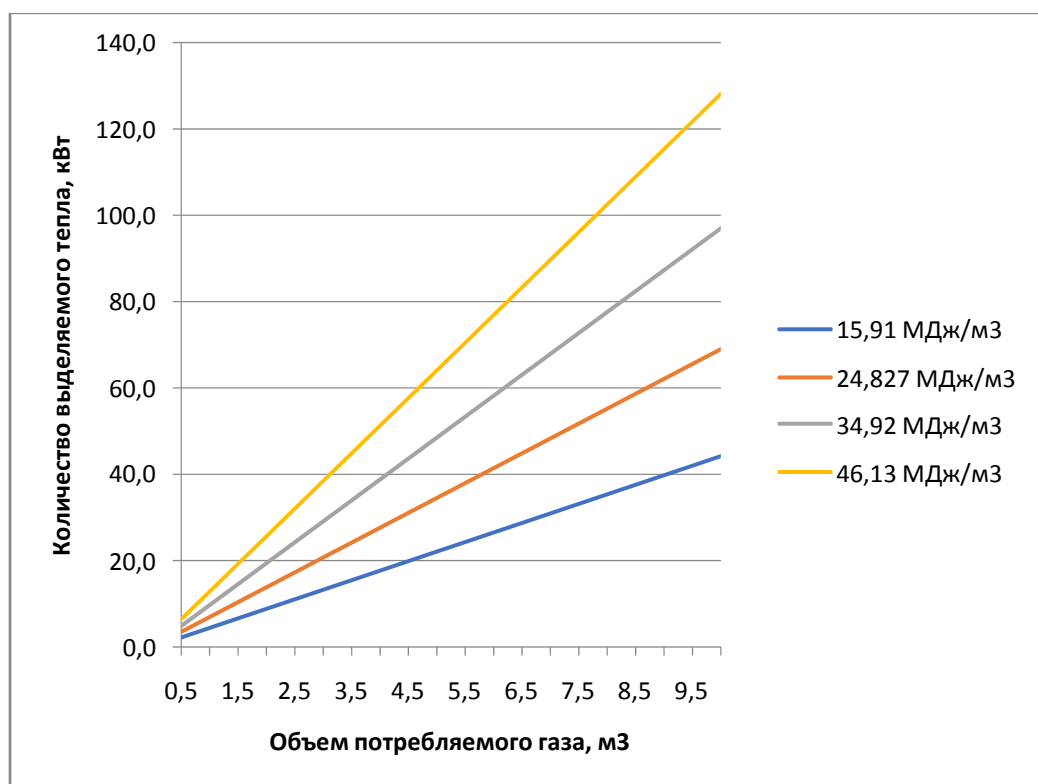


Рис. 2. Зависимость количества тепла, выделяемого из ПНГ различных месторождений

На рис. 3 зависимость низшей теплоты сгорания ПНГ от количества азота в нем по Удмуртской Республике.

Проведенные эксперименты показали, что горелку можно настроить под каждый ПНГ, изменяя диаметр форсунки и количество первичного воздуха.

Определено, что для газа с низкой теплотой сгорания необходимо уменьшать количество первичного воздуха, вплоть до его исключения. В противном случае происходит отрыв пламени. Это происходит именно из-за непропорционального количества воздуха. Проведенные эксперименты с уменьшением расхода газа показали, что изменение количества подаваемого газа и его давление не так значительно влияет на отрыв пламени при использовании ПНГ с низкой теплотой сгорания. Также подтверждением этого является эффект начала отрыва пламени у краев горелки, где наибольшее количество воздуха.

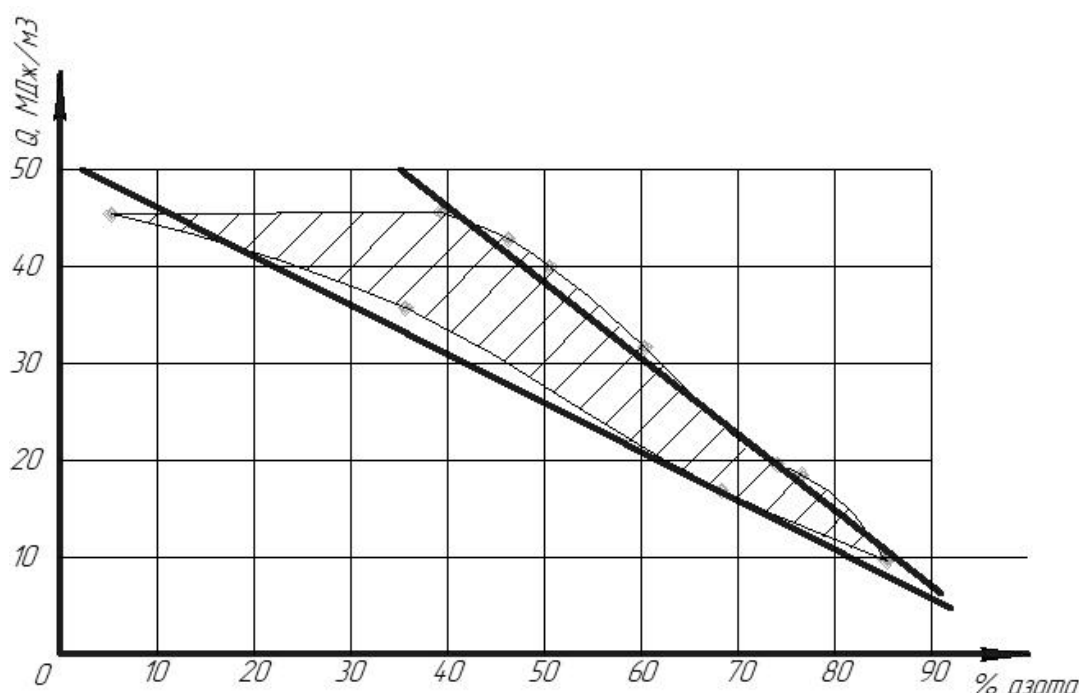


Рис. 3. Зависимость нижней теплоты сгорания ПНГ от количества азота в нем по Удмуртской Республике

Конструкция горелки позволяет осуществлять регулирование коэффициента избытка воздуха без изменения ее конструкции.

2. С низким номинальным давлением газа перед горелкой, до 5 кПа. Скорость истечения продуктов сгорания на выходе из горелки, низкая, до 20 м/с.

Выбор рабочего давления обусловлен его ограничением не более 5 кПа согласно [2], в котором указывается, что применение данного давления не относится к опасным производственным объектам. Это позволит применять горелку на нефтедобывающих предприятиях, не регистрируя новый опасный производственный объект.

3. Прямоточный, вертикальный характер потока, истекающего из горелки с возможностью регулирования характеристик факела.

Применение прямоточного характера истечения газоздушного потока с вертикальным направлением позволяет разместить горелку непосредственно в камере сгорания и упростить конструкцию топки котла. А регулирование количества подаваемого газа дает возможность либо плавного, либо ступенчатого изменения мощности горелки.

4. Автоматизация горелки отсутствует.

В составе горелки отсутствует какая-либо автоматика. Автоматизация работы горелки осуществляется за счет автоматики котла. Это позволяет упростить конструкцию горелки и исключает трудности адаптации двух систем автоматики (котла и горелки) в случае поставки горелки другим производителям котлов.

В составе горелки имеется запальная горелка. Она представляет собой аналогичную конструкцию основной горелки с инжекцией первичного воздуха

и только одним горелочным отверстием. Запальная горелка разжигается электрической искрой, получаемой от преобразователя сети 220 В.

Основной характеристикой использования горелки на разных газах является число Воббе. Оно характеризует постоянство теплового потока и определяется как отношение теплоты сгорания (Q) к корню квадратному относительной плотности газа (ρ).

$$W = \frac{Q}{\sqrt{\rho}}$$

Зависимость диаметра форсунки от числа Воббе представлена на рис. 4.

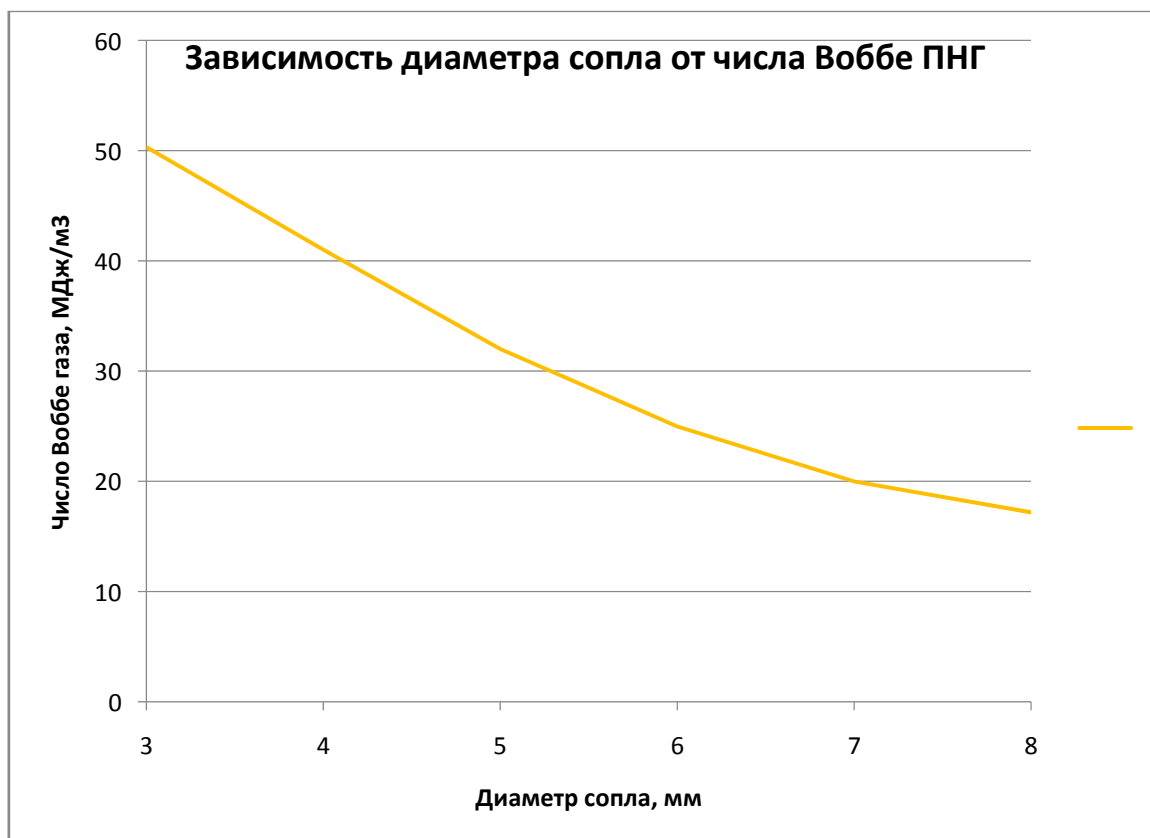


Рис. 4. Зависимость диаметра форсунки от числа Воббе

Таким образом, разработана и испытана горелка, способная работать без изменения ее конструкции на попутных нефтяных газах, различающихся по своим компонентным составам и имеющих значительные диапазоны значений теплоты сгорания и числа Воббе.

Список использованных источников и литературы

1. ГОСТ 21204-97. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 17 сентября 1997 г. N 313 взамен ГОСТ 21204-83: 14 с.

2. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 14.11.2023) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»: издание официальное: принят Государственной думой 20 июня 1997 г. – 40 с.

Сведения об авторах

Алексей Петрович Ильин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели и установки», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Ижевск), ilalp@inbox.ru

Константин Викторович Стерхов, ведущий инженер-технолог АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), sterhovkv@belkam.com;

Алексей Александрович Трифонов, начальник отдела подготовки и реализации газа управления подготовки нефти и газа АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), trifonovaa@belkam.com

Альберт Зинурович Файзрахманов, ведущий инженер, службы главного технолога нефтегазодобывающего управление № 2 АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), fajzrakhmanovaz@belkam.com

Варианты одновременного использования попутных нефтяных газов 1, 2 и 3-й ступеней сепарации

А. П. Ильин, К. В. Стерхов, А. А. Трифонов, А. З. Файзрахманов

Рассматриваются проблемы и технологии одновременного совместного использования двух видов попутных нефтяных газов на установках подготовки нефти.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, теплота сгорания, первичный воздух, вторичный воздух, число Воббе, путевой подогреватель.

Simultaneous use options associated petroleum gases of 1st, 2nd and 3rd separation stages

A. P. Ilyin, K. V. Sterkhov, A. A. Trifonov, A. Z. Faizrahmanov

The problems and technologies for the simultaneous joint use of two types of associated petroleum gases at oil treatment plants are considered.

Keywords: associated petroleum gas, calorific value, primary air, secondary air, Wobbe number, track heater.

Попутными нефтяными газами (ПНГ) 1 и 2, 3-й ступеней сепарации называют газы, выделяющиеся из нефти при дегазации на этапах ее подготовки. ПНГ первой ступени сепарации выделяется при первичной дегазации нефти и отличается более низкой теплотой сгорания, более высоким давлением и большими объемами выделения. Энергия ПНГ используется в технологических процессах для нагрева нефти и отопления административно-бытовых помещений.

В АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова полезное использование ПНГ превышает 95 %. Вместе с тем имеются установки подготовки нефти, где количества ПНГ не хватает даже на технологические нужды. В связи с этим был проведен аудит одной из установок с целью определения возможных причин и определения путей решения данной проблемы.

На установке сепарируется попутный нефтяной газ 1, 2 и 3-й ступеней сепарации. Газы направляются в путевые подогреватели для выработки тепловой энергии и подогрева сырой нефти. В зимнее время попутного нефтяного газа не хватает для подготовки нефти и используется топочная нефть.

Принципиальная технологическая схема подготовки нефти представлена на рис. 1

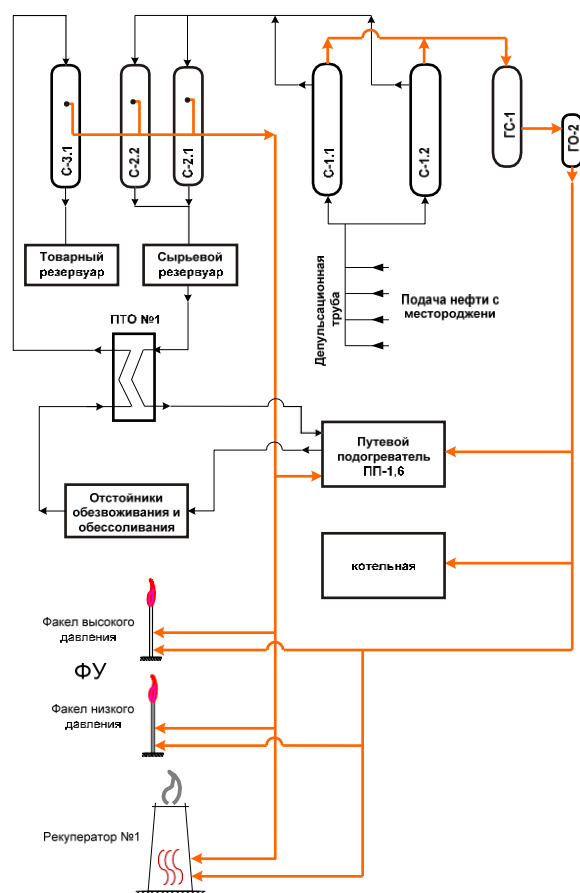


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема подготовки нефти

Подготовка нефти производится следующим образом. Нефть с месторождений поступает на сепараторы С 1.1, С 1.2, где производится ее дегазация с выделением попутного нефтяного газа 1-й ступени сепарации. Далее нефть направляется на сепараторы С 2.1, С 2.2. На них выделяется ПНГ 2-й ступени сепарации. Затем нефть через сырьевой резервуар и теплообменник направляется на путевой подогреватель и далее в отстойники обезвоживания и обессоливания. Окончательная сепарация нефти происходит на концевой сепарационной установке (КСУ) в сепараторе С 3.1 с выделением ПНГ 3-й ступени сепарации. В сепараторы С 1.1, С 1.2, С 2.1, С 2.2 нефть поступает в соответствии с режимами работы скважин и системой нефтесбора т. е. не равномерно.

Попутный нефтяной газ 1-й ступени сепарации после газового сепаратора ГС-1 и газового осушителя ГО-2 распределяется между двумя путевыми подогревателями ПП-1,6 № 1 и 2. Попутные нефтяные газы 2-й и 3-й ступеней сепарации объединяются в один газопровод и направляются только к путевому подогревателю ПП-1,6 № 1. В летний период и при аварийных случаях ПНГ может сжигаться на рекуператоре № 1 и факельных установках высокого и низкого давления.

При проведении аудита было выявлено, что с определенной периодичностью из дымохода путевого подогревателя ПП-1,6 № 1 выходит черный дым. Это свидетельствует о неполном сгорании ПНГ. Определено, что попутный нефтя-

ной газ 2-й, 3-й ступеней сепарации поступает в подогреватель не постоянно, а порциями. Периодическое поступление газа 2-й, 3-й ступеней сепарации происходит из-за неравномерности движения объемов нефти через сепараторы С 2.1, С 2.2. При использовании газа первой ступени сепарации данный эффект не выражен вследствие большого давления в газопроводе (от 0,15 до 0,3 МПа) и наличия регулятора давления газа перед горелками путевых подогревателей. Давление ПНГ 2-й, 3-й ступеней сепарации в газопроводе колеблется 0 до 0,035 МПа.

Графики изменения давления ПНГ в сепараторах С 1.1, С 2.1, С 3.1 представлены на рис. 2–4.

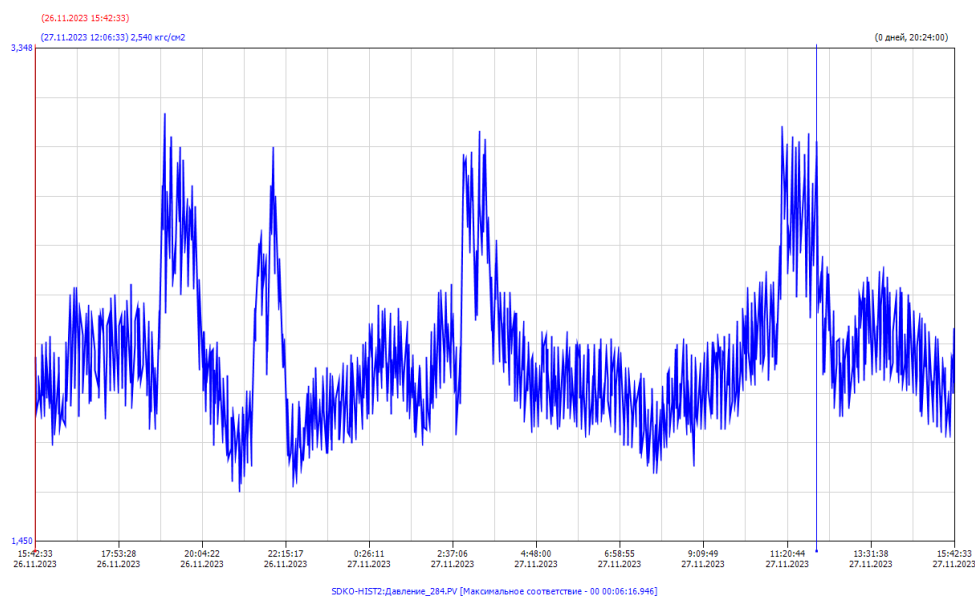


Рис. 2. Изменение давления ПНГ 1-й ступени сепарации за сутки в сепараторе С1.1

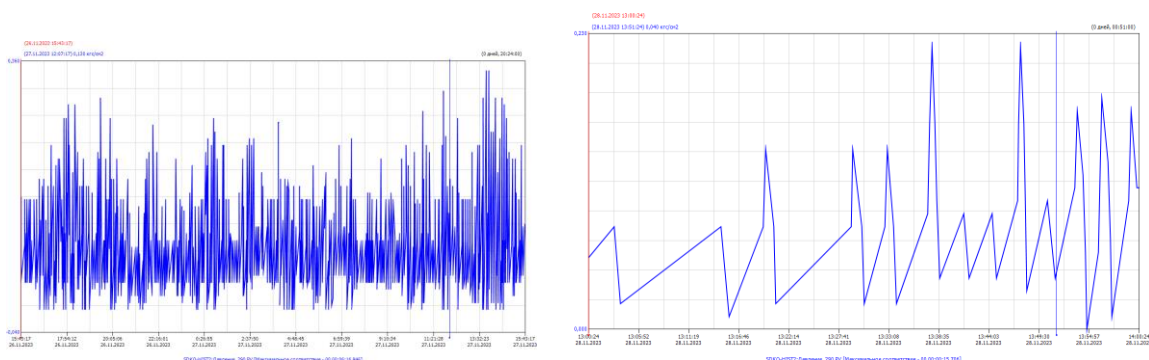


Рис. 3. Изменение давления ПНГ 2-й ступени сепарации за сутки и за 1 час в сепараторе С 2.1

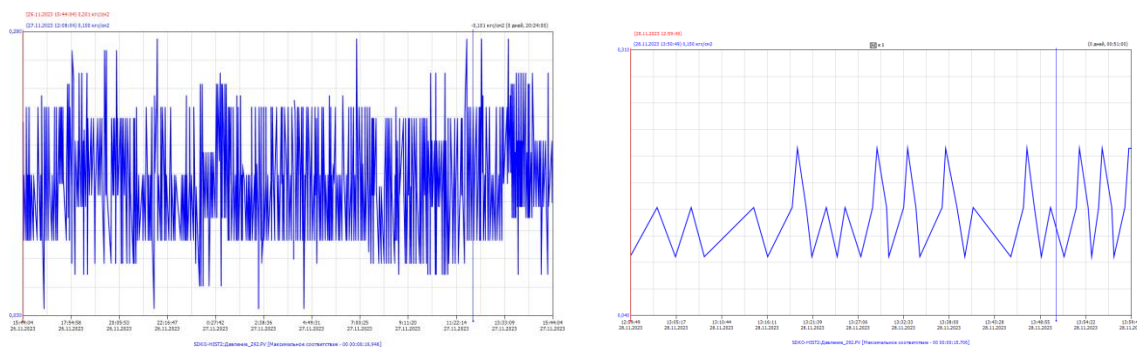


Рис. 4. Изменение давления ПНГ 3-й ступени сепарации за сутки и за 1 час в сепараторе С 3.1

На путевых подогревателях ПП-1,6 № 1 и 2 установлены горелки типа ГМГ и УГК. Обе горелки позволяют использовать ПНГ 1, 2 и 3-й ступеней сепарации. В горелке УГК воздух подается за счет разрежения в топочной камере, в ГМГ – принудительно за счет вентилятора. Регулировка подачи количества воздуха осуществляется на обоих типах горелок вручную, заслонками.

Проблемой неполноты сгорания ПНГ 2-й, 3-й ступеней сепарации является то, что при совместном сгорании ПНГ 1-й, 2-й, 3-й ступеней сепарации необходимо в 3,7 раза больше воздуха, чем при сгорании только 1-й ступени сепарации. Вместе с тем наличие избыточного количества воздуха при горении 1-й ступени сепарации, когда ПНГ 2-й, 3-й ступеней отсутствуют, приводит к отрыву пламени.

Это объясняется тем, что ПНГ 1-й ступени имеет низшую теплоту сгорания $15,62 \text{ МДж/м}^3$, а ПНГ 2-й и 3-й ступеней сепарации $41,52 \text{ МДж/м}^3$. Количество поступающего газа на одну горелку путевого подогревателя ПП-1,6 № 1 составляет: газа 1-й ступени сепарации – $64 \text{ м}^3/\text{ч}$, газа 2-й, 3-й ступеней сепарации – $38 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Был проведен тепловой расчет работы путевых подогревателей с определением потенциального количества тепла при условии полного сгорания газов, подводимых к путевым подогревателям ПП-1,6 № 1 и 2.

На рис. 5 показан график удельной затраченной энергии на подогрев нефти за один зимний месяц. С учетом того, что в путевом подогревателе № 1 готовится в 1,5 раза меньше нефти, чем в путевом подогревателе № 2, затраты энергии на подготовку нефти значительно выше. Удельный показатель затрат энергии на подготовку одной тонны нефти в путевом подогревателе № 1 составляет в среднем 159 МДж/т , в № 2 – 79 МДж/т .

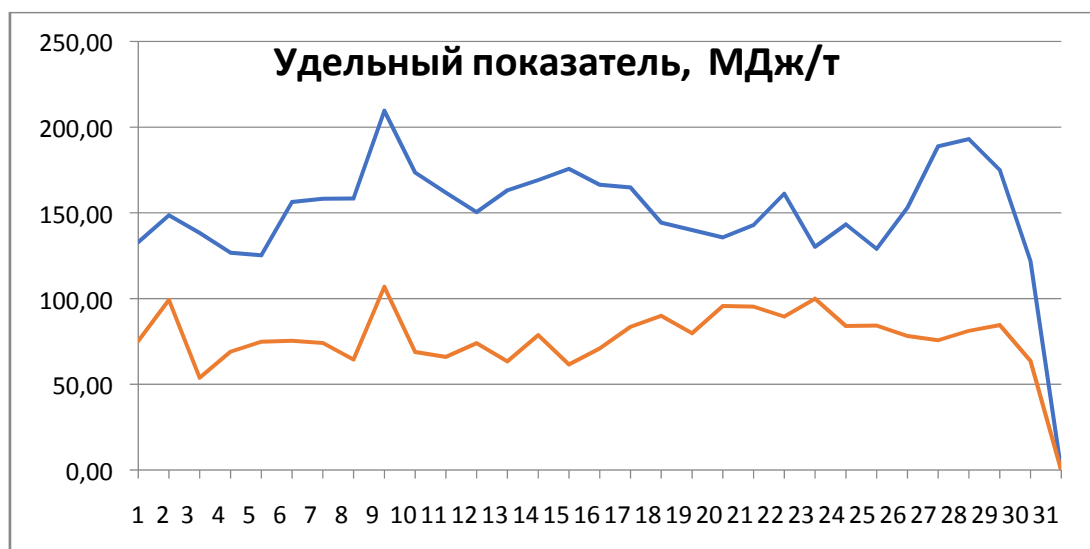


Рис. 5. Удельные затраты энергии для подогрева нефти на путевых подогревателях ПП-1,6 №1, 2., МДж/т

Расчеты подтвердили, что газ 2-й, 3-й ступеней сепарации сгорает не полностью.

Количество неиспользуемой энергии ПНГ 2-й, 3-й ступени сепарации эквивалентно 54 % ПНГ 1-й ступени сепарации и 46 % топочной нефти.

Организация полного сгорания ПНГ 2-й, 3-й ступени даст возможность значительно сократить количество топочной нефти в зимний период.

Для организации полного сгорания определены 2 способа:

1. Организация смешивания (гомогенизация) ПНГ 1 и 2, 3-й ступеней сепарации.
2. Организация регулирования подачи воздуха в топочную камеру в зависимости от поступления ПНГ 2-й, 3-й ступени сепарации.

Организация смешивания (гомогенизация) ПНГ 1 и 2, 3-й ступеней сепарации

Смешивание газов предлагается произвести путем установки эжектора (смесителя). Эжектор позволяет смешивать два вида газов путем создания разрежения при движении эжектирующего газа и за счет этого подсасывать эжектируемый газ. Соотношения эжектирующего газа к эжектируемому составляет 2,5...3, что находится в диапазоне работ данных аппаратов.

Достоинством установки эжектора является создание небольшого разрежения в КСУ, что способствует увеличению выделения ПНГ из нефти.

Смешение ПНГ 1, 2, 3-й ступеней позволит повысить теплоту сгорания 1-й ступени сепарации с 15,62 до 30 МДж/м³. Это позволит сделать более стабильное горение ПНГ и настроить имеющиеся горелки на один вид газа.

Компания СП ТермоБрест ООО предлагает смеситель газовый, который можно установить на линию смешивания газов. Смесителя представлен на рис. 6.

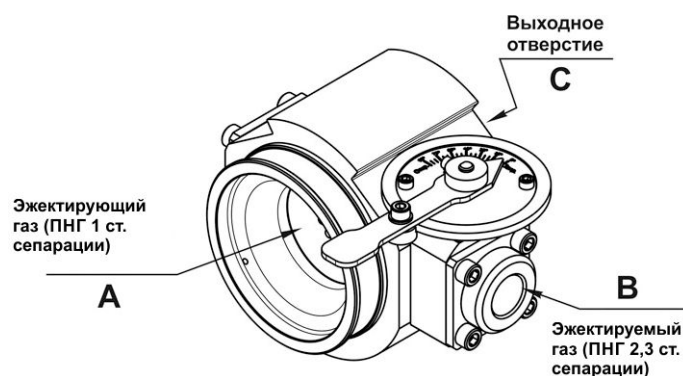


Рис. 6. Смеситель газов СП ТермоБрест ООО

Схема установки смесителя газов представлена на рис. 7.

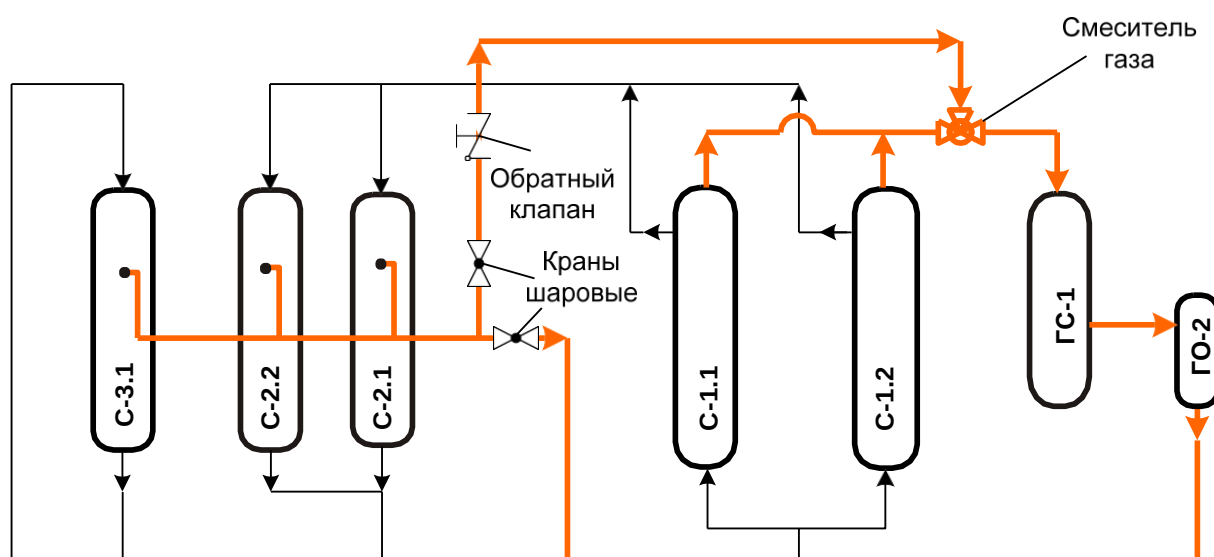


Рис. 7. Схема установки смесителя газов

В соответствии со схемой рис. 7 необходимо проложить газопровод ПНГ 2-й, 3-й ступеней сепарации к газопроводу ПНГ 1-й ступени сепарации, установить два шаровых крана и обратный клапан. Смеситель установить в газопровод первой ступени сепарации перед газовым сепаратором ГС-1. Это позволит осушить газ 2-й, 3-й ступени и выровнять компонентный состав смешанных газов по объему.

Организация регулирования подачи воздуха в зависимости от ПНГ 2-й, 3-й ступени

Установка смесителя в газопровод 1 ступени сепарации требует значительных капитальных вложений и проведение проектно-изыскательских работ.

Основной причиной не полного сгорания ПНГ 2, 3 ступеней сепарации является подача ПНГ периодическими порциями и отсутствие автоматической регулировки подачи воздуха.

Горелка ГМГ обеспечивает подачу воздуха принудительно вентилятором. Регулирование подачи воздуха обеспечивается ручным открытием или закрытием воздушной заслонки, установленной в воздухопроводе.

Изменение количества воздуха может быть осуществлено двумя способами:

- установкой частотного преобразователя токов на вентиляторе;
- установкой заслонки с электрическим приводом в воздухопроводе.

Управление частотным преобразователем токов и заслонкой с приводом можно произвести контроллером печи ПП-1,6 по сигналу датчика давления в газопроводе ПНГ 1 и 2, 3-й ступеней сепарации.

Установка частотного преобразователя токов является более дорогостоящей, чем установка заслонки с электрическим приводом.

На рис. 8 представлена заслонка с электрическим приводом, производства СП ТермоБрест ООО, схема ее установки и регулирования.

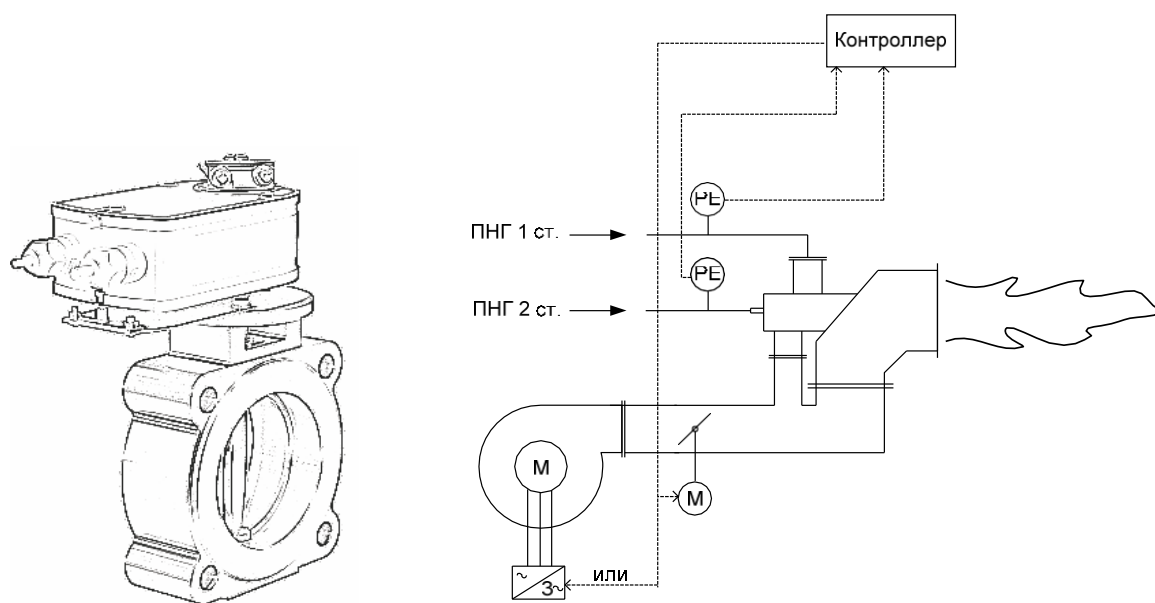


Рис. 8. Заслонка с электрическим приводом СП ТермоБрест ООО, схема ее установки и регулирования

Использование установки смесителя или заслонки с электрическим приводом позволят обеспечить полное сгорание ПНГ 1 и 2,3 ступеней сепарации и сократить потребление топочной нефти до 40...50 % в зимний период.

Сведения об авторах

Алексей Петрович Ильин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели и установки», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Ижевск), ilalp@inbox.ru

Константин Викторович Стерхов, ведущий инженер-технолог АО «Белкамнефть» им. А.А. Волкова (Россия, г. Ижевск), sterhovkv@belkam.com;

Алексей Александрович Трифонов, начальник отдела подготовки и реализации газа управления подготовки нефти и газа АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), trifonova@belkam.com

Альберт Зинурович Файзрахманов, ведущий инженер, службы главного технолога нефтегазодобывающего управление № 2 АО «Белкамнефть» им. А. А. Волкова (Россия, г. Ижевск), fajzrakhmanov@belkam.com

СЕКЦИЯ № 5
ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.518

**Модель системы автоматического полива комнатных растений
на основе микроконтроллера Arduino Uno**

Д. А. Кочкин, В. А. Афанасьев

Статья посвящена разработке модели системы автоматического полива комнатных растений. Разрабатываемая система позволит выполнять управление автоматическим поливом комнатных растений средствами микроконтроллера Arduino Uno, а также получать информацию об уровне влажности почвы и уровне наполнения резервуаров с водой.

Ключевые слова: система полива, уровень влажности, уровень объема, микроконтроллер.

**A model of an automatic watering system for indoor plants based
on an Arduino Uno microcontroller**

D. A. Kochkin, V. A. Afanasyev

The article is devoted to the development of a model of an automatic watering system for indoor plants. The system under development will allow you to control the automatic watering of indoor plants by means of the Arduino Uno microcontroller, as well as receive information about the level of soil moisture and the level of filling of water tanks.

Keywords: irrigation system, humidity level, volume level, microcontroller.

Тема статьи является актуальной, поскольку полив является одним из самых важных аспектов ухода за комнатными растениями. Правильный полив необходим для обеспечения оптимальных условий и роста комнатных растений. В связи с этим предлагается разработать систему автоматического полива комнатных растений.

Целью является разработка модели системы автоматического полива комнатных растений.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **задачи**:

1. Обзор и анализ существующего положения.
2. Разработка структуры системы полива комнатных растений.
3. Выбор программных и технических средств для системы полива комнатных растений.

4. Разработка модели устройства для автоматического полива растений в системе автоматизированного проектирования.

Наиболее близким по функциональным возможностям является блок управления поливом «Karcher Sensotimer ST6» [2]. С помощью данного устройства выполняется полив растений и контроль влажности почвы. При этом отсутствует возможность информирования пользователя о состоянии системы полива. Устройство обладает высокой стоимостью и используется для промышленного полива растений в открытом грунте или в теплицах. С учетом выявленных особенностей существующих устройств полива растений было принято решение о разработке системы, которая будет выполнять следующие функции:

1. Автоматический полив комнатных растений, исходя из уровня влажности почвы.

2. Информирование пользователя о состоянии системы через оповещения по СМС.

3. Автоматическое регулирование уровня воды в резервуарах для полива.

Исходя из функций, которые должна выполнять система полива комнатных растений, была разработана структура этой системы (рис. 1).

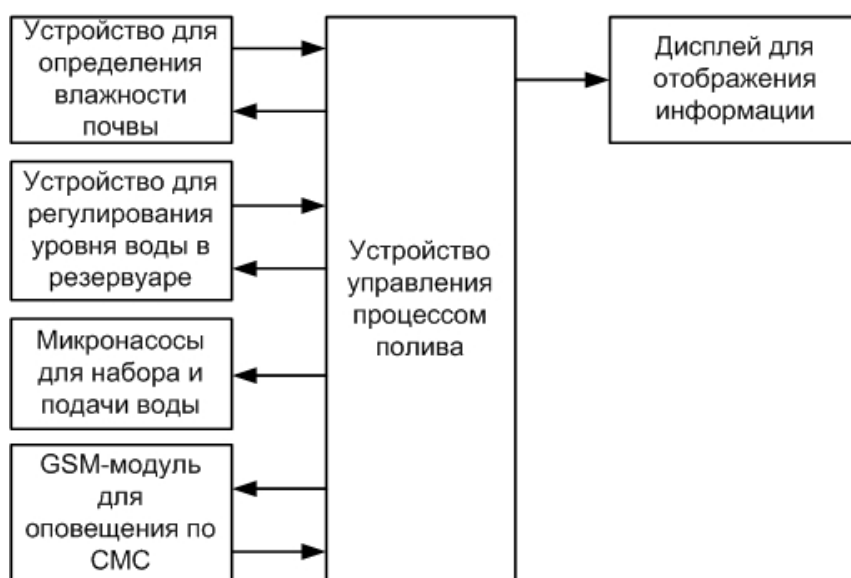


Рис. 1. Структура системы полива комнатных растений

В состав комплекса технических средств системы полива входят следующие элементы:

1. Микроконтроллер Arduino Uno R3 [1] используется в качестве устройства управления процессом полива.

2. Датчик влажности почвы FC-28 используется для измерения объемного содержания воды [4].

3. GSM-модуль SIM900D работает в качестве мобильного телефона или модема, который используется для связи микроконтроллера по сети [8].

4. Микронасосы 3-6В используется для набора воды и подачи воды из резервуара в почву [7].

5. Ультразвуковой датчик HC-SR04 используется для регулирования уровня воды в резервуаре [5].

6. Дисплей LCD2004 используется в качестве устройства вывода (отображения) информации. Дисплей способен отображать одновременно до 80 символов (20 столбцов, 4 строки) [6].

Принцип работы системы заключается в следующем: сигналы с датчиков поступают на входные порты микроконтроллера; полученные данные обрабатываются микроконтроллером по заранее разработанному алгоритму, результатом которого является выдача управляющих сигналов на насосы и на дисплей.

На рис. 2 представлена схема алгоритма работы программы для микроконтроллера.

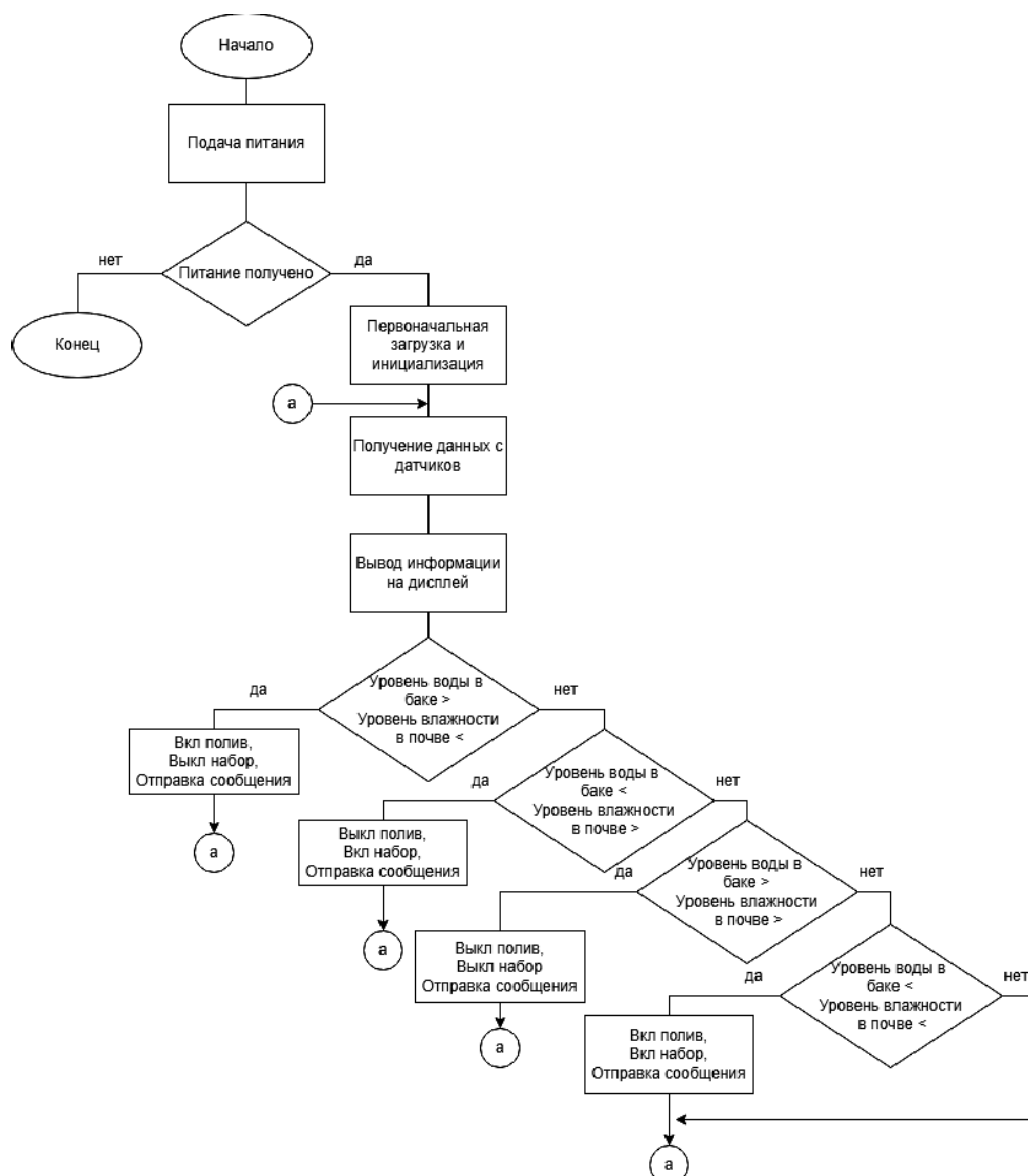


Рис. 2. Схема алгоритма работы программы для микроконтроллера

Разработка программного обеспечения для микроконтроллера велась в среде программирования Arduino IDE. В результате программным обеспечением реализуются следующие режимы работы системы:

Список использованных источников и литературы

1. Arduino Uno R3: схема платы, пины, подключение, питание, память. – URL: <https://arduinomaster.ru/platy-arduino/plata-arduino-uno>.
2. Karcher SensoTimer ST6 ecologic 2.645-213 - Бытовая техника в фирменном магазине KARCHER. – URL: <https://k-online.ru/blok-upravleniya-polivom-karcher-sensotimer-st6-eco-ogic>
3. Proteus – программа для автоматизированного проектирования электронных схем. – URL: <https://proteus.com.ru>.
4. Ардуино датчик влажности почвы FC-28 своими руками. [Электронный ресурс] URL: <https://arduinoplus.ru/testiruem-pochvu-s-arduino-i-datchikom-vlazhnosti-fc-28>.
5. Датчик расстояния HC-SR04 - ультразвуковой модуль Ардуино. – URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/ultrazvukovoj-dalnomer-hc-sr04>.
6. Насос для воды - купить микронасос для Arduino с доставкой по России и СНГ. – URL: <https://voltiq.ru/shop/submersible-mini-pump-3-6-v>.
7. Текстовый экран 20×4 / I²C: инструкция по подключению и примеры использования [Амперка / Вики]. – URL: <http://wiki.amperka.ru/products:display-lcd-text-20x4-i2c>
8. Управление ардуино через GSM /GPRS модули A6, A7 SIM800, SIM900. – URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/gsm-gprs-modul-arduino>.

Сведения об авторах

Данил Андреевич Кочкин, магистрант группы М22-782-1, кафедры «Вычислительная техника», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Ижевск), danilkochkin2@mail.ru

Владимир Александрович Афанасьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоэлектронной аппаратуры», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), double_ava@mail.ru

Разработка автоматизированной информационной системы компаний по продаже и ремонту оборудования

О. А. Игнатьев, Т. В. Кривоногова

В статье представлен алгоритм создания автоматизированной информационной системы, предназначенной для компаний, занимающихся продажей и ремонтом технического оборудования. Предложен выбор инструментов для системного программного обеспечения, технического обеспечения, спроектированы компоненты информационной системы, предложен методы защиты информации.

Ключевые слова: система, приложение, база данных, функции, верстка, программирование, пользователь.

Development of an automated information system for companies selling and repairing equipment

O. A. Ignatiev, T. V. Krivonogova

The article presents an algorithm for creating an automated information system designed for companies engaged in the sale and repair of technical equipment. The choice of tools for system software and technical support is proposed, the components of the information system are designed, and methods of information protection are proposed.

Keywords: system, application, database, functions, layout, programming, user.

В современном мире информатизация и автоматизация процессов – залог успешного существования и развития любого предприятия. Даже небольшой магазин, сервисный центр или бюро ремонта стараются идти в ногу со временем, информатизировать и автоматизировать свою деятельность. Особенно это относится к компаниям, работающим с клиентами, ведь удовлетворенность клиентов, сохранение имиджа компании и ее конкурентоспособность на рынке являются ключевыми факторами.

Магазины либо фирмы, продающие оборудование, ставят перед собой задачу обеспечения надежной и эффективной службы сервисной поддержки проданного оборудования.

Таким образом, возникла необходимость разработки автоматизированной информационной системы, предназначенной для компаний, занимающихся продажей и ремонтом технического оборудования, которая бы предоставила возможность эффективного оказания поддержки клиентам в случае возникновения проблем или неисправностей с приобретенным оборудованием.

Важным аспектом разработки и реализации такой системы является анализ требований и потребностей клиентов, чтобы система максимально

соответствовала их ожиданиям и обеспечивала эффективное решение их проблем. Также необходимо учесть особенности конкретного вида оборудования и его технические характеристики при разработке функционала системы.

Система должна обеспечивать следующие функции:

- регистрация запросов на поддержку от клиентов;
- организация и управление процессом обработки запросов;
- отслеживание статуса запросов;
- учет информации о клиентах и истории запросов;
- предоставление доступа администратору к базе данных;
- взаимодействие с клиентами через различные каналы связи (телефон, электронная почта и т. д.).

При создании системы планируется решить ряд задач: принять решение по системному программному обеспечению; принять решение по техническому обеспечению; спроектировать компоненты информационной системы; реализовать интерфейс системы.

В ходе проектирования применяем CASE-средства (Computer - Aided Software Engineering) – это методы и технологии, которые позволяют проектировать различные информационные системы (в частности, базы данных) и автоматизировать их создание [1].

Для разработки автоматизированной системы необходимо выбрать инструменты.

Для начала определимся с приложением для администрирования системы управления базами данных (СУБД), рассмотрим некоторые – MySQL Workbench, phpMyAdmin, Ar-wik Builder.

MySQL Workbench [2] – официальная система как для проектирования, так и для администрирования баз данных MySQL. Удобный графический интерфейс позволяет легко создавать структуру базы любой сложности, а наглядность позволит легко ориентироваться. Плюсами при проектировании являются наглядность и простота редактирования, а также разработка не требует подключения к серверу. Кроме того, для администрирования это самый удобный инструмент с хорошо развитым графическим интерфейсом. Однако у данной системы недостаточно развит буфер обмена, да и запросы необходимо писать самому, потому что отсутствует конструктор запросов.

PhpMyAdmin [3] – программа, которая позволяет управлять базами данных через удобный графический интерфейс. Ее устанавливают на сервер, где хранится сайт, а затем открывают в браузере для удаленного администрирования СУБД. Проще говоря, можно отдавать команды путем нажатия на кнопки в пользовательском веб-интерфейсе, а не вручную расписывать их в терминале. Плюсами при администрировании является возможность запускать программу непосредственно на сервере, что удобно при хостинге и когда хостер запрещает удаленный доступ к базе, ну а минус – в сравнении с MySQL Workbench менее удобный интерфейс.

Ar-wik Builder [4] – онлайн-сервис для разработки структуры баз данных и для работы по созданию запросов с использованием конструкторов. Как

и в случае с предыдущим инструментом, графический интерфейс позволяет легко манипулировать таблицами, их полями и связями между ними. Также этот сервис позволяет внедрять PHP код непосредственно в запросы, не заботясь о необходимости проверки данных. Все проверки выполняются автоматически.

Достоинства сервиса: наглядность, простота редактирования, не требует подключения к серверу, удобный конструктор запросов с возможностью внедрения PHP-функций, удобный импорт/экспорт проекта и его частей, возможность обмена проектами с другими пользователями сервиса. Однако хранимые процедуры и триггеры необходимо писать разработчику самостоятельно, для них конструкторы не предусмотрены, кроме того, не предусмотрено непосредственное администрирование.

Анализируя перечисленные инструменты, делаем выбор в пользу приложения RHPMyAdmin, которое позволяет администрировать СУБД MySQL [5].

MySQL из самых популярных СУБД для веб-приложений и фактически является стандартом для веб-серверов, которые работают под управлением операционной системы Linux. MySQL – это бесплатный пакет программ, однако новые версии выходят постоянно, расширяя функционал и улучшая безопасность. В бесплатной версии наибольший упор делается на скорость и надежность, а не на полноту функционала, который может стать и достоинством, и недостатком – в зависимости от области внедрения. Существуют специальные платные версии, предназначенные для коммерческого использования.

Для разработки клиентской части сайта планируется использовать язык программирования JavaScript (JS) [6] – мультипарадигменный язык, который поддерживает объектно ориентированный, императивный и функциональный стили.

Adobe Photoshop [7] – условно бесплатный растровый графический редактор, будем использовать для создания и редактирования изображений.

В качестве текстового редактора выбираем Visual Studio Code [8] – редактор исходного кода, разработанный Microsoft для Windows, Linux и macOS, который можно использовать с различными языками программирования, включая C, C #, C ++, Fortran, Go, Java, JavaScript, Node.js, Питон, Раст и Джулия. Visual Studio Code позиционируется как «легкий» редактор кода для кросс-платформенной разработки веб и облачных приложений.

Для сбора информации о проекте, написания сервиса и тестирования предлагается использовать браузер Google Chrome. Также планируется протестировать сайт в браузерах Mozilla Firefox и Яндекс Браузер.

При разработке программной части системы определена структура, построенная логическая и физическая модель базы данных. Затем создана веб-страница и ее элементы, указаны стили с помощью CSS и написан код на JavaScript для создания «живости» сайта. Последним этапом программной разработки являлось написание backend-код на PHP для того, чтобы связать клиентскую и серверную части системы.

Для верстки сайтов в современном веб-программировании используется блочная верстка, то есть контент разбивается на блоки с помощью тега `<div>`. В нашем случае использовалась бесплатная CSS-библиотека Bootstrap [9], в которой уже написаны основные блоки, а также она обеспечивает высокую скорость и легкость разработки так называемой front-end части сайта, то что видит пользователь. Библиотека включает в себя HTML- и CSS-шаблоны оформления для форм, кнопок, блоков навигации и прочих компонентов веб-интерфейса.

Для написания скриптов использовался встраиваемый язык программирования JavaScript, были реализованы функции открытия и закрытия блоков «Регистрации» и «Авторизации» на сайте.

Серверная часть или back-end сайта была написана с помощью PHP-скриптового языка общего назначения, интенсивно применяемого для разработки веб-приложений [10]. С его помощью реализуется обращение к базе данных, манипулирование ею – добавление, удаление, изменение или вывод данных. Регистрация, авторизация, администрирование таблиц базы данных – это все PHP.

Для создания базы данных с использованием phpMyAdmin – разработали табл. 1–6, содержащие информацию о устройствах, комплектующих к ним, пользователях и договорах.

Таблица 1. «Комплектующие», отражает информацию об оставшихся комплектующих для конкретного устройства

#	Имя	Тип	Сравнение	Атрибуты	Null	По умолчанию	Комментарии	Дополнительно	Действие
☐ 1	id 🔑	int			Нет	Нен		AUTO_INCREMENT	Ещё ▾
☐ 2	smartPhone_id 🔑	int			Нет	Нен			Ещё ▾
☐ 3	glass	int			Нет	Нен			Ещё ▾
☐ 4	film	int			Нет	Нен			Ещё ▾
☐ 5	battery	int			Нет	Нен			Ещё ▾

Таблица 2. «Договор покупки», отражает информацию о покупках, получена из «абстрактного магазина» техники

#	Имя	Тип	Сравнение	Атрибуты	Null	По умолчанию	Комментарии	Дополнительно	Действие
☐ 1	id 🔑	int			Нет	Нен		AUTO_INCREMENT	Ещё ▾
☐ 2	smartPhone_id 🔑	int			Нет	Нен			Ещё ▾
☐ 3	date_buy	date			Нет	Нен			Ещё ▾
☐ 4	FIO_buyer	varchar(100)	utf8mb4_unicode_ci		Нет	Нен			Ещё ▾

Таблица 3. «Договор обслуживания» – заявки, отправленные в сервисный центр

#	Имя	Тип	Сравнение	Атрибуты	Null	По умолчанию	Комментарии	Дополнительно	Действие
☐ 1	id 🔑	int			Нет	Нем		AUTO_INCREMENT	Ещё ▾
☐ 2	user_id 🔑	int			Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 3	smartphone_id 🔑	int			Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 4	date	date			Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 5	type	int			Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 6	value	text	utf8mb4_unicode_ci		Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 7	status	varchar(30)	utf8mb4_unicode_ci		Нет	Нем			Ещё ▾

Таблица 4. «Роли», отражает информацию о ролях пользователей, используемых в системе

#	Имя	Тип	Сравнение	Атрибуты	Null	По умолчанию	Комментарии	Дополнительно	Действие
☐ 1	id 🔑	int			Нет	Нем		AUTO_INCREMENT	Ещё ▾
☐ 2	role	varchar(16)	utf8mb4_general_ci		Нет	Нем			Ещё ▾

Таблица 5. «Смартфоны», отражает информацию о смартфонах и их ценах

#	Имя	Тип	Сравнение	Атрибуты	Null	По умолчанию	Комментарии	Дополнительно	Действие
☐ 1	id 🔑	int			Нет	Нем		AUTO_INCREMENT	Ещё ▾
☐ 2	name	varchar(30)	utf8mb4_unicode_ci		Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 3	price	int			Нет	Нем			Ещё ▾

Таблица 6. «Пользователи», отражает информацию о пользователях в системе

#	Имя	Тип	Сравнение	Атрибуты	Null	По умолчанию	Комментарии	Дополнительно	Действие
☐ 1	id 🔑	int			Нет	Нем		AUTO_INCREMENT	Ещё ▾
☐ 2	login	varchar(16)	utf8mb4_unicode_ci		Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 3	password	varchar(16)	utf8mb4_unicode_ci		Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 4	FIO	varchar(100)	utf8mb4_unicode_ci		Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 5	role_id 🔑	int			Нет	Нем			Ещё ▾
☐ 6	phone	varchar(12)	utf8mb4_unicode_ci		Нет	Нем			Ещё ▾

Разработанная схема базы данных представлена на рисунке.

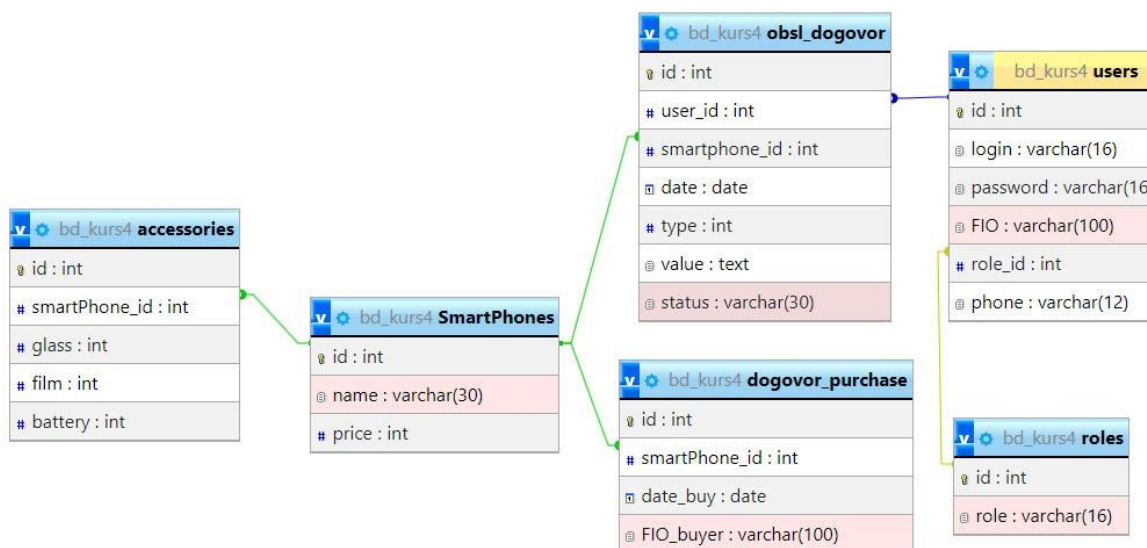


Схема базы данных

На этапе составления пользовательских сценариев установили количество экранов, их краткое содержание и положение в общей структуре. Разработаны следующие экранные формы: регистрация пользователя, авторизация пользователя, главная страница сайта, админ-панель, личный профиль пользователя.

В ходе следующего этапа разработки интерфейса – прототипирования – было проверено, насколько последователен путь оператора при пользовании сайтом, также были выявлены и устранены препятствия, которые возникли в процессе взаимодействия с продуктом.

Система была протестирована, для имитации работы сервера на локальном компьютере использовалась OpenServer – это портативная серверная платформа и программная среда, созданная специально для веб-разработчиков с учетом их рекомендаций и пожеланий [11].

Особое внимание было уделено защите системы от внешних угроз. Как правило, это один из наиболее острых вопросов в контексте информационной безопасности.

Для безопасности используется Брандмауэр (Firewall), входящий в состав операционной системы, антивирус, а также идентификация пользователей.

В процессе идентификации используется традиционно аутентификация (Authentication) – использование уязвимостей в механизмах проверки идентификатора пользователя, службы или приложения, которые направлены на обход системы и авторизация (Authorization) – определения уровня прав доступа пользователя, службы или приложения.

Чтобы исключить неправомерный доступ к информации на сайте, используются парольная защита и разграничение прав пользователей по статусу в системе.

Таким образом, результатом работы является автоматизированная информационная система, позволяющая фирмам по продаже и ремонту оборудо-

вания обеспечивать качественную сервисную поддержку клиентов и
улучшать качество их обслуживания.

Это позволит компаниям стать более конкурентоспособными на рынке и укрепить свою репутацию как надежного поставщика оборудования с качественной сервисной поддержкой.

Список использованных источников и литературы

1. CASE-средства проектирования баз. – URL: <https://hsbi.hse.ru/articles/case-sredstva-proektirovaniya-baz-dannykh>.
2. MySQL Workbench. – URL: <https://www.mysql.com/products/workbench> (дата обращения: 26.12.2023).
3. Что такое phpMyAdmin. – URL: <https://mchost.ru/articles/chto-takoe-phpmyadmin>.
4. Сравнение инструментов для разработки баз данных MySQL. – URL: <https://habr.com/ru/sandbox/86497>.
5. Что такое MySQL. – URL: <https://www.websiterating.com/ru/web-hosting/glossary/what-is-mysql> (дата обращения: 26.12.2023).
6. JavaScript - Википедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/JavaScript#:~:text=JavaScript%20\(%2F%20'%20d3%20a%2C%20программного%20доступа%20к%20объектам%20приложений](https://ru.wikipedia.org/wiki/JavaScript#:~:text=JavaScript%20(%2F%20'%20d3%20a%2C%20программного%20доступа%20к%20объектам%20приложений).
7. Adobe Photoshop-Википедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Adobe_Photoshop#:~:text=Adobe%20Photoshop%20\(%2B%20'd%20'f%20t%20p%2D%2C%20Эд%20уби,однако%20имеет%20некоторые%20векторные%20инструменты](https://ru.wikipedia.org/wiki/Adobe_Photoshop#:~:text=Adobe%20Photoshop%20(%2B%20'd%20'f%20t%20p%2D%2C%20Эд%20уби,однако%20имеет%20некоторые%20векторные%20инструменты).
8. Visual Studio Code. – URL: <https://code.visualstudio.com/приложения%2C%20работающие%20на%20движке%20Blink>.
9. Bootstrap (фреймворк)-Википедия. – URL- [https://ru.wikipedia.org/wiki/Bootstrap_\(фреймворк\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Bootstrap_(фреймворк)).
10. PHP: что это за язык программирования и почему он так популярен. – URL: https://skillbox.ru/media/code/php_ot_istokov_do_sovremennosti.
11. Open Server Panel. – URL: <https://ospanel.io>.

Сведение об авторах

Олег Андреевич Игнатьев, студент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», направления «Информатика и вычислительная техника», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), oign142@yandex.ru

Татьяна Валерьевна Кривоногова, старший преподаватель СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», (Росси, г. Сарапул), krivonogatv@mail.ru

Развитие инвестиционной составляющей экономики Республики Беларусь

Т. Г. Нечаева, Т. А. Бородич, О. Г. Гудыно

В современной экономике социально-экономическое развитие территорий зависит от инвестиционной активности. Для выявления тенденций развития экономики Республики Беларусь с позиции инвестиционной составляющей проанализируем соответствующие статистические данные за период с 2021 по 2022 года.

Ключевые слова: инвестиции, инвестиционный климат, развитие экономики, преференциальные режимы.

Development of the investment component of the economy of the Republic of Belarus

T. G. Nechaeva, T. A. Borodich, O. G. Gudyno

In the modern economy, the socio-economic development of territories depends on investment activity. To identify trends in the development of the economy of the Republic of Belarus from the perspective of the investment component, we will analyze the relevant statistical data for the period from 2021 to 2022.

Keywords: investments, investment climate, economic development, preferential regimes.

В Республике Беларусь инвестиции носят как государственный, так и частный характер, о чем свидетельствует финансирование на уровне развития государственных программ и рост частных предприятий, импортозамещение, развитие СЭЗ, применение новых технологий и выпуск новых видов продукции.

Финансирование Государственной инвестиционной программы в республиканском бюджете 2021 года [1] и 2022 года [2] представлено в табл. 1.

Таблица 1. Финансирование Государственной инвестиционной программы в республиканском бюджете в 2021 и 2022 году

Финансирование	2021 год	2022 год
Всего, млн руб.	664,17	694,9
в том числе фонд национального развития, млн руб.	105,2	105,2
целевые расходы, млн руб.	159,47	163,2

Бюджет направлен:

1) на строительство социально значимых объектов, общежитий для студентов государственных учреждений высшего образования, капитальных строений (зданий, сооружений) государственного специализированного лесохозяйствен-

ного учреждения «Боровлянский спецлесхоз», станций обезжелезивания воды, инфраструктуры для БелАЭС, республиканских автомобильных дорог;

2) финансирование важнейших инвестиционных проектов. К важнейшим инвестиционным проектам относится строительство индустриального парка, авиаремонтного завода, инженерной и транспортной инфраструктуры СЭЗ;

3) мелиорацию.

Как видно из выше приведенных данных, инвестиции по государственным программам решают стратегические цели общества.

Иностранные инвестиции в экономическую деятельность Республики Беларусь за период 2021–2022 года представлены в табл. 2 [3].

Таблица 2. Иностранные инвестиции в экономическую деятельность Республики Беларусь

Инвестиции	2021 год	2022 год	Темп прироста, %
Прямые	6 557 965,6	5 959 297,6	–9,13
Портфельные	4 349,0	1 270,1	–70,8
Прочие	2 136 337,9	1 018 044,9	–52,35
Всего	8 698 652,5	6 978 612,6	–19,77

За 2 года произошло сокращение иностранных инвестиций в экономику Республики Беларусь, что указывает на отрицательную тенденцию развития мирового рынка с учетом экономико-политической нестабильности.

Национальное агентство инвестиций и приватизации Республики Беларусь выделяет следующие преимущества при вложении инвестиций в страну [4]:

- 1) стратегически выгодное местоположение;
- 2) квалифицированные трудовые ресурсы;
- 3) прямой доступ к рынку 5 стран ЕАЭС;
- 4) достойное качество жизни;
- 5) благоприятный налоговый климат;
- 6) развитая логистическая инфраструктура.

В Беларуси действует ряд преференциальных режимов, предоставляющих значительные налоговые и иные льготы для иностранных компаний. Места, где действуют преференциальные режимы, и их характеристики представлены в табл. 3.

Республика Беларусь имеет развитую логистическую инфраструктуру. Здесь широкая сеть автомобильных, железнодорожных и воздушных путей. Беларусь пересекают 2 трансъевропейских транспортных коридора: «Север-Юг» и «Восток-Запад». Пролегающие магистрали – это важнейший элемент европейской транспортной системы.

Изменение объема инвестиций в основной капитал в 2021 и 2022 году представлено в табл. 4 [3].

Исходя из данных табл. 4, в 2022 году инвестиции в основной капитал по республике уменьшились. Возросли инвестиции в основной капитал в Брестской области, а значительно убыли – в Витебской области. В Брестской области на 52,44 % увеличились инвестиции в иностранную собственность. На 3,34 %

увеличились инвестиции в частную собственность в Гродненской области и на 1,06 % – в Брестской области. Инвестиции в государственную собственность увеличились в Гомельской области (1,92 %), в Минске (1,18 %) и в Могилёвской области (6,46 %). Приведенные данные указывают на отток средств из реального сектора экономики за счет различных факторов, таких как привлекательность бизнеса, стабильность экономического развития, политическая обстановка на мировой арене, партнерство и т. д.

Таблица 3. Преференциальные режимы

Свободные экономические зоны (СЭЗ)	Налог на прибыль, земельный налог, налог на недвижимость, НДС, ввозные таможенные пошлины равны 0%
Индустриальный парк «Великий камень»	НДС и оффшорный сбор равны 0%
Парк высоких технологий (ПВТ)	Налог на прибыль, НДС и оффшорный сбор равны 0%
Малые и средние города, сельская местность	Налог на прибыль, налог на недвижимость, НДС, ввозные таможенные пошлины равны 0%
Юго-восточный регион Могилёвской области	Подходный налог равен 10% в течении 7 лет со дня начала деятельности
ОЭЗ «Бремино-Орша»	Налог на прибыль, налог на недвижимость, подходный налог, налог на дивиденды равны 0%
Инвестиционный договор	НДС, таможенные пошлины и НДС при ввозе оборудования равны 0%

Таблица 4. Темп прироста инвестиций в основной капитал

Территория Республики Беларусь	Темп прироста, %			
	всего по формам собственности	государственная собственность	частная собственность	иностранная собственность
Республика Беларусь	–8,31	–2,6	–10,56	–22,29
Брестская область	1,16	–2	1,06	52,44
Витебская область	–16,73	–9,67	–22,75	–25,78
Гомельская область	–8,54	1,92	–17,85	–11,18
Гродненская область	–3,88	–7,76	3,34	–11,56
г. Минск	–9,68	1,18	–22,56	–4,74
Минская область	–12,29	–6,02	–7,88	–54,01
Могилевская область	–2,12	6,46	–3,35	–33,52

Тенденция и динамика развития инвестирования средств, например, с одной стороны, указывает на регресс в развитии экономики, а с другой – на рост частных инвестиций в приграничных областях, на снижение конкуренции со стороны зарубежных фирм и уход их с белорусского рынка, что освободило нишу на рынке и позволило осуществить импортозамещение. Другими словами, отток иностранного капитала заставляет экономических субъектов региона решать проблемы и изыскивать резервы для поддержки экономики страны.

Отрицательная динамика по инвестиционной составляющей в экономике страны с позиций движения капитала в практике экономического развития оценивается отрицательно, но динамика изменения других показателей по совокупности свидетельствует об оживлении экономики, поскольку иностранный капитал и открытость рынка вытесняют частный малый бизнес с внутреннего рынка из-за его неконкурентоспособности по фактору масштаба деятельности. Оживление малого бизнеса позволяет поступенчато достичь приоритетов развития в долгосрочном периоде.

Список использованных источников и литературы

1. Бюджет Республики Беларусь для граждан / Министерство финансов Республики Беларусь. – Минск, 2021. – URL: <https://www.minfin.gov.by/upload/bp/budget/budget2021.pdf>.
2. Бюджет Республики Беларусь для граждан / Министерство финансов Республики Беларусь. – Минск, 2022. – URL: <https://www.minfin.gov.by/upload/bp/budget/budget2022.pdf>.
3. Национальный статистический комитет Республики Беларусь / Республиканский орган государственного управления в области государственной статистики. – Минск, 2023. – URL: <https://www.belstat.gov.by>.
4. Национальное агентство инвестиций и приватизации Республики Беларусь / Министерство экономики Республики Беларусь. – Минск, 2021. – URL: <https://investinbelarus.by/why-belarus>.

Сведения об авторах

Татьяна Георгиевна Нечаева, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Логистика и организация производства», Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилев), tanjabor11@gmail.com

Татьяна Анатольевна Бородич, старший преподаватель кафедры «Логистика и организация производства», Белорусско-Российский университет (г. Могилев, Республика Беларусь), tanjabor11@gmail.com

Оксана Геннадьевна Гудыно, студент, Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилев), ok1oksaganagud@gmail.com

Способ комплексирования данных от различных навигационных систем

Н. Н. Чернышев, Т. В. Ниженец, Д. Р. Шевцов

Рассматриваются вопросы реализации способа комплексирования данных от различных навигационных систем, в том числе от инерциального измерительного модуля и глобальной спутниковой навигационной системы при решении задачи определения местоположения мобильного объекта в различных условиях.

Ключевые слова: комплексирование данных, навигационные системы, определение местоположения, мобильный объект.

A method for integrating data from various navigation systems

N. N. Chernyshev, T. V. Nizhenets, D.R. Shevtsov

The issues of implementing a method for integrating data from various navigation systems, including from an inertial measurement module and a global satellite navigation system when solving the problem of determining the location of a mobile object in various conditions are considered.

Keywords: data integration, navigation systems, positioning, mobile object.

Особенность определения местоположения мобильных объектов в различных условиях их движения (открытое пространство, складские помещения, туннели метро и пр.) заключается в том, что решение навигационной задачи выполняется на основании объединения информации, поступающей с доступных пространственно-распределенных приемо-передающих станций различных навигационных систем. Так, в условиях движения в ограниченном пространстве зачастую отсутствуют данные от глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), и если нет локальной системы позиционирования, то навигация может осуществляться на основе обработки и комплексирования данных, поступающих с акселерометра, гироскопа и магнитометра. Поэтому актуальным является развитие гибридных систем определения местоположения, в которых местоположение объекта определяется на основе комплексирования и обработки данных, получаемых из различных источников [1, 2].

Предложенный способ **комплексирования данных от инерциальной и спутниковой навигационных систем можно представить в виде последовательных этапов.** На первом этапе происходит чтение данных с акселерометра и гироскопа для определения углов ориентации объекта с помощью численного интегрирования показаний трехосевого гироскопа. Для устранения накапливаемой ошибки интегрирования, появляющейся из-за неточности измерений

угловой скорости гироскопом, используется фильтр Калмана. Данный фильтр использует вычисленные углы ориентации мобильного объекта, используя тригонометрическую функцию арксинуса по отношению к показаниям акселерометра, и угловую скорость, полученную от гироскопа, для определения актуальных углов ориентации без накапливаемой ошибки при ускорении мобильного объекта (рис. 1).



Рис. 1. Первый этап способа комплексирования данных

Таким образом, результатом работы первого этапа является вектор, содержащий углы ориентации мобильного объекта, в котором ошибка интегрирования по углам крена и тангажа не накапливается со временем, угол рысканья вычисляется с ошибкой, увеличивающейся пропорционально времени работы алгоритма.

На втором этапе происходит чтение данных с магнитометра с выполнением нормализации полученного трехмерного вектора магнитного поля в вектор с длиной, равной 1. Так как вектор магнитного поля Земли не параллелен поверхности в широтах, отличных от экваториальных, в Z-составляющей вектора магнитного поля появляется ненулевое значение. Таким образом, при изменении ориентации мобильного объекта, эта составляющая будет накладываться на X- и Y-составляющие вектора магнитного поля, что, в свою очередь, внесет ошибки вычисления устойчивого угла рысканья. Чтобы избежать этой проблемы, необходимо производить поворот вектора магнитного поля, полученного от магнитометра, на углы крена и тангажа. Для решения этой задачи применяется математический аппарат гиперкомплексной переменной в виде кватерниона (рис. 2).

Во время третьего этапа происходит комплексирование данных с гироскопа (угловая скорость рысканья) и углу ориентирования, полученного с помощью магнитометра для нейтрализации накапливаемой ошибки интегрирования по углу рысканья (рис. 3).



Рис. 2. Второй этап способа комплексирования данных

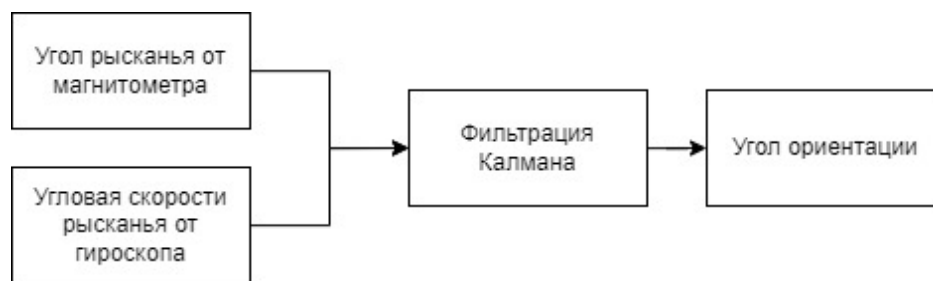


Рис. 3. Третий этап способа комплексирования данных

В рамках четвертого этапа решается задача поворота вектора ускорения на углы ориентации мобильного объекта из жестко связанной с мобильным объектом системы координат в глобальную систему координат, заданную на старте выполнения алгоритма. Далее производится удаление ускорения свободного падения из Z-составляющей и последующая фильтрация вектора ускорения фильтром низких частот (рис. 4).



Рис. 4. Четвертый этап способа комплексирования данных

Таким образом, результатом работы рассмотренных этапов является вектор, содержащий углы ориентации мобильного объекта, в котором ошибка интегрирования не накапливается со временем ни по одному из углов.

В рамках пятого этапа решается задача определения координаты по высоте с помощью барометра и данных, полученных от акселерометра. Ускорение по оси Z и вычисленная высота по барометру передается в фильтр Калмана (рис. 5).

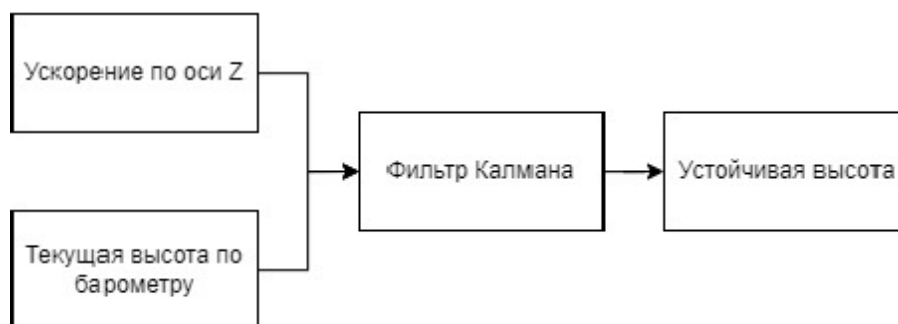


Рис. 5. Пятый этап способа комплексирования данных

В рамках шестого этапа решается задача определения координат положения мобильного объекта. Для этого используется комплексирование данных от гироскопа, акселерометра, барометра и ГНСС. Если доступны данные от ГНСС, то они выступают в роли опорных. В промежутках между получениями данных от ГНСС, комплексироваются предыдущие измерения с показаниями акселерометра (рис. 6).

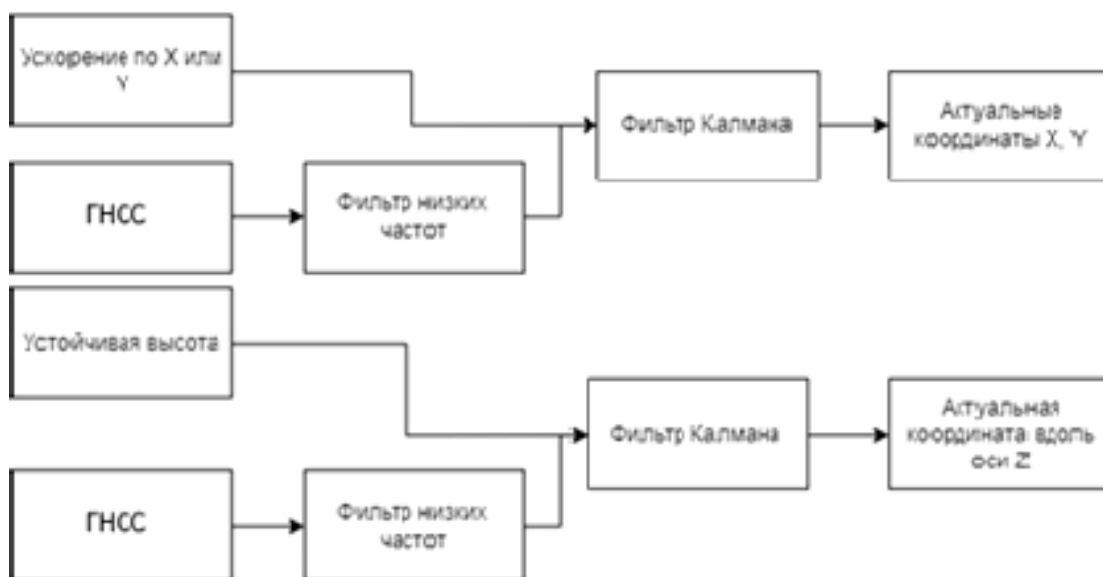


Рис. 6. Шестой этап способа комплексирования данных

Таким образом, результатом работы предложенного способа комплексирования является вектор, содержащий углы ориентации и координаты мобильного объекта, в котором ошибка по координатам X и Y в промежутке между получением данных от ГНСС накапливается несущественно.

Список использованных источников и литературы

1. *Ниженец, Т. В.* Особенности проектирования и применения системы определения местоположения мобильных объектов в условиях ограниченного пространства / Т. В. Ниженец, А. Г. Лютов, Н. Н. Чернышев // *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов Национальной научно-практической конференции* / под ред. С. У. Увайсова. – Москва : МИРЭА - РТУ, 2022. – С. 102–104.
2. *Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии* / под ред. Б. С. Алёшина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 424 с.

Сведения об авторах

Николай Николаевич Чернышев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем, РТУ-МИРЭА (Россия, г. Москва). chernyshev@mirea.ru

Татьяна Владимировна Ниженец, аспирант, старший преподаватель кафедры автоматических систем, РТУ-МИРЭА (Россия, г. Москва). nizhenec@mirea.ru

Денис Романович Шевцов, магистр, РТУ-МИРЭА (Россия, г. Москва)

СЕКЦИЯ № 6 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.311

Феррозондовый измерительный преобразователь в системах контроля формы тока

С. П. Малахов

В статье затронута проблема контроля одного из показателей качества электроэнергии: уровня высших гармоник тока в системах электроснабжения. Рассмотрены причины генерации токов высших гармоник, проанализированы существующие способы контроля формы тока, предложен принцип измерения на базе феррозондовых датчиков.

Ключевые слова: феррозондовый датчик, показатели качества электроэнергии, высшие гармоники, нестационарная нагрузка, переходные процессы.

Fluxgate measuring converter in current form monitoring systems

S. P. Malakhov

The article touches upon the problem of monitoring one of the indicators of power quality: the level of higher current harmonics in power supply systems. The reasons for the generation of higher harmonic currents are considered, existing methods for monitoring the current shape are analyzed, and a measurement principle based on fluxgate sensors is proposed.

Keywords: fluxgate sensor, power quality indicators, higher harmonics, unsteady load, transients.

Любой источник вторичного электропитания (ИВЭП) является связующим звеном между функциональными элементами электроустановок (ЭУ) и питающей их сетью переменного тока частотой 50 Гц. Их основные схемные и системные решения базируются на применении:

- широтно-импульсной модуляции (ШИМ);
- схем управляемых выпрямителей.

Несмотря на очевидные преимущества подобных технических решений: повышение коэффициента полезного действия, увеличение ресурсов электромеханического оборудования, улучшение массогабаритных характеристик ИВЭП, характерный им нелинейный характер потребления тока приводит к генерации высших гармоник, кратных частоте питающей сети 50 Гц (рис. 1). Это приводит к таким нежелательным последствиям, как:

- искажение формы питающего напряжения сети, ввиду ненулевого внутреннего сопротивления его источника (в системах электроснабжения,

в большинстве случаев, это активное сопротивление вторичной обмотки питающего линию трансформатора);

- ложные срабатывания устройств автоматики и релейной защиты;
- дополнительная токовая нагрузка, создаваемая высшими гармониками;
- перегрев нулевого рабочего проводника третьей гармонической составляющей с частотой 150 Гц.



Рис. 1. Форма напряжения, поданного на нелинейную нагрузку, и потребляемого ей тока

Помимо этого, генерация токов высших гармоник происходит также:

- при периодически возникающих переходных процессах в системах электроснабжения, например при оперативных переключениях в ЭУ (рис. 2);
- непостоянным уровнем потребляемого нагрузкой тока (нестационарной нагрузкой). Самые распространенные ЭУ, для которых это характерно: электродвигатели металлообрабатывающих станков, сварочные аппараты, тяговые преобразовательные подстанции.



Рис. 2. Искажения сетевого напряжения при переходных процессах

Таким образом, контроль уровня токов высших гармоник в электрических сетях, особенно при переходных процессах и при нестационарной нагрузке, является важной научно-технической задачей.

Допустимые уровни высших гармоник токов в системах электроснабжения (СЭС) общего назначения регламентируются ГОСТ 32144–2013 [1]:

– значение коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка:

$$K_{I(n)} = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100\%,$$

где I_1 – уровень основной составляющей тока с частотой сети 50 Гц; I_n – уровень основной составляющей тока с частотой кратной 50 Гц;

– значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжений:

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{I_{H,h}}{I_{H,1}} \right)^2},$$

где $I_{H,n}$ – среднеквадратичное значение h -й гармонической составляющей тока; $I_{H,1}$ – среднеквадратичное значение тока основной частоты промышленной сети 50 Гц.

Сам процесс контроля вышеуказанных показателей регламентируется ГОСТ 30804.4.7–2013 [2] и базируется на следующих физических принципах:

- трансформации тока;
- падения напряжения на токовых шунтах, включаемых последовательно с контролируемым участком цепи;
- эффекте Фарадея;
- эффекте Холла.

Но, несмотря на то, что на сегодняшний день рынок контрольно-измерительного оборудования заполнен множеством готовых устройств и систем мониторинга качества электрической энергии, ни в одном из них не предусмотрен контроль уровней токов высших гармоник, генерируемых переходными процессами или нестационарной нагрузкой.

Поэтому решаемая в рамках настоящей статьи задача – разработка общего подхода к контролю формы тока при переходных процессах и нестационарной нагрузке. Для этого, в первую очередь, были рассмотрены существующие технические решения на базе трансформатора тока, шунта, эффекта Фарадея и датчика Холла, и в результате было выявлено, что ни один из рассмотренных принципов для измерения тока при нестационарной нагрузке и при переходных процессах не пригоден, по причинам:

- трансформатору тока характерна низкая чувствительность порядка одной десятой номинального тока [3];
- применение токовых шунтов требует разрыва цепи для своего монтажа и влияет на измеряемую цепь, что в ЭУ до 1000 В допустимо, выше 1000 В – абсолютно неприемлемо;
- применение эффекта Фарадея, успешно внедряемое в настоящее время в магистральных распределительных сетях 330 кВ, 500 кВ и 750 кВ ПАО «МРСК», для распределительных сетей 0,4 кВ, 6 кВ и 10 кВ не пригодно ввиду высокой сложности и чрезмерной избыточности [4];
- датчики Холла неудовлетворительно работают при переходных процессах, что не соответствует поставленной задаче [5].

Учитывая, что рассмотренные физические принципы контроля формы тока (кроме шунтов, исключенных из рассмотрения) базируются на измерении магнитного поля, создаваемого контролируемым током, для дальнейшего поиска принципа измерения формы тока при нестационарной нагрузке и переходных процессах, были рассмотрены существующие на текущий момент способы измерения параметров магнитного поля [6]:

- СКВИД-магнитометры;
- квантовые магнитометры с оптической накачкой;
- флюксометры;
- магниторезистивные датчики;
- феррозонды.

Наиболее перспективными из них для применения в информационно-измерительных системах контроля высших гармоник тока являются феррозонды (ФЗ). Такой вывод сделан на следующих основаниях:

- высокая чувствительность к слабым магнитным полям порядка 0,0001–0,01 мкТл;
- возможность изменения чувствительности, путем перестройки частоты возбуждения феррозонда, без вмешательства в его конструкцию;
- низкая цена относительно других преобразователей магнитного поля;
- инвариантность к классу напряжения электроустановок, то есть возможность применения в ЭУ как до, так и выше 1000 В без конструктивных изменений;
- полоса рабочих частот перекрывает необходимый для измерения первых 40 высших гармоник тока диапазон.

Структурная схема информационно-измерительной системы, реализующей предлагаемый принцип, приведена на рис. 3.

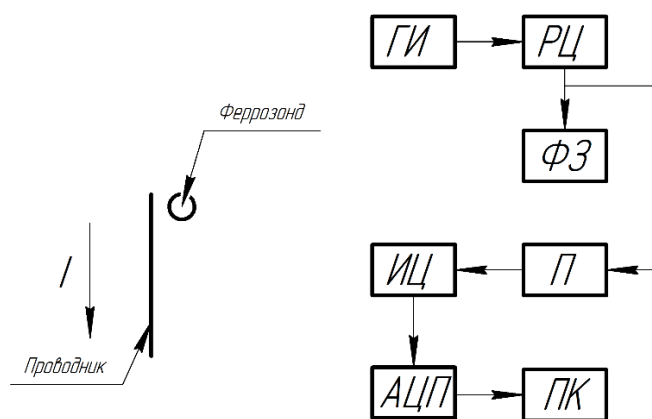


Рис. 3. Схема установки феррозонда (слева) и структурная схема системы измерения высших гармоник (справа)

Измерение мгновенного значения тока происходит следующим образом. Генератор прямоугольных импульсов ГИ через разделительную цепь РЦ подключается к обмотке возбуждения феррозонда ФЗ. Эта же обмотка является сигнальной. РЦ убирает постоянную составляющую из пря-

моугольных импульсов, генерируемых ГИ, формируя тем самым меандр. При отсутствии внешнего магнитного поля сигнал, снимаемый с феррозонда, будет симметричен относительно оси ординат, поэтому результатом подачи этого сигнала на интегрирующую цепь ИЦ через повторитель П будет ноль.

Появление внешнего магнитного поля, создаваемого контролируемым током, будет нарушать симметрию магнитного поля, создаваемого меандром, в сердечнике феррозонда, «загоняя» его на нелинейный участок петли гистерезиса, в результате чего напряжение на выходе феррозонда также будет несимметричным относительно оси ординат, вследствие чего на выходе ИЦ будет возникать напряжение, пропорциональное мгновенному значению напряженности измеряемого внешнего магнитного поля и, как следствие, мгновенному значению контролируемого тока. Далее это напряжение оцифровывается аналого-цифровым преобразователем АЦП и подается на компьютер ПК для дальнейшей обработки.

Ввиду того, что основная вычислительная нагрузка ложится на блоки аналоговой обработки П и ИЦ, обеспечена возможность контроля формы тока при переходных процессах и нестационарной нагрузке, что свидетельствует об успешном решении поставленной задачи.

Список использованных источников и литературы

1. ГОСТ 32144–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: введен 2014-06-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2. ГОСТ 30804.4.7–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: введен 2014-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 40 с.

3. *Гильманов, Р. Р.* Способы повышения чувствительности защит линий при ненормальных режимах работы на ответвлениях с маломощными трансформаторами // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития: сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 07 июня 2023 года. – Чебоксары : Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2023. – С. 114–118. – DOI 10.21661/r-559983.

4. Патент № 2786621 С1 Российская Федерация, МПК G01R 15/24. измеритель тока оптический двухканальный для высоковольтных сетей: № 2022103455: заявл. 10.02.2022: опубл. 22.12.2022 / А. И. Пеньковский, В. И. Верещагин, Р. Н. Абайдуллин; заявитель Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро «ФОТОН».

5. *Попов, Д. С.* Экспериментальное исследование датчиков тока класса напряжения 0,38 кВ в трех режимах работы электрической сети / Д. С. Попов, Д. М. Олин // Элек-

тротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2023. – Т. 70, № 1(50). – С. 60–65. – DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-1-60-65.

6. *Коломейцев, А.* RTD-феррозондовый датчик для измерения сверхслабых магнитных полей: специальность 22.40.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коломейцев Андрей, 2022. – 195 с.

Сведения об авторах

Сергей Павлович Малахов, старший преподаватель кафедры «Конструирования и производства радиоаппаратуры» Сарапульского Политехнического института (филиала) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), concordski1977@gmail.com

Разработка современных шариковых расходомеров жидкости в Уфимском университете науки и технологий

Р. Р. Садыков, В. Х. Ясовеев, Ш. С. Сафинов

В статье рассматриваются исследования и новые разработки в области расходомерии жидкости. Представляются три новых типа шариковых расходомера – для электропроводных, прозрачных и частично прозрачных, а также любых видов жидкости, основным преимуществом которых являются высокие метрологические показатели при невысокой себестоимости устройств. Рассматривается совместная работа университета и промышленного предприятия с целью утверждения типа средства измерения для дальнейшего внедрения в серийное производство и конкуренции на рынке расходомерии в рамках политики импортозамещения.

Ключевые слова: тахометрический расходомер; шариковый расходомер; шариковый расходомер жидкости; струенаправляющий аппарат; гетеродинный резонанс.

Development of modern liquid ball flow meters at the Ufa University of Science and Technology

R. R. Sadykov, V. H. Yasoveev, S. S. Safinov

The article discusses research and new developments in the field of fluid flow measurement. Three new types of ball flowmeters are presented: for electrically conductive, transparent, and partially transparent, as well as for any type of liquid, the main advantage of which is high metrological indicators at a low cost of devices. The article discusses the joint work of the university and the industrial enterprise in order to approve the type of measuring instrument for further introduction into serial production and competition in the flow measurement market within the framework of the import substitution policy.

Keywords: tachometric flowmeter; ball flow meter; liquid ball flow meter; jet guiding apparatus; heterodyne resonance.

Современную промышленность и народное хозяйство сложно представить без средств измерения и контроля расхода жидкостей. Данная сфера является давно устоявшейся, со своими промышленными гигантами, которые по сути держат на своих плечах всю мировую расходомерию. В течение последних двадцатитридцати лет зарубежные компании успешно вытесняют отечественных производителей с внутреннего российского рынка расходомерии. В этой связи очень остро встает актуальность задачи импортозамещения и развития отечественного производства расходомеров нового типа.

За данную задачу взялись Уфимский университет науки и технологий и уфимское промышленное предприятие ДИ «Роботикс Автоматизация».

Совместная работа началась с анализа вопроса о том, на какой принцип измерения расхода жидкости стоит обратить свое внимание. Требовался такой тип конструкции, который не только соответствовал бы известным приборам по своим метрологическим характеристикам и стоимости, но и выходил бы вперед по этим параметрам. Результатом анализа удалось получить ответ – в качестве такого расходомера можно использовать шариковый расходомер [1]!

Принцип работы и особенности конструкции шарикового первичного преобразователя расхода жидкости в частотно-импульсный выходной сигнал, использующего ферромагнитный шарик и магнитоиндукционный датчик с усилителем, были известны с середины прошлого столетия. До настоящего времени подобные средства измерения не получили широкого распространения на рынке приборов учета жидкости из-за значительных недостатков в своих метрологических характеристиках, которые существенно уступают характеристикам приборов других известных типов [2, 3].

В университете в результате совместных исследований и разработки по созданию шариковых преобразователей расхода жидкости были разработаны три вида новых шариковых расходомеров:

1) расходомеры любых электропроводных, но не пожароопасных жидкостей (воды, водных растворов кислот, щелочей, солей, биохимических соединений) в химической, пищевой и фармакологической промышленности, в теплоэнергетике, ЖКХ и социальной сфере в составе автоматических систем учета расхода воды и счетчиков количества теплоты;

2) электронно-оптические расходомеры любых прозрачных или частично прозрачных жидкостей независимо от их электропроводности. Особенно перспективно их использование для расходомерии химически очень агрессивных, пожаро-взрывоопасных и ядовитых жидкостей во всех областях промышленности;

3) радио-шариковые расходомеры любых жидкостей – электропроводных и неэлектропроводных, прозрачных и непрозрачных, в том числе химически очень агрессивных, пожаро- и взрывоопасных, ядовитых, во всех областях промышленности, включая нефтедобывающую и нефтеперерабатывающую [4].

Задачей данного проекта является доказательство по результатам государственных испытаний с целью утверждения типа средств измерений в Госстандарте РФ, что шариковые преобразователи расхода жидкости и счетчики количества жидкости на их основе могут успешно конкурировать на рынке приборов учета жидкости с известными типами расходомеров и счетчиками жидкости [5, 6].

Следствием успешного решения поставленной задачи является:

1. Насыщение рынка расходомерии жидкости России, СНГ и других государств приборами учета расхода количества жидкости, основанных на применении шариковых преобразователей расхода жидкости трех основных типов, различных типоразмеров в самых разнообразных отраслях промышлен-

ности (химической, нефтедобывающей и нефтетранспортной, нефте- и газоперерабатывающей, пищевой, фармацевтической), в тепло- и электроэнергетике, включая атомную, в качестве расходомеров в авиационных, ракетных и поршневых двигателях, а также в жилищно-коммунальном хозяйстве (прежде всего, в качестве расходомеров теплоносителя в составе счетчиков количества теплоты).

2. Вытеснение из рынка расходомерии России приборов учета жидкости зарубежных производителей известных типов (турбинных, электромагнитных, ультразвуковых, вихревых, кориолисовых и некоторых других), принимая во внимание тенденцию импортозамещения в стратегии развития отечественной экономики.

3. Получение прибыли и улучшение социальных показателей в регионе за счет серийного производства шариковых преобразователей расхода жидкости на российском предприятии и реализации продукции.

Совместно с университетом разработаны и запатентованы три варианта конструкций шариковых преобразователей расхода жидкости, на основе которых могут быть реализованы счетчики количества жидкостей.

Основное отличие трех вариантов технической реализации шариковых преобразователей расхода жидкости заключается в способе преобразования скорости вращения диэлектрического шарика в частотно-импульсный выходной сигнал, причем не зависящий по форме и амплитуде от величины расхода жидкости [5, 6].

Шариковый преобразователь расхода жидкости по первому варианту конструкции, представленной на рис. 1, в которых используется способ преобразования скорости вращения шарика в импульсный выходной сигнал, при котором шарик 4 при совершении вращения по кольцевому каналу 3 изменяет сопротивление жидкости между электродами 5 и 6 (разработаны варианты с двумя, тремя и четырьмя электродами), предназначены для расходомерии любых электропроводящих жидкостей, например воды, растворов солей, кислот, щелочей, могут использоваться в химической, фармацевтической, пищевой промышленности, в ЖКХ для учета потребления холодной и горячей воды. Особенно важно подчеркнуть, что их использование в составе счетчиков тепла для водяных систем теплоснабжения является технически и экономически обоснованным решением [5, 6].

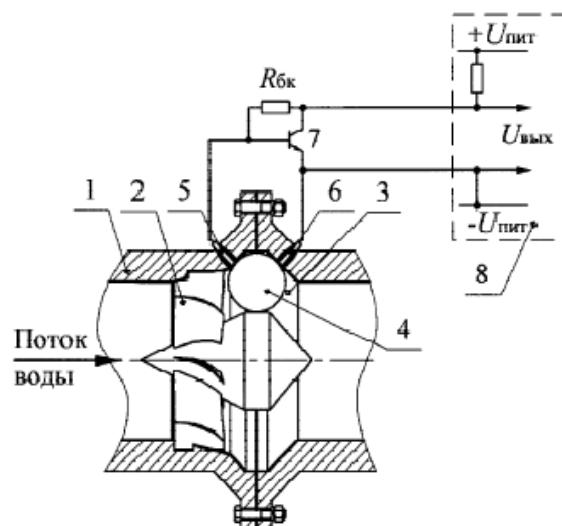


Рис. 1. Шариковый преобразователь расхода электропроводной жидкости

Шариковый преобразователь расхода жидкости по второму варианту конструкции, представленной на рис. 2, в котором используется электронно-оптический способ формирования импульсного выходного сигнала, при котором шарик 12 при совершении вращения по кольцевому каналу пересекает или отражает (разработаны два способа для данного варианта) луч оптической пары 7, предназначенный для расходомерии как электропроводных, так и неэлектропроводных жидкостей, но хотя бы слабопрозрачных. Особенно технически и экономически целесообразно их использование в расходомерии пожаро-взрывоопасных, ядовитых и химически активных жидкостей в химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

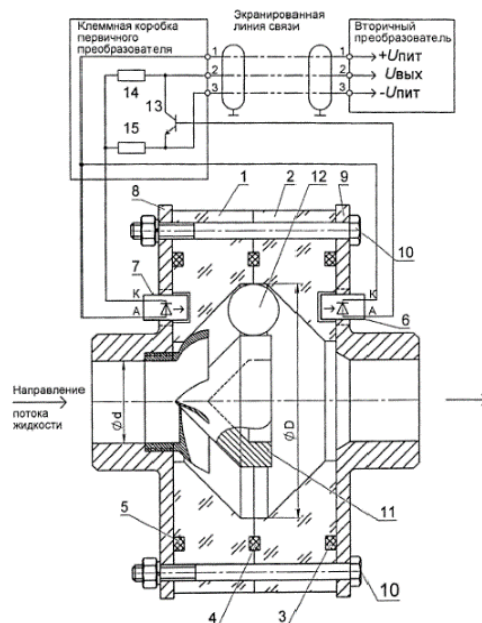


Рис. 2. Электронно-оптический шариковый преобразователь расхода жидкости

В шариковом преобразователе расхода жидкости по третьему варианту конструкции, представленной на рис. 3, используется радиотехнический способ преобразования скорости вращения шарика в импульсный выходной сигнал, при котором шарик 7, содержащий внутри себя колебательный LC -контур, при совершении вращения вызывает явление гетеродинного резонанса с приемной катушкой 3 на корпусе расходомера, предназначены для расходомерии любых жидкостей – электропроводных и неэлектропроводных, прозрачных и непрозрачных, химически инертных и очень активных. Этот конструктивный вариант шарикового преобразователя расхода жидкости идеально подходит для измерения расхода и количества нефти, особенно темной и с высоким содержанием серы.

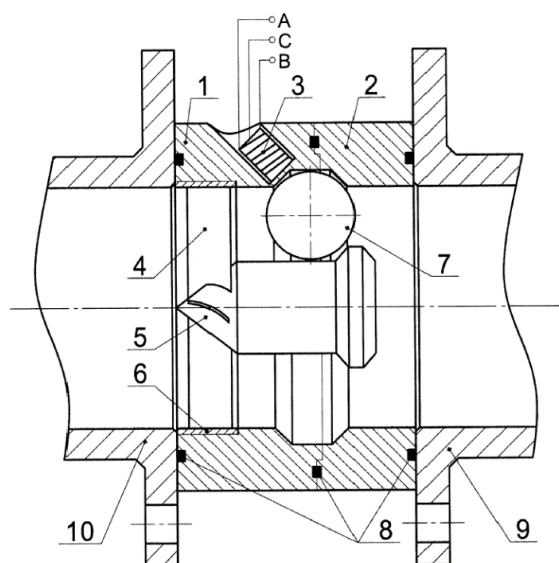


Рис. 3. Радио-шариковый преобразователь расхода жидкости

От известных шариковых преобразователей расхода жидкости и расходомеров других типов все три варианта конструкции отличаются очень простой конструкцией и ремонтпригодностью, большим ресурсом в эксплуатации при весьма высоких метрологических характеристиках. Например, по сравнению с известными турбинными расходомерами шариковые преобразователи расхода жидкости по обеим вариантам конструкции отличаются меньшей погрешностью преобразования при значительно более широком динамическом рабочем диапазоне расходов жидкости (в шесть-восемь раз). Испытания пяти опытных образцов ШПРЖ (Ду-12, Ду-15, Ду-25, Ду-30 и Ду-40) в ФБУ ЦСМ РБ в полной мере подтверждают ожидаемые метрологические характеристики данных шариковых преобразователей расхода жидкости [1].

Все три вышеперечисленных варианта шариковых преобразователя расхода жидкости используют одну и ту же конструкцию гидромеханической части расходомера, разработка которой выполнена и получены аналитические выражения для ее расчета в зависимости от предполагаемого типоразмера (Ду-12, Ду-20, Ду-25, Ду-30, Ду-40, ..., Ду-400) [1].

Выполнены разработка, анализ и лабораторные исследования электронных частей всех двух вариантов шариковых преобразователей расхода жидкости.

Выполнены пять опытных образцов шариковых преобразователей расхода жидкости (Ду-12, Ду-15, Ду-25, Ду-30 и Ду-40) для расходомерии электропроводных жидкостей, которые в последние два года интенсивно подвергались натурным испытаниям ФБУ ЦСМ РБ на аттестованном оборудовании. По результатам испытаний опытных образцов расходомеров можно утверждать, что шариковые преобразователи расхода жидкости ни по каким метрологическим и эксплуатационным параметрам не уступают всем другим известным типам приборов учета жидкости, причем при значительно меньшей предполагаемой себестоимости (в 2–3 раза в зависимости от типа шарикового преобразователя расхода жидкости) [1].

Необходимо отметить, что в патентах реализуется новый способ преобразования, но не особенности технической реализации прибора для достижения поставленной цели, поэтому серийно выпускаемые шариковые преобразователи расхода жидкости могут иметь существенные конструктивные отличия, как это имеет место в изготовленных и испытанных в ФБУ ЦСМ РБ шариковых преобразователей расхода жидкостей четырех типоразмеров.

В настоящее время рассматривается вопрос о подготовке к серийному производству расходомеров, включая государственные испытания шариковых преобразователей расхода жидкости в Госстандарте РФ с целью утверждения типа средства измерения и включения шариковых преобразователей расхода жидкости в Государственный реестр средств измерений.

Список использованных источников и литературы

1. Садыков, Р. Р. Уфимскому авиационному – 90! / Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов // Изобретатель и рационализатор. – 2021. – № 5-6. – С. 58–59.
2. Реут, В. И. Новые решения в конструкции шариковых расходомеров / В. И. Реут, Ю. М. Федорова // Приборы. – 2016. – № 7 (193). – С. 37–40.
3. Кремлёвский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ. – Книга 1. – Л. : Политехника, 2002. – С. 331–335.
4. Ясовеев, В. Х. Актуальность применения шариковых расходомеров в нефтегазовой отрасли / В. Х. Ясовеев, Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. Молодежный научный форум : сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции (Ижевск, 25–26 мая 2023 г.). – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. – С. 282–287.
5. Патент № 2762946 С1 Российская Федерация, МПК G01F 1/05. Шариковый расходомер электропроводной жидкости: № 2020142615: заявл. 22.12.2020: опубл. 24.12.2021 / Д. Н. Пущенко, Р. Р. Садыков, Ш. С. Сафинов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный авиационный технический университет", Общество с ограниченной ответственностью «ДИ РОБОТИКС АВТОМАТИЗАЦИЯ».

6. Патент № 2777291 С1 Российская Федерация, МПК G01F 1/05. Шариковый расходомер электропроводной жидкости: № 2022105314: заявл. 28.02.2022: опубл. 02.08.2022 / Р. Р. Садыков, Д. Н. Пущенко, Ш. С. Сафинов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Сведения об авторах

Садыков Руслан Рашитович, технический директор, ООО «ДИ Роботикс Автоматизация», аспирант, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (Россия, г.Уфа), srr-91@mail.ru

Ясовеев Васих Хаматович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (Россия, г.Уфа), yasov@mail.ru

Сафинов Шамиль Саидович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (Россия, г.Уфа), safinov@mail.ru

СЕКЦИЯ № 7 ЭЛЕКТРОНИКА И СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

УДК 681.5

Анализ требований к системе автоматического управления газовоздушным трактом котла с уравновешенной тягой

А. Г. Лютов, М. Ю. Озеров, М. С. Моторина

Рассматриваются вопросы, связанные с энергосбережением в системах теплоснабжения применительно к построению автоматизированной системы управления газовоздушным трактом котла с уравновешенной тягой, приводятся требования к энергоэффективной системе автоматического управления.

Ключевые слова: газовоздушный тракт котла, автоматическое управление, энергосбережение, уровни управления режимами, требования к энергоэффективности.

Analysis of requirements for the automatic control system by the gas-air path of the boiler with balanced thrust

A. G. Lyutov, M. Y. Ozerov, M. S. Motorina

Issues related to energy saving in heat supply systems are considered in relation to the construction of an automated control system for the gas-air duct of a boiler with balanced draft, and requirements for an energy-efficient automatic control system are given.

Keywords: Gas-air boiler path, automatic control, energy saving, mode control levels, energy efficiency requirements

Введение

Энергосбережение является важным направлением технической политики во всех развитых странах мира наряду с информатизацией и компьютеризацией. Это связано с ограниченностью всех основных энергоресурсов, возрастающими сложностями их добычи, глобальными экономическими и экологическими проблемами. Разработка энергоэффективных систем автоматического управления паровыми котлами – одно из действенных путей решения проблем энергосбережения в системах теплоснабжения.

Принцип работы КсУТ

Характеристики газовоздушного тракта (ГВТ) и его оборудования определяют классификацию паровых котлов, которые по виду используемого топлива делятся на предназначенные для газообразного, жидкого и твердого горючего. По особенностям работы ГВТ различают котлы с естественной тягой, с уравновешенной тягой и с наддувом.

Котлы с уравнивающей тягой (КсУТ) – давление в топке и начале горизонтального газохода (перед поверхностью нагрева) такого котла поддерживается близким к атмосферному давлению посредством согласованной работы дутьевых вентиляторов (ДВ) и дымососов (ДС). Высокая надежность, простота эксплуатации, относительно большой КПД обуславливают широкое применение КсУТ для выработки тепловой энергии. Сопротивление воздушного тракта КсУТ преодолевается с помощью ДВ и находится под давлением. В свою очередь, газовый тракт находится под разрежением за счет работы ДС, что снижает выбросы высокотемпературных газов и золы из газоходов в котельное помещение [1]. На рис. 1 показана схема работы КсУТ.

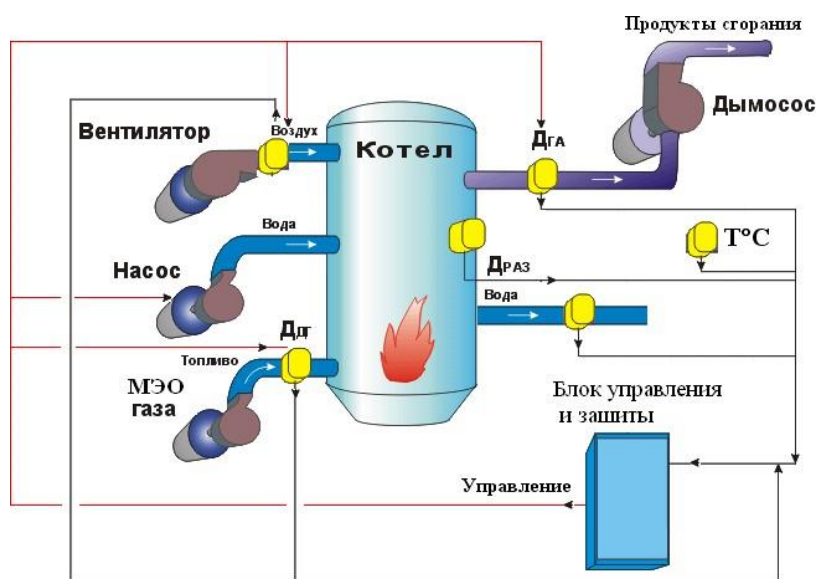


Рис. 1. Схема работы КсУТ

При сжигании топлива элементы, входящие в его состав, соединяются с кислородом воздуха и выделяют тепловую энергию, передаваемую рабочему телу (обычно вода), сжатому до давления выше атмосферного.

Условия топочной камеры определяют протекание процесса горения. Полное сгорание образует продукты, которые далее не вступают в реакцию с кислородом и, соответственно, не могут выделять теплоту.

В случае неполного горения можно выделить два случая: горючие элементы вступают в реакцию с кислородом не в полном объеме; образуются и далее потенциально горючие продукты. Основные причины неполного горения: недостаточная подача кислорода; неравномерное поступление топлива и воздуха во времени, по сечению и отдельным горелкам; недостаточным перемешиванием топливовоздушной смеси и др. [2].

Режим полного сгорания топлива обеспечивает выделение максимального количества теплоты. Для этого необходима подача окислителя (воздуха) в количестве V_d , равном или больше некоторого минимального значения V_0 (теоретически необходимого количества воздуха).

Относительное превышение фактического количества воздуха V_o над теоретически необходимым V_0 характеризуется коэффициентом избытка воздуха:

$$T = \frac{V_o}{V_0}.$$

Общий расход воздуха, необходимый для нормального сжигания топлива, определяют из выражения [2]:

$$V_B = V_0 \cdot \frac{B_p T (t_B + 273)}{273}, \quad (1)$$

где B_p – расчетный расход топлива $\left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$; V_0 – теоретический расход воздуха для сгорания 1 кг топлива; T – коэффициент избытка воздуха в топке; t_B – температура воздуха.

Разные виды топлива имеют различные значения T : пылевидные и газообразные – 1,03...1,16, жидкое – 1,2...1,25, твердое – 1,3...1,65.

При этом для нормальной работы котлоагрегата требуется небольшое постоянное разрежение H_p в верхней части топки [3]:

$$H_p = (20 \div 40) \text{ Па}. \quad (2)$$

Естественной тяги может быть недостаточно, чтобы справиться с воздушными и газовыми сопротивлениями котлоагрегата. В этом случае используют специальные устройства, такие как ДВ и ДС, для создания уравновешенной искусственной тяги.

В процессе работы КсУТ возникает необходимость регулирования тепловой энергии Q_k , вырабатываемой котлом [4].

$$Q_k = Q_{nom} + \sum_{i=1}^n Q_{in}, \quad (3)$$

где Q_k – тепловая энергия, вырабатываемая котлом; Q_{in} – тепловая энергия, потребляемая i -м абонентом тепловой сети; Q_{nom} – потери тепловой энергии в процессе передачи от КсУТ к абонентам тепловой сети.

Основные причины изменения Q_{in} : колебания температуры окружающей среды, что ведет к изменению требуемой температуры теплоносителя в соответствии с температурным графиком и изменению Q_{in} ; колебаниями потребления тепловой энергии абонентами тепловой сети, например, снижение потребления в ночные часы для производственных предприятий.

Таким образом, Q_{in} и Q_{nom} являются факторами, обуславливающими необходимость изменения мощности и расхода топлива.

В то же время из формулы (1) видно, что изменение расхода топлива определяет необходимость регулирования расхода воздуха и является задающим воздействием, определяющим расход вентиляторов КсУТ.

Для обеспечения небольшого постоянного разрежения в верхней части топки КсУТ необходимо, чтобы расход дымососа Q_d соответствовал объему продуктов сгорания перед дымососом [2]:

$$Q_d = V_{d2}, V_{d2} = V_z \cdot \frac{273 + T_{yx}}{273}, V_z = V_{\Pi} \cdot B_p, \quad (4)$$

где V_{d2} – объем продуктов сгорания перед дымососом за единицу времени; V_z – действительное количество продуктов сгорания за единицу времени; V_{Π} – суммарный объем продуктов сгорания 1 кг топлива; T_{yx} – температура уходящих газов.

Изменение расхода топлива B_p в процессе регулирования мощности КсУТ приводит к нарушению условия (4), а для его выполнения необходимо регулировать производительность дымососа Q_d .

Анализ воздействия отмеченных выше возмущающих факторов обуславливает необходимость решения задачи энергоэффективного управления расходом воздуха во входной и выходной части топочной камеры КсУТ, необходимого для полного сгорания топлива и обеспечения требуемого разрежения.

Для решения этой задачи, а также для обеспечения безопасной работы КсУТ применяются системы автоматического управления (САУ) котельным оборудованием, которые обеспечивают режим оптимального горения в топке и защиты в аварийных ситуациях, таких как недостаточное разрежение в топке и давление воздуха перед горелкой, путем прекращения подачи топлива и отключения ДС и ДВ [3].

Уровни управления режимами работы КсУТ

Современный подход к управлению котельным оборудованием базируется на трехуровневой автоматизированной системе контроля и управления (АСУ) (рис. 2).

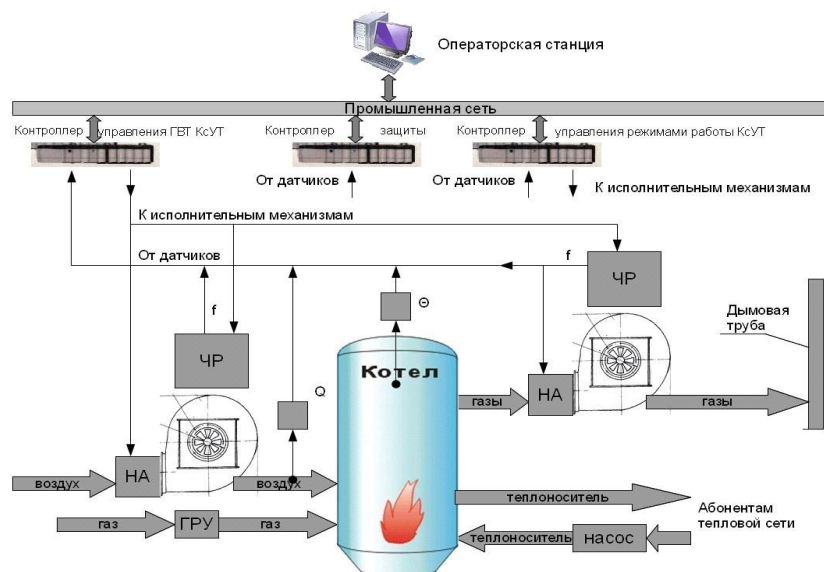


Рис. 2. Система управления и защиты режимов работы КсУТ

Первый уровень – система автоматического регулирования (САР) обеспечивает соответствие реальных значений расхода воздуха, разрежения, расхода газа, расхода и температуры теплоносителя заданным значениям, поступающим из контроллеров управления режимами работы КсУТ второго уровня.

Второй уровень – САУ обеспечивает работу котельного оборудования в автоматическом режиме. Контроллер управления режимами работы КсУТ, в соответствии с температурным графиком, задает значение расхода газа, воздуха и разрежения контроллерами третьего уровня.

Третий уровень – АСУ, обеспечивает передачу оператору котельной информации о состоянии окружающей среды, технологических характеристик котельного оборудования. Кроме того, оператор получает информацию от абонентов тепловой сети, аварийных случаях. На основе полученной информации, оператор имеет возможность, используя АСУ, внести коррективы в работу котельного оборудования.

Одной из важных задач АСУ является поддержание заданного соотношения смеси газ-воздух, подаваемой в горелки, и разрежения в топке КсУТ, от этого зависит КПД котла, а также количество вредных выбросов в атмосферу. Требуемые значения расхода воздуха и разрежения формируются контроллером управления режимами работы КсУТ. Контроллер управления ГВТ КсУТ должен обеспечить соответствие расхода воздуха и разрежения в топке котла заданным значениям в условиях действия возмущений. Контроллер защиты обеспечивает безопасную работу котла, отключая его в аварийных ситуациях по сигналам датчиков.

Наиболее целесообразно процесс регулирования расхода КсУТ производить таким образом, чтобы затраты энергии были минимальны.

Выводы

Результаты проведенного анализа позволяют сформировать основные требования к энергоэффективной САУ ГВТ КсУТ:

1. Диапазон регулирования САУ ГВТ КсУТ определяется исходя из диапазона регулирования мощности КсУТ, который обусловлен его максимальной $P_{\max}$ и минимальной $P_{\min}$ нагрузкой. При них котлоагрегат может длительно работать без вредных последствий, нарушения циркуляции теплоносителя или процесса горения. Допустимые нагрузки $P_{\max}$ и $P_{\min}$ обычно зависят от вида топлива. Например, $P_{\min}$ при использовании в качестве топлива газа составляет 30 % от номинальной. Таким образом диапазон регулирования мощности КсУТ составляет $\Delta P = ((30 \div 100)\%)P_{\text{ном}}$. Учитывая, что эта мощность прямо пропорциональна расходу воздуха, диапазон регулирования САУ КсУТ составляет $Q_{\text{зад}} = (0,3 \div 1)Q_{\text{ном}}$.

2. Режимы работы САУ ГВТ КсУТ, в частности значения, точность поддержания расхода воздуха и разрежения в топке, а также быстродействие, определяемое, как время перехода режимов работы от одних заданных значений Q к

другим, определяются из условий энергоэффективной и безопасной работы КсУТ.

3. Перерегулирование значений расхода воздуха и разрежения в переходных процессах – не более 5 %, в том числе исходя из необходимости обеспечения требуемой точности, а также надежной работы КсУТ при допустимых нагрузках.

Список использованных источников и литературы

1. *Тверской, Ю. А.* Регулирование разряжения в топке котла – современный подход. URL: <https://termokip.com.ua/regulirovanie-razryazheniya>.
2. *Плетнев, Г. П.* Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. – Москва : МЭИ, 2007. – 352 с.
3. *Голдобин, Ю. М.* Автоматизация теплоэнергетических установок / Ю. М. Голдобин, Е. Ю. Павлюк. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 186 с.
4. Анализ газовоздушного тракта отопительного котла как объекта управления / А. Г. Лютов, В. Ц. Зориктуев, М. Ю. Озеров, А. И. Ямаев // Вестник УГАТУ. – 2009. – № 1. – С. 75–81.

Сведения об авторах

Алексей Германович Лютов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматические системы», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА) (Россия, г. Москва), lutov1@mail.ru

Михаил Юрьевич Озеров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизации технологических процессов», ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (Россия, г.Уфа), katp07@mail.ru

Маргарита Сергеевна Моторина, магистрант кафедры «Автоматические системы» ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА» (Россия, г. Москва), margarita_motorina@mail.ru

Нейросетевое прогнозирование изменения эксплуатационных характеристик электролитических конденсаторов во времени

Д. Л. Макшаков, В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов

Рассматривается прогнозирование (моделирование) электрических характеристик электролитических конденсаторов с помощью нейросети на основе экспериментальных данных электрических параметров электролитических конденсаторов при хранении в нормальных климатических условиях. Применение нейросетевого прогнозирования позволит уменьшить срок проведения необходимых испытаний.

Ключевые слова: нейросеть, электролитический конденсатор, сохраняемость, надежность, электрические параметры, моделирование, ускоренные методы оценки.

Neural network prediction of changes in operational characteristics of electrolytic capacitors over time

D. L. Makshakov, V. A. Kuznetsova, P. L. Kuznetsov

The issues of prediction (modeling) of electrical characteristics of electrolytic capacitors are considered using a neural network based on experimental data of electrical parameters of electrolytic capacitors during storage in normal climatic conditions. The use of neural network forecasting will reduce the duration of the necessary tests

Keywords: neural network, electrolytic capacitor, persistence, reliability, electrical parameters, modeling, accelerated estimation methods.

Испытание готовой продукции – процесс длительный и сложный. Для сокращения сроков проведения испытаний и ускорения процесса внедрения новых материалов и технологий необходимо осваивать ускоренные способы проведения испытаний. Одним из современных направлений исследований является построение поведенческих моделей с помощью нейросети. Нейросеть – это возможность обработки огромного количества информации, она способна к обучению и корректировке. Ускоренные методы анализа позволят достаточно сильно уменьшить срок проведения испытаний.

Испытания на сохраняемость изделий [1, 2] – важное исследование для оценки качества электронных компонентов. Цель испытания – доказать сохраняемость электрических характеристик изделия в рамках технической документации во времени (15–30 лет). Ввиду длительности проведения испытаний с целью разработки ускоренных моделей исследований различных влияний, например качества внедряемых материалов, необходимо обрабатывать огромное количество информации, собранной предприятиями-изготовителями электронных компонентов, за многие годы испытаний. С помощью этих данных

возможно построение моделей прогнозирования поведения электрических характеристик по первоначальным данным, что является главной целью исследования.

Нейросетевая модель – это математическая модель, которая использует искусственные нейроны и их связи, чтобы обрабатывать данные. Структура нейронных связей используется вместо более привычных нам коэффициентов при переменных в математические модели, имеющих вид уравнения. Для представления нейронной сети в математическом виде необходимо представить ее в виде набора матриц. Имея первый слой с X -нейронами и второй слой с Y -нейронами, получают матрицу с X -строками и Y -столбцами весовых коэффициентов между ними. Таким образом, можно представить нейронную сеть как входной слой и несколько матриц весовых коэффициентов. Далее происходит матричное умножение матрица второго слоя на матрицу весовых коэффициентов между вторым и третьим слоем, и получают значения для нейронов третьего слоя. Так происходит для каждого слоя нейронной сети пока не получим значения для выходного слоя.

В ходе обучения нейронной сети на вход ей подаются матрицы с исходными данными, а на выходе получают матрицу, которая отражает результат моделирования испытания. Данная матрица затем сравнивается с реальными данными для оценки качества работы модели. Для подготовки данных для обучения нейронной сети используются структурированные данные реальных испытаний, в которых входной слой содержит исходные данные на начало испытания, а количество параметров в выходной матрице соответствует количеству параметров, фиксируемых во время реальных испытаний у конденсаторов. На момент начала обучения весовые матрицы заполняются случайными коэффициентами. Затем происходят прогоны нескольких примеров реальных данных через нейронную сеть, и полученные значения сравниваются с известными результатами. Разницу между ними называют ошибкой обучения. Далее, специальным алгоритмом «оптимизатором» все весовые коэффициенты в модели изменяются таким образом, чтобы минимизировать значение ошибки. Затем в модель подается следующая порция данных. После того как все имеющиеся данные прошли через модель, процесс повторяется. С каждой итерацией ошибка между выдаваемой моделью и реальными значениями сокращается. Таким образом, нейронная сеть моделирует процесс на основе входных данных и учится правильно определять его результаты.

Для моделирования процессов изменения эксплуатационных характеристик электролитических конденсаторов во времени хранения с помощью нейросети были использованы данные из проведенных испытаний. В процессе подготовки данных для нейросети отделяются все заранее известные параметры – емкость конденсатора, тангенс угла потерь, ток утечки и эквивалентное последовательное сопротивление до начала испытаний вместе с данными по номинальной емкости партии, ее допускам и сроке хранения. Эти данные являются входными данными или X -нейронами. Емкость конденсатора, тангенс угла потерь, ток утечки и эквивалентное последовательное сопротивление после завершения ис-

питаний на сохраняемость – это Y -нейроны, с ними сравниваются прогнозируемые моделью параметры. Для каждого конкретного конденсатора во входных данных меняется срок хранения, и в выходных данных приводятся электрические параметры конденсатора по истечению этого срока. Часть данных о конкретных конденсаторах (номиналах) образует тестовую выборку, по которой проверяется точность нейронной сети. Разработанная структура данных определяет структуру входного и выходного слоя нейронной сети [12].

Пример разработанной структуры данных представлен в табл. 1 и 2. Вариант предсказания электрических параметров конденсаторов сразу для всех лет хранения отброшен по двум причинам. Во-первых, срок хранения может быть разным, а нейросетевая модель выдает фиксированное количество выходных значений. Соответственно итоговая модель будет привязана к определенной длительности испытаний. Во-вторых, небольшой объем данных об испытаниях разбивается на большее количество примеров, что положительно сказывается на качестве обучения.

Таблица 1. Структура входных данных

№ кон.	C_0 , мкФ	$\text{tg } \delta_0$, %	I_{y0} , мкА	$R_{\text{экв}0}$, Ом	T , г	$U_{\text{ном}}$, В	$C_{\text{ном}}$, мкФ	ΔC , %
1	106	1,5	1	0,13	0	10	100	10
1	106	1,5	1	0,13	1	10	100	10
1	106	1,5	1	0,13	2	10	100	10
1	106	1,5	1	0,13	3	10	100	10
1	106	1,5	1	0,13	4	10	100	10
1	106	1,5	1	0,13	5	10	100	10
1	106	1,5	1	0,13	6	10	100	10

Таблица 2. Структура выходных данных

№ кон.	C , мкФ	$\text{tg } \delta$, %	I_{yt} , мкА	$R_{\text{экв}}$, Ом
1	106	1,5	1	0,13
1	104	1,7	1	0,15
1	106	1,5	1	0,15
1	105	2,8	1	0,14
1	104	0,9	1	0,16
1	103	3	1	0,17
1	104	1,4	1	0,27

Опираясь на структуру стандартных нейронных сетей, используемых для решения задачи регрессии, необходимо спроектировать структуру скрытых нейронных слоев нейросетевой модели, которая будет обеспечивать максимально возможную точность предсказаний. Для этого проводится обучение множества различных структур нейронных сетей, сравниваются их точности, наиболее хорошо показавшие себя структуры отбираются. В структуру этих сетей вносятся дополнительные изменения, вновь происходит процесс обучения и сравнения результатов. Данный процесс называется подбором гиперпарамет-

ров нейронной сети и включает в себя не только проектирование структуры сети, но и определение различных параметров обучения. В итоговой нейронной сети, структурная схема которой представлена на рис. 1, применяется входной слой для нормализации данных, который приводит их к диапазону от -1 до 1 , что обеспечивает более удобные условия для работы нейронной сети. После этого слоя следует ряд полносвязных слоев. В параметре «kernel» слоя указан размер матрицы весовых коэффициентов между данным слоем и предыдущим слоем. В параметре «bias» указана размерность матрицы нейронов данного слоя. Слои, отмеченные надписью «ReLU», используют выходную функцию, преобразующую все отрицательные значения в нейронах в 0 .

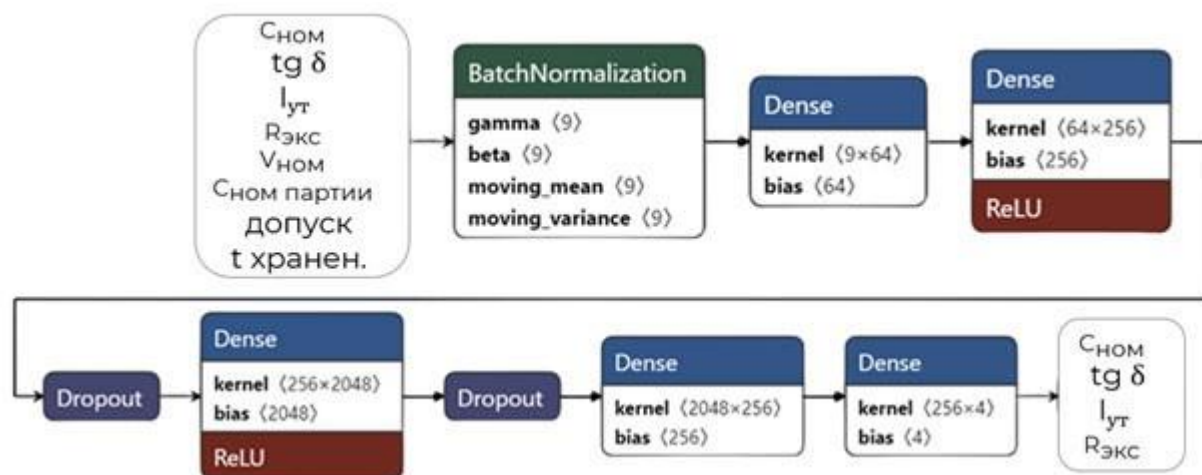


Рис. 1. Разработанная функциональная схема нейронной сети для прогнозирования изменения электрических параметров конденсаторов при хранении

Между полносвязными слоями присутствуют слои «Dropout», которые случайным образом отключают часть связей между этими слоями на каждой итерации. Их применение позволяет избежать переобучения нейронной сети на предоставленных примерах (что является наиболее простым способом достижения нулевой ошибки) и способствует поиску закономерностей в данных.

После рассмотрения структуры переходят к параметрам обучения. Процесс обучения заключается в 500 эпохах, что означает, что нейронная сеть 500 раз прошла через все подготовленные данные. Дальнейшее продолжение обучения нецелесообразно, поскольку не приводит к уменьшению ошибки модели. Итоговые значения весовых коэффициентов взяты для 500 эпохи, на которых наблюдалась максимальная точность модели.

Параметр нейросетевой модели – скорость обучения «learning rate» – отвечает за то, с каким шагом алгоритмов оптимизации будут изменяться весовые коэффициенты. Чем шаг меньше, тем больше вероятности попасть в пик локального максимума. Соответственно, со временем необходимо уменьшать «learning rate», чтобы на начальных этапах обучения найти наиболее оптимальный локальный максимум функции точности, а на завершающих этапах ока-

заться максимально близко к точке этого локального максимума. В разработанной модели используется «learning rate», заданный динамически.

В результате проведенной работы была обучена нейронная сеть для прогнозирования изменения параметров конденсаторов во время хранения и получены предсказания с точностью в 1,3 % для среднего значения распределения и 22 % для среднеквадратичного отклонения распределения. Эти результаты могут быть применены для прогнозирования электрических параметров конденсаторов при проведении опытных работ. Для дальнейшего обучения нейросети необходимо добавлять появляющиеся данные о реальных испытаниях электролитических конденсаторов для построения более точной модели электрических параметров конденсаторов

Список использованных источников и литературы

1. *Беляева, Е. А.* Исследование влияния срока сохраняемости на эксплуатационные характеристики и состояние объемно-пористых танталовых конденсаторов / Е. А. Беляева, В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1 (23). – С. 96–99.
2. *Кузнецова, В. А.* Ускоренные испытания сохраняемости с использованием теплового метода / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018 – Т. 21, № 1. – С. 82–88.
3. Алгоритм обратного распространения ошибки // Блог портала tproger : интернет-портал. – URL : https://vk.com/wall-30666517_1180858.

Сведения об авторах

Данил Леонидович Макшаков, студент, СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), dlmakshakow@mail.ru

Валентина Александровна Кузнецова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), vklynch@mail.ru

Павел Леонидович Кузнецов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), pavellk@mail.ru

Механизм пробоя тонких диэлектрических пленок*

А. Е. Стрелкова, Ю. В. Сахаров

В данной статье рассмотрены механизмы пробоя тонких пленок, на примере тонкопленочных конденсаторов (ТПК). Надежность ТПК часто определяется пробоем, в связи с этим изучение закономерностей пробоя диэлектрика ТПК и разработка соответствующих рекомендаций представляется актуальной задачей микроэлектроники.

Ключевые слова: тонкопленочный конденсатор, пробой диэлектрика, диэлектрическая пленка, дефекты, отрицательно объемный заряд.

Mechanism of breakdown of thin dielectric films

A. E. Strelkova, Yu. V. Sakharov

This article discusses the breakdown mechanisms of thin films, using thin film capacitors (TFCs) as an example. The reliability of TPCs is often determined by breakdown; in this regard, the study of the breakdown patterns of the TPC dielectric and the development of appropriate recommendations seems to be an urgent task in microelectronics.

Keywords: thin film capacitor, dielectric breakdown, dielectric film, defects, negative space charge.

Диэлектрические пленки являются разновидностью твердых диэлектриков, но условия пробоя пленок и массивных диэлектриков существенно различаются вследствие размерных эффектов и структурных несовершенств тонких пленок и тонкопленочных систем в целом.

Механизм формирования пробоя твердых диэлектриков к настоящему времени изучен достаточно глубоко. На основании многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [1] установлено, что разряд в твердых диэлектриках является лавинно-стримерным процессом, т. е. обусловлен ударной ионизацией электронами.

Одной из важнейших закономерностей пробоя является электрическое упрочнение, заключающееся в возрастании электрической прочности (E_{np}) диэлектрика при уменьшении его толщины (d). Поэтому по зависимости $E_{np} = f(d)$ судят о

правомочности той или иной теории пробоя. Форлани и Минная [2] получили, что при пробое твердых диэлектриков, обусловленном ударной ионизацией электро-

© Стрелкова А. Е., Сахаров Ю. В., 2024

* Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040). Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» (регистрационный номер 200568).

нами, инжектированными из электрода, находящегося под отрицательным потенциалом, (катода), $E_{np} \approx d^{-\alpha}$, где $\alpha = 0,25-0,5$.

В других работах, как теоретических [3], так и экспериментальных [3], также базирующихся на представлении об ударной ионизации электронами, показано, что зависимость $E_{np} = f(d)$ может иметь и логарифмический характер. Например, в [3] зависимость $E_{np} = f(d)$ дается в виде:

$$E_{np} (B \cdot \text{см}^{-1}) = \frac{1,1 \cdot 10^7}{11,8 + \ln \frac{d}{24,6 + 2,6 \ln d}}.$$

В некоторых видах твердых диэлектриков (стеклах, полимерах и т. п.) пробой носит тепловой характер. Электрическое упрочнение может наблюдаться и при этом механизме пробоя; здесь оно обусловлено улучшением теплоотвода с уменьшением d .

Все аналитические выражения, устанавливающие связь между E_{np} и толщиной при пробое твердых диэлектриков, получены для условий однородного электрического поля. Использование этих выражений для интерпретации механизма пробоя, происходящего в неоднородном электрическом поле, как это имеет место при пробое ТПС, неправомерно. Однако такие попытки до сих пор имеют место.

Изучая пробой диэлектрических пленок Al_2O_3 , Ta_2O_5 и ZrO_2 , полученных анодированием, авторы [4–6] на основании характера зависимости $E_{np} = f(d)$ делают вывод, что пробой также обусловлен ударной ионизацией. В данном эксперименте в качестве верхнего электрода использовался стальной полированный шарик. В результате пробоя диэлектрических пленок электрическая прочность всегда была ниже при отрицательной полярности нижнего электрода. По мнению авторов, поверхностные состояния на границе раздела оксид-шарик благоприятствовали созданию ООЗ, который затруднял эмиссию из шарика и увеличивал E_{np} .

Следует отметить тот факт, что в изложенных работах E_{np} всегда ниже при отрицательной полярности подложки, на которой выращивалась диэлектрическая пленка, т. е. при отрицательной полярности нижнего электрода. Можно предполагать, что поверхность металла, подвергающегося воздействию кислой либо щелочной среды, более шероховата, чем поверхность шарика или капли ртути. Более низкая E_{np} при отрицательной полярности более неоднородной поверхности свидетельствует о значительном влиянии эмиссии электронов из микровыступов катода в диэлектрик.

Одними из первых исследователей, подробно изучивших механизм пробоя системы $Al - SiO - Al$ в условиях почти однородного поля, были Кляйн и его сотрудники [5]. В их исследованиях отмечается, что первые пробои есть пробои по дефектным местам тонкопленочных систем (ТПС), где электрическое поле увеличено. Пробой же при максимальном напряжении (после проведения нескольких сотен пробоев) происходит, по мнению авторов, в бездефектном диэлектрике, т.е.

в условиях однородного поля. Именно пробой при максимальном напряжении (U_m) и был объектом изучения в этих работах.

Исследование температурной зависимости максимальной электрической прочности (E_m) на постоянном токе привело авторов к выводу о тепловой форме пробоя системы $Al - SiO - Al$ [11].

Построенная авторами феноменологическая теория пробоя ТПС $Al - SiO - Al$ дает хорошее согласие с экспериментом. Недостатком этой теории является то, что она не раскрывает механизм процессов, приводящих к пробое: например, не отвечает даже на вопрос, какие – электронные или ионные процессы ответственны за пробой.

Механизм пробоя системы $Al - SiO - Al$ исследовался также Буденштайном и Хейесом. Отличительной особенностью данной работы являлось сопоставление электрических измерений с наблюдениями ТПС в процессе пробоя в электронном микроскопе. При этом было замечено, что пробой начинается в местах неоднородностей, на так называемых «темных пятнах». Темные пятна диаметром 0,5–1 мкм, неповторимые по форме, распределены случайно по площади ТПС. Природа этих пятен осталась невыясненной.

Найдено, что в канале пробоя выделяется чистый кремний в виде шариков, диаметр которых пропорционален энергии, разряжаемой при пробое через конденсатор. На основании вышеприведенных фактов авторами было высказано предположение об электрической природе пробоя системы $Al - SiO - Al$. Роль темных пятен, по их мнению, сводилась к созданию локального критического поля, необходимого для протекания реакции разложения SiO с выделением свободного кремния в кислороде.

Существенным недостатком исследований, проводимых в цитируемой работе с помощью электронного микроскопа, являлось то, что система $Al - SiO - Al$ просматривалась на просвет сразу вся, как единая структура. При этом трудно сказать, чему принадлежали темные пятна: электродам или диэлектрику. Ничего не было известно и о границе раздела электрод-диэлектрик.

Изучая вопрос о механизме пробоя пленок Al_2O_3 , полученных анодированием напыленных пленок алюминия, Э. Г. Косцов исходил из доказанного электронно-микроскопическими исследованиями факта, что испаренные металлические пленки имеют шероховатую поверхность в виде микровыступов. При подаче на ТПС напряжения электрическое поле внутри диэлектрика будет неоднородным с максимальным значением напряженности на вершине микровыступов. Предполагается, что выступы характеризуются некоторыми эффективным радиусом кривизны и распределены статистически по закону Пуассона. Высокая плотность тока с некоторых микровыступов будет способствовать их разогреву и прилегающих к нему областей диэлектрика. В этом случае возможно нарушение электрической прочности, которое может быть описано в рамках теплового пробоя Вагнера.

Г. А. Воробьев и его сотрудники [6] при исследовании механизма пробоя ТПС $Al - SiO - Al$, получаемой термическим испарением в вакууме на стеклянные подложки, за $U_{пр}$ принимали напряжение первого пробоя. Был обнаружен эффект по-

лярности E_{np} , обусловленный различием в шероховатости поверхности верхнего и нижнего электродов. Показано в данных работах, что пробой связан с эмиссией электронов из электрода, и E_{np} будет меньше в том случае, когда микровыступы (микроострия), обуславливающие большую напряженность электрического поля, находятся под отрицательным потенциалом. Кроме того, было показано в работах, что на процесс формирования пробоя существенное влияние оказывает отрицательный объемный заряд (ООЗ), образующийся в диэлектрике при захвате инжектированных из электрода электронов ловушками.

Следует отметить, что на образование ООЗ в диэлектрических пленках указывается во многих работах. По оценкам, проведенным в этих работах, ООЗ образуется в прикатодной области диэлектрика толщиной 0,07–0,15 мкм.

В работах Воробьева были исследованы временные, температурные, частотные характеристики пробоя системы $Al - SiO - Al$, и на основании экспериментальных данных и количественных оценок, проведенных в перечисленных работах, предложена качественная модель формирования пробоя ТПС. Электроны, эмиттируемые из микровыступов, имеющих на катоде, захватываются ловушками. В результате этого в прикатодной области диэлектрика вблизи микровыступа образуется ООЗ, ограничивающий эмиссию с микровыступа. При некоторой плотности тока область диэлектрика, прилегающая к микровыступу, разогревается, что приводит к разрушению ООЗ за счет эффекта Френкеля. Разрушение ООЗ приводит к резкому увеличению тока. При этом возможно разложение диэлектрика с выделением проводящих компонентов (например, в случае SiO выделяется кремний). Область, прилегающая к микровыступу, становится проводящей и как бы продолжением микровыступа. Затем этот процесс продвигается вглубь диэлектрика с все возрастающей скоростью, пока не достигнет второго электрода.

Учитывая, что основным фактором, влияющим на величину E_{np} ТПС, является эмиссия электронов из микровыступов, следует полагать, что «сглаживание» поверхности электрода, находящегося под отрицательным потенциалом, должно привести к существенному увеличению E_{np} .

В работах, в которых основной упор сделан на анализ зависимости $E_{np} = f(d)$, делается вывод о лавинном механизме пробоя. На наш взгляд, такой подход к интерпретации механизма пробоя в условиях неопределенно-неоднородного электрического поля, обусловленного структурой МДМ-систем, неверен. В тех работах, в которых учитывалась реальная структура ТПС, и при анализе механизма пробоя учитывался комплекс характеристик пробоя, в частности температурные и временные характеристики, сделан вывод, что пробой ТПС является тепловым или электронно-термическим.

Список использованных источников и литературы

1. Стрелкова, А. Е. Исследование зависимости площади разрушения верхнего электрода от энергии пробоя тонкопленочного конденсатора / А. Е. Стрелкова, Ю. В. Сахаров, М. А. Свириденко // Актуальные проблемы науки и техники : материалы

II Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». – Сарапул : УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 663–667.

2. *Стрелкова, А. Е.* Исследование пористых пленок диоксида кремния, модифицированных углеродом / А. Е. Стрелкова, Ю. В. Сахаров // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2022 (МЭС-2022) : XI Всероссийская научно-техническая конференция / под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. – Москва : ИППМ РАН: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, 2022. – С. 170–175.

3. *Физика диэлектриков (область сильных полей): учебное пособие* / Г. А. Воробьев, Ю. П. Похолков, Ю. Д. Королев, В. И. Меркулов. – Томск :Изд-во ТПУ, 2011. – 245 с.

4. *Субботина, А. Е.* Влияние полярности напряжения на электрическую прочность тонкопленочных конденсаторов / А. Е. Субботина, Ю. В. Сахаров // Изв. вузов. Физика. – 2022. – № 3. – С. 92–96.

5. *Мухачев, В. А.* О температурной зависимости электрической прочности пленок монооксида кремния / В. А. Мухачев, Н. С. Мухачева // Изв. вузов СССР, сер.физ., 1970. – 4 с.

6. *Стрелкова, А. Е.* Определение времени формирования канала пробоя по упрощенной модели / А. Е. Стрелкова, Ю. В. Сахаров // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 25-й Всероссийской молодежной научной конференции (г. Ульяновск, 25–27 октября 2022 года). – Ульяновск: УлГТУ, 2022. – С. 153–155.

Сведения об авторах

Анастасия Евгеньевна Стрелкова, ассистент кафедры «Физической электроники (ФЭ)», Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) (Россия, г. Томск), anastasii.a.subbotina@tusur.ru

Юрий Владимирович Сахаров, доктор технических наук, профессор кафедры «Физической электроники (ФЭ)» Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) (Россия, г. Томск), sakh99@mail.ru

Реализация базы знаний в процессе автоматизации технологической подготовки в единичном и мелкосерийном производстве

Д. А. Девятков

В работе рассматриваются методологические вопросы автоматизации процесса технологической подготовки в единичном и мелкосерийном производстве. Одним из эффективных решений, применительно к конкретным производствам, будет применение интегрированного метода обобщения, накопления и представления технологической и конструкторской информации с использованием базы знаний. Правильно организованная и структурированная база знаний может значительно улучшить эффективность производства, сократить время и затраты на разработку технологических процессов, а также повысить качество конечной продукции.

Ключевые слова: база знаний, данные, единичное и мелкосерийное производство, технологический процесс, автоматизация.

Implementation and capabilities of the knowledge base in the process of automation of technological training in single and small-scale production

D. A. Devyatov

The paper considers methodological issues of automation of the process of technological preparation in single and small-scale production. One of the effective solutions, in relation to specific production, will be the use of an integrated method of generalization, accumulation and presentation of technological and design information using a knowledge base. A properly organized and structured knowledge base can significantly improve production efficiency, reduce the time and cost of developing technological processes, and improve the quality of final products.

Keywords: knowledge base, structure, data, single and small-scale production, technological process, automation.

В современном мире автоматизация [1] играет ключевую роль в повышении эффективности производства и улучшении конкурентоспособности предприятий. Одной из важных областей автоматизации является технологическая подготовка, которая включает в себя разработку технологических процессов, выбор оборудования, определение последовательности операций и другие важные аспекты производства.

База знаний является одним из распространённых инструментов, используемых для автоматизации технологической подготовки. Она представляет собой структурированное хранилище информации, содержащее знания и опыт специалистов в данной области. База знаний позволяет эффективно организовать

и использовать собранную информацию, а также делиться ею между различными участниками производственного процесса.

В данной статье рассматриваются реализация и возможности базы знаний в процессе автоматизации технологической подготовки в единичном и мелко-серийном производстве [2].

Реализация

В условиях промышленного производства [3] возможно различное применение хранилищ информации [4], баз данных [5] и баз знаний [6].

База знаний может быть реализована как облачная, так и локальная, и выбор зависит от конкретных потребностей и особенностей предприятия. Обе модели имеют свои преимущества и недостатки.

Облачная база знаний

Доступность везде и всегда: сотрудники могут получить доступ к базе знаний из любой точки мира, что особенно важно, если на предприятии есть распределенные команды или филиалы.

Обновления и обслуживание: поставщик облачных услуг обеспечивает обновление и обслуживание системы, снимая с предприятия ответственность за аппаратное обеспечение и программное обеспечение.

Масштабируемость: облачные решения легко масштабируются в зависимости от потребностей предприятия, что удобно при росте объемов данных.

Безопасность данных: крупные поставщики облачных услуг обеспечивают высокий уровень безопасности данных и регулярно обновляют системы безопасности.

Локальная база знаний

Контроль над данными: локальная база знаний предоставляет больший контроль над данными, что может быть важным с точки зрения конфиденциальности или соответствия законодательству.

Соответствие регуляторам: в некоторых отраслях и регионах существуют строгие требования к хранению данных, и локальная база может обеспечить лучшее соответствие таким требованиям.

Более высокая скорость доступа: локальные базы данных часто обеспечивают более высокую скорость доступа к данным, поскольку они хранятся на серверах, расположенных физически ближе к пользователям.

Независимость от интернета: локальная база знаний обеспечивает независимость от доступа к интернету, что может быть критически важно в случаях, когда связь с облачным сервером прерывается.

Преимущества выбора

Если предприятие стремится к гибкости и доступности из любой точки мира, облачная база знаний может быть предпочтительной.

Если контроль над данными и соблюдение регулирований имеют высший приоритет, локальная база данных может быть более подходящей.

Иногда гибридные решения, комбинирующие облачные и локальные элементы, могут предоставить оптимальное сочетание преимуществ обоих подходов.

Возможности

При этом применительно к задачам автоматизации технологической подготовки производства в единичные и мелкосерийные типы базы знаний могут быть использованы в качестве инструментария таких процессов, как:

1. Стандартизация процессов [7, 8]: для обеспечения единообразия в работе сотрудников и снижения вероятности ошибок применяется единая база знаний стандартных рабочих процессов, методов и приемов, применяемых в технологической подготовке.

2. Оптимизация времени и стоимости [9]: база знаний может содержать информацию о процессах, инструментах, материалах и параметрах, которые можно использовать для оптимальной технологической подготовки. Это помогает снизить время изготовления, улучшить качество и снизить затраты на производство.

3. Разрешение проблем: база знаний может содержать информацию о решениях для типовых проблем, с которыми можно столкнуться во время технологической подготовки. Это позволяет сотрудникам быстро находить и применять эффективные решения, ускоряя процесс производства.

4. Управление изменениями: база знаний может быть использована для управления изменениями в процессе технологической подготовки. Она может содержать информацию о предыдущих изменениях, причинах их внесения, а также о том, как они повлияли на производственный процесс. Это помогает улучшить планирование и предотвращать повторение ошибок в будущем.

5. Обучение новых сотрудников: База знаний может быть использована для обучения новых сотрудников, предоставляя им доступ к информации о процессах, инструкциям, стандартам и передовому опыту. Это позволяет сократить время, необходимое для вхождения новых сотрудников в работу и повысить их эффективность.

Реализация базы знаний становится ключевым элементом в стремлении предприятий к улучшению производственных процессов и достижению конкурентных преимуществ в динамичном бизнес-окружении. Эффективное использование знаний о технологических процессах способствует инновациям и повышению общей производительности предприятия.

Список использованных источников и литературы

1. *Абдулханова, М.* Технологии производства материалов и изделий и автоматизация технологических процессов на предприятиях : учеб. пособие / М. Абдулханова, В. А. Воробьев. – Москва : Солон-пресс, 2014. – 564 с.
2. *Свирский, Д. Н.* Автоматизация принятия технологических решений в компактном производстве машиностроительной продукции / Д. Н. Свирский, А. Л. Климентьев // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиностроение и приборостроение. – 2010. – № 2. – С. 54–63.
3. *Бухалков, М. И.* Организация промышленного производства : учебник. – Москва : ИНФРА-М, 2016.

4. Ahlawat, A., et al. Information Storage and Retrieval System // International Journal of Computer Science and Information Technologies 6.1 (2015): 113-118.
5. “A Survey of NoSQL Stores”. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Volume 29, Issue 2, February 2017, Pages 451-469.
6. Weikum G., Hoart J., Suchanek F. M., Berkahn P. Knowledge Harvester: Machine Learning for Automated Knowledge Base Construction. Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Conference on Information and Knowledge Management, 2014.
7. Шильман, Л. З. Технологические процессы предприятий машиностроения – Учебное пособие для студ. сред. проф. образования. – Москва : ИЦ Академия, 2011. – 192 с.
8. Петухов, А. В. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов – пособие по одноименному курсу для студентов специальности 36.01.03 «Технология машиностроения». – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2005. – 84 с.
9. Головачев, А. С. Экономика промышленного предприятия. – Минск : Вышэйшая школа, 2021.
10. Девятков, Д. А. Оценка возможности использования отечественных САД систем в САПР ТП для мелкосерийного и единичного производства / Д. А. Девятков, А. В. Кордюков // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2023. – № 2 (65). – С. 101–109.

Сведения об авторах

Даниил Андреевич Девятков, аспирант кафедры «Тепловые двигатели и установки», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Ижевск), divatov_daniil1999@mail.ru

СЕКЦИЯ № 8 ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СВЯЗЬ

УДК 621.396

Повышение скорости передачи данных в мобильных сетях

А. Л. Тимофеев

Рассматривается проблема несогласованности методов кодирования сигналов в цифровых каналах связи и алгоритмов работы транспортного протокола в пакетных сетях передачи данных. Предложен способ снижения территориальной неравномерности распределения скорости передачи данных.

Ключевые слова: канальное кодирование, гарантированная доставка, избыточность, транспортный протокол.

Increasing data transfer speeds on mobile networks

A. L. Timofeev

The problem of inconsistency between signal coding methods in digital communication channels and transport protocol operation algorithms in packet data networks is considered. A method has been proposed to reduce the territorial unevenness of data transmission speed distribution.

Keywords: channel coding, guaranteed delivery, redundancy, transport protocol.

К настоящему времени развитие радиосвязи пришло к следующему:

- все системы связи являются цифровыми;
- практически все системы связи включены в интернет и поэтому на четвертом (транспортном) уровне модели OSI (Эталонной модели взаимодействия открытых систем) используют протокол TCP;
- теория электрической связи рассматривает процессы передачи сигналов на первом (физическом) уровне модели OSI (модуляция, спектральная эффективность, битовая скорость) и на втором (канальном) уровне (обнаружение и исправление ошибок, возникающих на физическом уровне). Конечной задачей этих уровней является обеспечение требуемой скорости передачи сигналов, состоящих из нескольких бит, с требуемой вероятностью битовой ошибки;
- начиная с третьего уровня модели OSI и выше – это сфера IT. На четвертом уровне протокол TCP обеспечивает гарантированную доставку IP-пакетов;
- выбор решений по построению канала связи (вид модуляции, способ помехоустойчивого кодирования, скорость кодирования, уровень избыточности)

никак не согласуется с параметрами протокола TCP (размер пакета, время ожидания квитанции, уровень избыточности, возникающей из-за дублирования пакетов) и в итоге – с получаемой скоростью передачи информации на прикладном уровне.

В мобильных сетях пакет данных протокола TCP имеет размер 1460 байт (11680 бит). Это значит, что при ошибке в одном бите в пакете, поступающем на уровень TCP в приемнике, происходит повторная передача пакета длиной 11680 бит. В сетях 5G и 6G существует тенденция увеличения размера пакета, поэтому ошибки, пропущенные кодеком помехоустойчивого кодирования, будут приводить к большему снижению скорости.

При проектировании существующих и будущих сетей связи (5G и 6G) в них закладываются технические решения для достижения требуемых скоростей связи (гигабитовые скорости в сетях 5G и терабитовые – в сетях 6G). Большое число статей посвящено сравнительному анализу помехоустойчивости используемых и перспективных технологий радиосвязи, но в большинстве из них вероятность ошибок, возникающих в канале связи, (коэффициент битовой ошибки) рассматривается в диапазоне 10^{-4} и более (рис. 1 [1]).

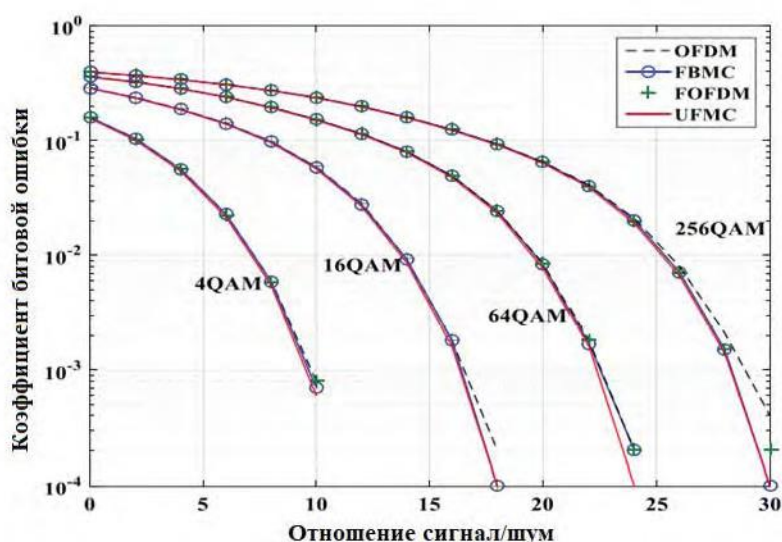


Рис. 1. Эффективность вариантов многостанционного доступа для сотовых сетей

Это значит, что при длине пакета протокола TCP 11680 бит и вероятности ошибки 10^{-4} практически каждый пакет содержит ошибку. Одиночные ошибки устраняются используемыми корректирующими кодами, но двукратные и более ошибки передаются протоколу TCP, который обеспечивает гарантированную доставку путем многократного дублирования пакетов. Это приводит к снижению скорости передачи информации у пользователя в десятки и сотни раз.

Паспортная скорость передачи данных в сетях 5G обеспечивается при хорошем качестве канала (при отношении сигнал/шум $S/N=20$ дБ вероятность ошибки 0,01 для 64QAM) в радиусе 100 м от базовой станции. При увеличении расстояния в 3 раза напряженность поля снижается на 10 дБ, в этом случае $S/N=10$ дБ, вероятность ошибки 0,12–0,15. Помехоустойчивые коды, применяе-

мые на канальном уровне, с избыточностью, как правило, не более 2, плохо справляются с таким уровнем ошибок. Широко распространенные коды от кода Рида – Соломона до LDPC выдают в таком канале большое число ошибок при декодировании, которые исправляет протокол TCP путем многократного дублирования IP-пакетов. Если в сети LTE вместо 300 Мбит/с абонент получает реальную скорость 3 Мбит/с, это значит, что в среднем каждый IP-пакет повторяется 100 раз, т.е. вводится 100-кратная избыточность.

При заявляемом радиусе действия базовой станции 5G 1 км зона скоростной связи радиусом 300 м имеет площадь, составляющую 9% площади покрытия базовой станции. Таким образом, реальная скорость передачи данных на 90% территории сети мобильной связи соответствует скорости предыдущего поколения (для LTE – скорости 3G, для 5G – скорости LTE), т.е. существует территориальное цифровое неравенство.

Для решения этой проблемы необходимо при выборе сетевых технологий рассматривать влияние на скорость передачи данных закладываемых методов обработки сигналов на всех уровнях модели OSI, обеспечивающих передачу информации, – от первого (физического) до четвертого (транспортного).

Примером такого метода является голографическое кодирование [2], которое обеспечивает при 10-кратной избыточности уровень ошибки декодирования 10^{-6} при вероятности ошибки на входе 0,2, а при 32-кратной избыточности полное устранение ошибок при вероятности входной ошибки 0,33. При этом на уровне протокола TCP вообще не возникает необходимости дублирования пакетов.

На рис. 2 приведены зависимости отношения скорости передачи данных, фиксируемой у абонента, к скорости, определяемой стандартом связи, от вероятности ошибки в канале связи (BER) для двух вариантов организации канала связи: при отсутствии дополнительного кодирования и при использовании голографического кодирования.

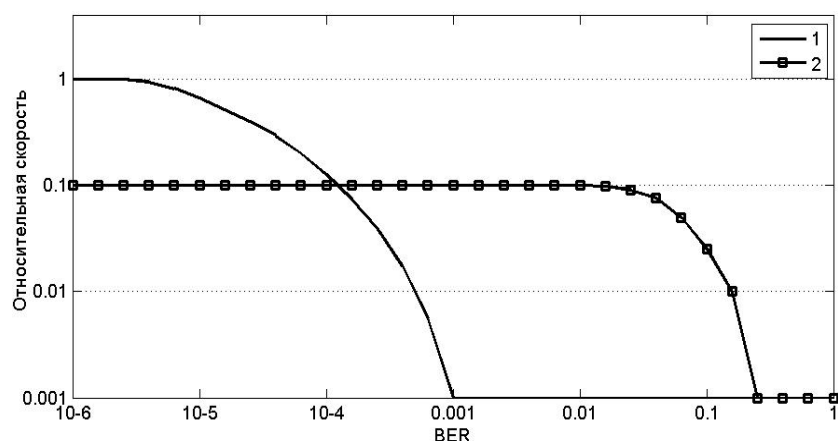


Рис. 2. Относительная скорость передачи данных: 1 – без дополнительного голографического кодирования, 2 – с голографическим кодированием

Из рисунка видно, что относительная скорость, равная 1, т. е. паспортная скорость стандарта связи, достигается только при вероятности ошибки менее 10^{-5} , а при увеличении вероятности ошибки до 10^{-3} скорость снижается в 1000 раз. Использование же кодирования позволяет сохранить скорость в 10 раз меньше максимальной до вероятности ошибки 0,05.

Таким образом, внедрение чисто программного решения – голографического кодека, подключаемого только в каналах с низким качеством связи, позволит если не полностью устранить, то сгладить территориальное цифровое неравенство. Автоматический выбор схемы кодирования отработан еще в сетях GSM.

Список использованных источников и литературы

1. Горгадзе, С. Ф. Эффективность вариантов многостанционного доступа для сотовых сетей 5G и 6G / С. Ф. Горгадзе, А. В. Ермакова // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 19–26. – doi: 10.36724/2409&5419&2022&14&2&19&26.

2. Тимофеев, А. Л. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации / А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 978–984. – doi: 10.18287/2412-6179-CO-739.

Сведения об авторе

Александр Леонидович Тимофеев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронной инженерии» Уфимского университета науки и технологий (г. Уфа, Россия), a_l_t@inbox.ru

УДК 621.791.92; 621.785.54

**Влияние послойного лазерного переплавления на структуру
стали 07X18H12M2 при прямом лазерном выращивании**

А. В. Дубров, Ю. Н. Завалов, П. С. Родин, О. И. Шаршов, М. И. Банников

Проведен анализ структуры материала, полученного комбинированной технологией лазерного нанесения металла и лазерного переплавления из порошка стали 07X18H12M2 (аналог AISI 316L). Показано, что материал при определенных комбинациях технологических параметров является слоистой структурой, в котором чередуются слои с разными свойствами.

Ключевые слова: лазерное нанесение металла, лазерное переплавление, слоистые структуры.

**Effect of layer-by-layer laser remelting on the structure of 316L stainless steel
during laser metal deposition**

A. V. Dubrov, Yu. N. Zavalov, P. S. Rodin, O. I. Sharshov, M. I. Bannikov

The analysis of the structure of the material obtained by the combined technology of laser metal deposition and laser remelting using steel powder 07Kh18N12M2 (AISI 316L) is carried out. It is shown that the material with certain combinations of technological parameters is a layered structure in which layers with different properties alternate.

Keywords: laser metal deposition, laser remelting, layered structures.

Лазерное нанесение металла (ЛНМ) – комплексная и многофакторная технология с растущей сферой применения [1]. Потенциальные возможности ЛНМ в области создания и ремонта ответственных изделий сложных форм формируют запрос на изучение путей совершенствования этой технологии как в части охвата разнообразных материалов [2], так и в области наращивания управляемости процесса и бездефектности полученного материала [3].

В процессе ЛНМ лазерное излучение и металлический порошок подаются локально в некоторую область. За счет плавления лазерным излучением основы формируется ванна расплава, куда попадают частицы порошка. В результате относительного движения лазерной головы и подложки происходит образование валика. Материал подвергается быстрым циклам плавления-затвердевания с высокими температурными градиентами и скоростями охлаждения. Условия, в которых происходит фазовый переход и эволюция ванны расплава, опреде-

ляются локальными термодинамическими условиями [4]. В то же время сложная геометрия объекта, включающая в себя полнотелые и тонкостеночные или нависающие элементы, предопределяет переменные условия теплопередачи вдоль траектории построения.

Важным направлением развития аддитивных технологий является управление свойствами материала в процессе его формирования для создания материалов с заданными свойствами, в том числе создание материалов с изменяющимися в пространстве свойствами – функционально градиентных материалов [5, 6]. В тех случаях когда высокие требования к структурным, геометрическим и другим свойствам изделий не удастся достичь с использованием устоявшейся концепции ЛНМ, возможной стратегией является модификация исходной технологии с применением дополнительных процессов. Одним из дополнительных этапов может быть лазерное переплавление (ЛП) нанесенного материала, применяемое после выращивания каждого слоя. Лазерное послойное переплавление ранее исследовалось в технологиях лазерного селективного плавления, например [7], а также лазерного нанесения металла, например при формировании однослойных объектов [8]. Такая комбинация технологий ЛНМ и ЛП, при которой ЛП осуществляется после каждого слоя ЛНМ, является перспективным и малоизученным направлением.

В данной работе исследуется влияние различных комбинаций параметров процесса на этапах ЛНМ и ЛП на структуру материала и формирование слоистых структур при выращивании из порошка нержавеющей стали 07X18H12M2 (аналог AISI 316L).

Материалы и методы исследования

Эксперименты проводились на исследовательской установке лазерного нанесения металла, разработанной в ИПЛИТ РАН. Использовался порошок нержавеющей стали 07X18H12M2 (аналог AISI 316L) с гранулометрическим составом (40...100) мкм. Массовый расход поддерживался постоянным на уровне 7,8 г/мин. Образцы выращивались на подложках толщиной 6 мм из стали 08X18H10T (аналог AISI 321). Во всех экспериментах использовалась мощность лазера 400 Вт. В качестве защитного и подающего газа использовался азот. В режиме ЛП подача порошка не производилась, при этом защитный газ продолжал поступать.

Для каждого режима изготавливались многослойные полнотелые образцы объемом около 1 см³ каждый. По технологии ЛНМ были получены образцы при скоростях 5,8 мм/с; 8,3 мм/с; 10,8 мм/с, при этом для каждой скорости применялись варианты перекрытия соседних дорожек: 10 %; 25 %; 40 %. Затем для каждого набора параметров изготавливалась серия образцов по технологии ЛНМ+ЛП, в которой варьировалась скорость ЛП. Скорость ЛП устанавливалась пропорционально исходной скорости ЛНМ с коэффициентами: $\times 0,6$; $\times 0,8$; $\times 1,0$; $\times 2,3$; $\times 6,0$. Направление движения на стадии ЛНМ и ЛП сохранялось, траектория ЛП смещалась на полшага относительно траектории движения при формировании слоя на стадии ЛНМ. После изготовления образцы подверглись обрезке, запрессовке, шлифовке, полировке и травлению.

Обрезка проводилась в плоскости перпендикулярной направлению сканирования.

Результаты и их обсуждение

В зависимости от параметров процесса различаются характерные размеры на этапах ЛНМ и ЛП. Для этапа ЛНМ могут различаться высота формируемого валика, а также глубина проплавления предыдущего слоя. Для этапа ЛП изменяется только глубина проплавления. В результате, поскольку на этапе ЛП может не происходить полного переплавления материала, нанесенного на этапе ЛНМ, в итоговом материале могут оставаться области, которые формировались или на этапе ЛНМ или на этапе ЛП. Соотношение объемов таких областей может различаться и зависит от комбинации параметров на этапах ЛНМ и ЛП. Свойства материала в этих областях также могут быть разными, т. к. затвердевание происходит в различных термодинамических условиях. На изображении шлифа (рис. 1) видно, что характерный размер ячеек в области, затвердевшей при ЛП, значительно ниже. В результате материал образцов ЛНМ+ЛП при определенных технологических параметрах является слоистой структурой, в котором чередуются слои с разными свойствами, сформированные на этапах ЛНМ и ЛП (см. рис. 1).

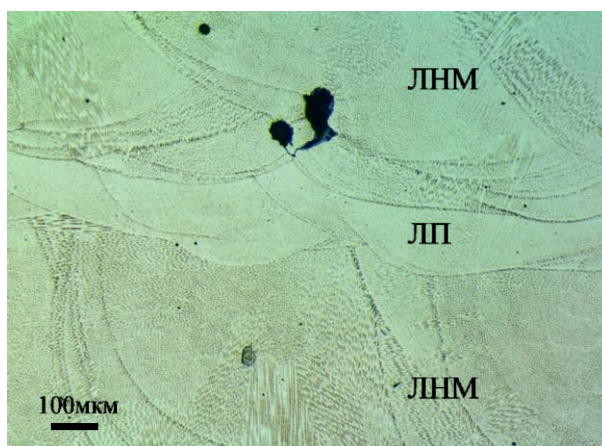


Рис. 1. Пример слоистой структуры, полученной в результате комбинированной технологии ЛНМ+ЛП

По полученным шлифам были определены глубины проплавления на этапах ЛНМ и ЛП, а также высота нанесенного слоя. Глубины проплавления на этапе ЛП приведены на рис. 2. На графике в отдельных вертикальных секциях даны данные, относящиеся к конкретному режиму ЛНМ. Внутри секций данные упорядочены по возрастанию скорости при ЛП. Вертикальная ось инвертирована, а за ноль принят уровень поверхности предыдущего слоя. Таким образом, положение точки на графике на уровне «0» обозначает, что на этапе ЛП был проплавлен весь нанесенный слой. Положение точек ниже уровня «0» обозначает, что также произошло заглубление в предыдущий слой. Такая ситуация возникает при использовании наиболее низких скоростей ЛП.

Для оценки объемов материала, сформировавшегося на разных этапах, был проведен расчет доли областей ЛП в материале. С учетом того, что на этапе ЛП

ванна расплава также может заглубляться в предыдущий слой, доля объема материала, затвердевшего на этапе ЛП, можно выразить как $r_{LR} = (c - h)/d$, где c – полная высота ванны ЛП; h – заглубление в предыдущий слой на этапе ЛНМ; d – высота слоя. На графике (рис. 3) представлены зависимости доли материала ЛП, в зависимости от параметров процесса. Обозначения режимов те же, что и на рис. 2. Если проплавление предыдущего слоя на этапе ЛНМ меньше, чем заглубление в предыдущий слой ЛП, то структура материала состоит из материала, затвердевшего на этапе ЛП ($r_{LR} = 1$). Это характерно для низких скоростей переплавления в сочетании с высокими скоростями нанесения, слои в этом случае пониженной высоты.

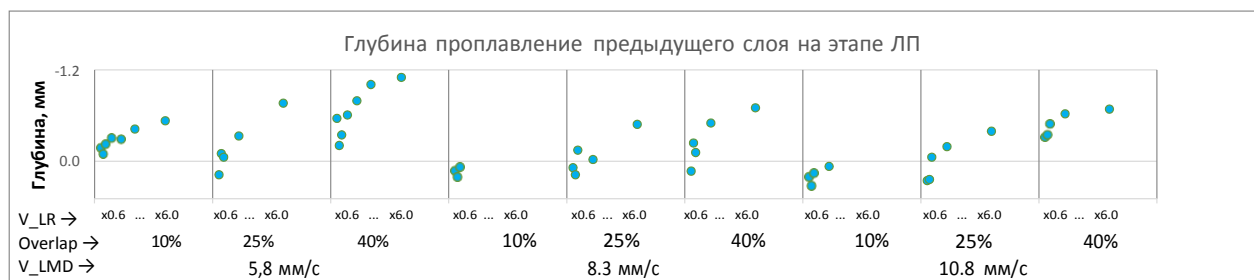


Рис. 2. Глубина проплавления предыдущего слоя на этапе ЛП в зависимости от параметров комбинированного процесса ЛНМ+ЛП. Вертикальная ось инвертирована. V_{LMD} – скорость сканирования при нанесении, V_{LR} – скорость сканирования при переплавлении, $Overlap$ – процент перекрытия соседних дорожек.

Итоговые интегральные характеристики материала (например, твердость или средний размер кристаллических ячеек) будут определяться их значениями в областях ЛП и ЛНМ, а также соотношением объемов соответствующих областей. Итоговые зависимости будут сложными, так как будут обусловлены взаимодействием двух факторов. С одной стороны, с повышением скорости ЛП свойства материала в переплавленной области всё сильнее отличаются от свойств исходного материала ЛНМ. С другой стороны – с ростом скорости ЛП толщина переплавленного слоя уменьшается (т. е. снижается доля материала, подвергнутого обработке) и, следовательно, снижается влияние свойств области ЛП на интегральные свойства материала.

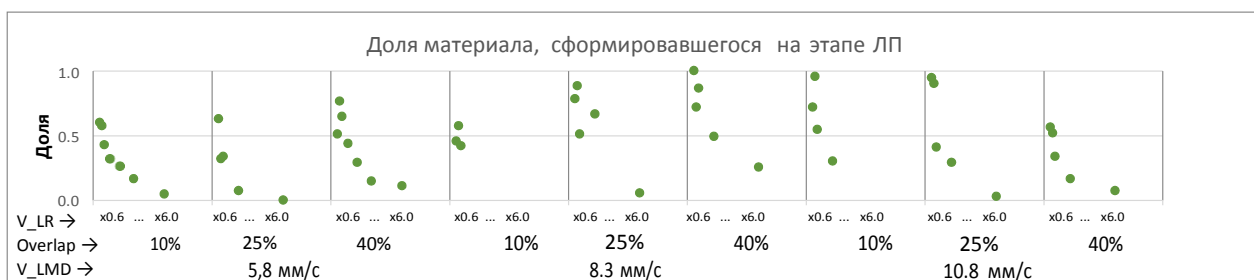


Рис. 3. Доля материала, сформировавшегося на этапе ЛП в зависимости от параметров комбинированного процесса ЛНМ+ЛП. Обозначения режимов те же, что и на рис. 2

В работе рассматривалась комбинированная технология лазерного нанесения металла и лазерного переплавления, при которой дополнительный этап лазерного переплавления осуществлялся после выращивания каждого слоя. Эксперименты проведены на исследовательской установке лазерного нанесения металла, разработанной в ИПЛИТ РАН, с использованием порошка нержавеющей стали 07X18H12M2. Был проведен анализ влияния различных комбинаций параметров процесса на этапах ЛНМ и ЛП на соотношение объемных долей материала, сформированных на этапе нанесения или этапе переплавления.

Полученные нами новые результаты демонстрируют эффективность применения подхода, позволяющего создавать материал слоистой структуры. Подход может использоваться при изготовлении функциональных изделий, для которых не предполагается использование термообработки, изменяющей структуру материала. За счет создания слоистой структуры, в которой чередуются слои с разными свойствами, сформированные на этапах ЛНМ и ЛП, такой материал может рассматриваться как композиционный и может обладать повышенными итоговыми свойствами.

Список использованных источников и литературы

1. Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties / P.Bajaj et al. //Materials Sci. and Eng.: A, 2020. – Vol. 772. – P. 138633.
2. Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials / D.Svetlizky et al. //Materials Science and Engineering: A. – 2022. – P. 142967.
3. Addressing the challenges in remanufacturing by laser-based material deposition techniques / A.Shrivastava, S.Mukherjee, S. S.Chakraborty //Optics & Laser Technology. – 2021. – Vol. 144. – P. 107404.
4. Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel / A.Yadollahi et al. //Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 644. – P. 171-183.
5. Functionally graded materials manufactured by direct energy deposition: a review / D. D Singh., A S.rjula, A. R. Reddy //Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 47. – P. 2450-2456.
6. Microstructure and mechanical characteristics of multi-layered materials composed of 316L stainless steel and ferritic steel produced by direct energy deposition/ D. K. Kim et al. //J. of Alloys and Compounds, 2019. – Vol. 774. – P. 896.
7. Investigation of remelting and preheating in SLM of 18Ni300 maraging steel as corrective and preventive measures for porosity reduction / A. G. Demir, B. Previtali //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 93. – P. 2697-2709.
8. Influence of laser remelting on surface topography and chemical component of K423A nickel-base superalloy/ Lu G. et al. // In:2015 Internat. Conf. on Materials, Environmental and Biological Engineering, Atlantis Press, 2015. – P. 246-249.

Сведения об авторах

Юрий Николаевич Завалов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИППИТ РАН- филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» (Россия, г. Шатура), 09645@mail.ru

Александр Владимирович Дубров, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИППИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» (г. Шатура, Россия), adubrov@laser.ru

Павел Сергеевич Родин, младший научный сотрудник ИППИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» (Россия, г. Шатура), prodin.tr10@gmail.com

Олег Игоревич Шаршов, инженер ИППИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» (Россия, г. Шатура), prodin.tr10@gmail.com

Максим Игоревич Банников, ведущий инженер ИППИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» (Россия, г. Шатура), maxim.bannikov@inbox.ru

Тепловые процессы при резании полимерного композиционного материала

В. Н. Тюкпиеков

В статье приведены исследования, связанные с определением температуры в зоне резания при механической обработке полимерного композиционного материала лезвийным инструментом. В расчетах учитываются свойства обрабатываемого и инструментального материалов, геометрия режущего инструмента, режимы резания.

Ключевые слова: композиционный материал, режущий инструмент, обработка резанием, температура в зоне резания.

Thermal process in machining polymer composite material

V. N. Tyukpiekov

This article deals with the identification of the thermal process in machining polymer composite material. The workpiece and cutting tool properties, cutting tool geometry, cutting modes take into account for analysis.

Keywords: polymer composite, cutting tool, machining process, temperature in cutting zone.

В настоящее время перспективы развития в машиностроении связываются с разработкой и широким применением композиционных материалов. Обработка резанием таких материалов обладает рядом особенностей, отличающих ее от аналогичной обработки металлов. Это объясняется особыми характерными свойствами и структурой обрабатываемого материала. В то же время процессу резания композиционных материалов сопутствуют те же явления, что и при резании металлов. В данной статье рассмотрены вопросы образования теплоты и их расход при обработке композитов. На основе критериальных уравнений получены распределение температур на поверхностях режущего инструмента и обрабатываемого материала.

Специфика свойства полимерного композиционного материала определяет и особенность тепловых явлений при его резании [3]. В отличие от металлов композит обладает низкой теплостойкостью. В зависимости от типа связующего теплостойкость данного материала составляет 200–300 °С. При температурах, выше указанных, начинаются интенсивная термодеструкция и разложение полимерного связующего. Это приводит к резкому ухудшению свойств материала, появлению прижогов и большого по величине дефектного слоя. Поэтому уровень температур в зоне резания должен быть значительно меньше, чем при обработке металлов.

В общем виде выделение теплоты в зоне резания можно выразить зависимостью

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{т.з.}},$$

где $Q_{\text{деф}}$ – теплота от упругой деформации срезаемого слоя; $Q_{\text{т.з.}}$ – теплота от трения обрабатываемой детали о заднюю поверхность.

Выделившаяся в зоне резания теплота расходуется между инструментом, стружкой, обрабатываемой деталью и окружающей средой [1], причем отвод теплоты в стружку и окружающую среду весьма малы и ими можно пренебречь, тогда

$$Q = Q_{\text{и}} + Q_{\text{д}},$$

где $Q_{\text{и}}$, $Q_{\text{д}}$ – количество теплоты, отводимое соответственно в инструмент, деталь.

Расходная часть теплового баланса при резании композиционного материала существенным образом отличается от аналогичной обработки металлов. Это объясняется тем, что теплопроводность в десятки раз меньше, чем у металлов поэтому основная доля выделившегося теплоты отводится инструментом.

Концентрация теплоты в инструменте приводит к значительному повышению температуры на его режущих кромках, что нельзя не учитывать при выборе инструментального материала, который должен интенсивно отводить выделяющуюся в зоне резания теплоту и оценке интенсивности изнашивания инструмента.

Для определения температуры в зоне резания и температурных полей на поверхностях инструмента и детали использовались критериальные уравнения, полученные на основе изучения тепловых явлений при резании материалов с помощью теории источников тепла и теории подобия [2].

Температура на режущей кромке инструмента:

$$\Theta_A = \frac{\sigma_p}{c\rho B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}},$$

где σ_p – разрушающее напряжение, Н/м²; c – удельная объемная теплоемкость

обрабатываемого материала, Дж/(м³·К); $Pe = \frac{va_1}{a}$ – критерий Пекле, характери-

зующий степень влияния режимов обработки по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала, в который в качестве определяющих

параметров входит толщина среза, м – a_1 ; скорость резания, м/с – v ; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ –

коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с; λ – ко-

эффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Дж/(м·К); $B = \operatorname{tg} \beta_1$ –

критерий, характеризующий степень упругой деформации срезаемого слоя; β_1 –

угол наклона плоскости скалывания; $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$ – интеграл вероятности.

Контактная температура на передней поверхности инструмента:

$$\Theta_{\Pi} = \Theta_A \left[a + \Psi \left(\frac{a_1}{x} \right)^{0,6} \right];$$

$$\text{где } \Psi_M = \frac{0,295 Pe^{0,625} B^{0,575}}{\Gamma^{0,25} D^{0,075} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}} (1 - \sin \gamma)^{1,3}}; \Gamma = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \varepsilon - \text{критерий, отражающий}$$

влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов; β – угол заострения, рад; ε – угол при вершине резца в плане, рад; λ_p – коэффициент теплопроводности инструментального материала, Дж/(м·К); $D = \frac{a_1}{b_1}$ – критерий, характеризующий влияние формы сечения среза; b_1 – ширина среза, м; γ – передний угол, рад; x – переменная линейная координата на передней поверхности.

Контактные температуры на задней поверхности инструмента:

$$\Theta_3 = \Theta_A \left[0,5 + 0,25 \frac{\sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{\frac{PeE}{h_3}} \frac{x}{h_3}} + 2,125 \Psi_N \sqrt{\frac{x}{h_3}} \left(1 - \frac{2x}{3h_3} \right) \right];$$

$$\text{где } \Psi_N = \frac{0,465 B^{1,275} Pe^{0,625} E^{0,55} \cos \alpha}{\Gamma^{0,25} D^{0,075} \sin^{0,275} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}}; E = \frac{\rho_1}{a_1} - \text{критерий, характеризующий}$$

относительную остроту режущих кромок; ρ_1 – радиус округления режущей кромки, м; α – задний угол резца, рад.

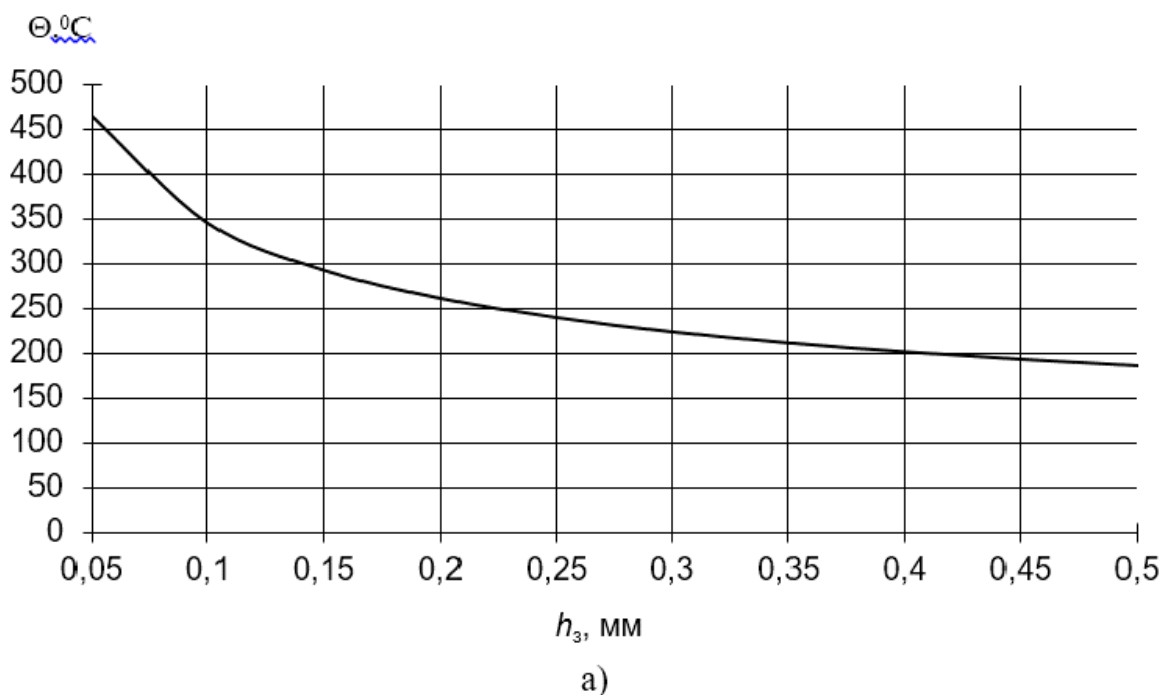
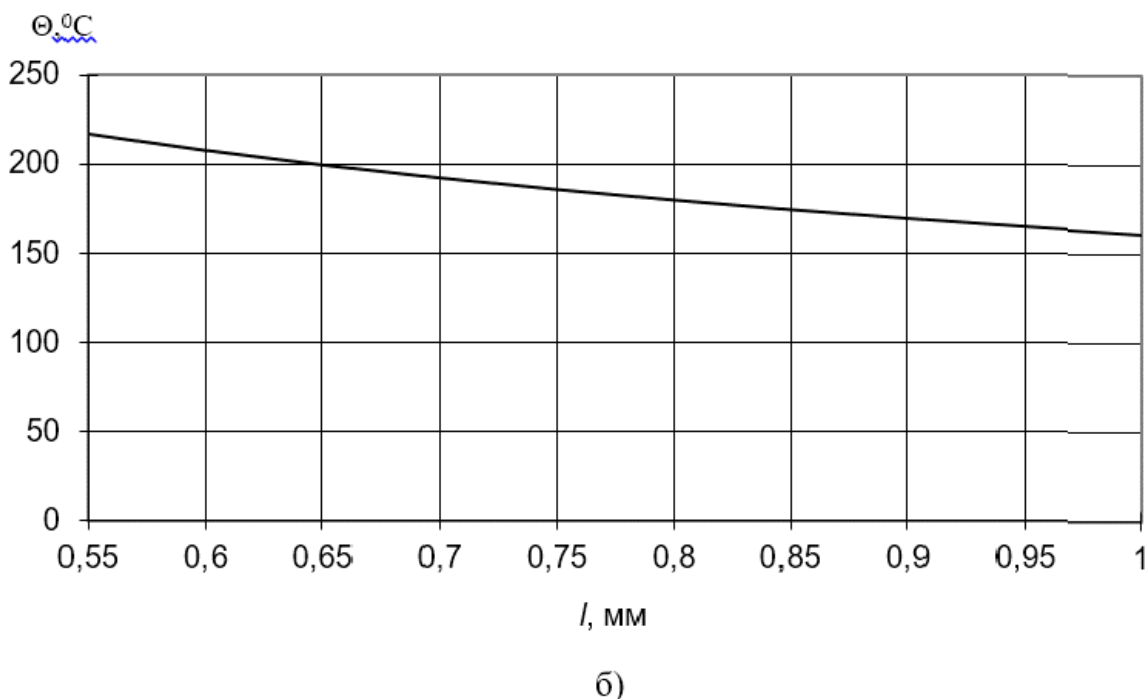
Температура на поверхности резания:

$$\frac{\Theta_{\Pi P}}{\Theta_A} = \frac{0,6 B^{0,3} Pe^{0,625} \cos^{0,4} \alpha \sin^{0,05} \alpha \frac{h_3}{a_1} \frac{x}{h_3}}{\Gamma^{0,1} E^{0,1} D^{0,3} \operatorname{erf}^{0,4} \sqrt{\frac{PeB}{4}} \sqrt{\frac{x}{h_3}}}.$$

Температура резания (среднеконтактная):

$$\Theta = \frac{0,95 \sigma_p E^{0,055} Pe^{0,375} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}}{c_p B^{0,625} \Gamma^{0,15} D^{0,045} (1 - \sin \gamma)^{0,65} \sin^{0,03} \alpha}.$$

Результаты расчетов температуры на поверхности обрабатываемого материала и на фаске износа режущего лезвия представлены на рисунке.



Результаты расчета распределений температуры: *a* – по фаске износа на задней поверхности инструмента; *б* – по поверхности обрабатываемого материала, режимы резания: $v=2,0$ м/с; $s=0,1$ мм/об; $t=0,2$ мм

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что при данных режимах резания на поверхности обрабатываемого материала наблюдаются следы выгорания полимерной связующей фазы.

Из анализа графиков следует, что основным фактором, ограничивающим производительность обработки, будет являться критическая температура поверхности обрабатываемого материала, выше которой, начинается термическое разрушение связующего.

Полученные расчетные зависимости для определения температуры в зоне резания, обусловленных тепловым воздействием на обрабатываемую заготовку и режущий инструмент, позволяют прогнозировать их величину на основе назначения режимов резания и выбора марки режущей части инструмента и ее геометрических параметров.

Список использованных источников и литературы

1. *Резников, А. Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. *Силин, С. С.* Метод подобия при резании материалов. – Москва : Машиностроение, 1979. – 152 с.
3. *Тюкпиеков, В. Н.* Повышение эффективности обработки синтетрана на основе физического и математического моделирования: специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : дисс. ... канд. техн. наук / Тюкпиеков Владимир Николаевич; Российский университет дружбы народов. – Москва, 2002. – 127 с.

Сведение об авторе

Владимир Николаевич Тюкпиеков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», Сарапульский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), tu9@mail.ru

Применение износостойких материалов из порошков керамики и М-кролей для изготовления уплотнений насосов

*Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, В. М. Асташинский, О. Г. Девойно,
В. В. Оковитый, А. А. Литвинко*

В статье рассмотрены вопросы износа деталей насосов и способы их ремонта с помощью нанесения износостойких плазменных покрытий на основе металлокерамики. Констатируется, что наиболее оптимальным в данном случае будет применение металлокерамических покрытий, в которых в металлической матрице, на никелевой основе, равномерно распределены керамики с добавлением твердой смазки. Данные покрытия с высокой износостойкостью формируют с использованием плазменного напыления с последующим применением высокоэнергетической обработкой с применением компрессионной плазмы или лазера.

Ключевые слова: торцевые уплотнения, процесс изнашивания, плазменные покрытия, антифрикционные материалы, твердость, износостойкость, прочность, модуль упругости, металлокерамические покрытия.

The use of wear-resistant materials from ceramic powders and M-crolls for the manufacture of pump seals

*F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, V. M. Astashinsky, O. G. Devoino,
V. V. Okovity, A. A. Litvinko*

The article deals with the issues of wear of pump parts and methods for their repair by applying wear-resistant plasma coatings based on cermet. It was stated that the most optimal in this case would be the use of metal-ceramic coatings, in which metal oxides are uniformly distributed in a nickel-based metal matrix with the addition of a solid lubricant. These high wear resistant coatings are formed using plasma spraying followed by high energy processing using compression plasma or laser.

Keywords: mechanical seals, wear process, plasma coatings, antifriction materials, hardness, wear resistance, strength, modulus of elasticity, cermet coatings.

В настоящее время все более широкое распространение в транспортных системах, автомобиле- и станкостроении, химической, пищевой, перерабатывающей и других областях промышленности получают пневмогидравлические устройства и приводы. Во всех случаях, когда речь идет о высокоточных автоматизированных станках и устройствах, особенно о системах, работающих при больших температурах, высоком давлении, в агрессивных средах конструкторы все чаще обращаются к гидравлическим приводам и гидропневматическим контрольным устройствам. Одним из главных условий успешной работы гидропривода является надежность уплотнения стыков, арматуры и взаимодейст-

вующих пар в быстродействующих кинематических системах. Официальные данные Федерального министерства исследований и технологии Германии свидетельствуют о том, что экономические потери от трения, износа и коррозии в индустриально развитых странах составляют около 4,5 % валового общественного продукта. Применительно к Германии это означает ежегодные потери сырья и энергии на сумму 65 млрд евро. Опросы специалистов показали, что в области уплотнительных устройств – сальниковых набивок, прокладок, контактных колец, торцевых уплотнений – успех товара на рынке определяется тремя факторами: ноу-хау материала, сроком службы уплотнения в данных условиях эксплуатации и качеством сервисного обслуживания. И лишь затем следуют ценовые соображения. Отсюда можно сделать вывод о тенденции к использованию современных, высококачественных и относительно дорогих уплотнений, выпускаемых надежными известными поставщиками.

Анализ условий работы торцевых уплотнений насосов

Торцевые уплотнения – наиболее прогрессивные и эффективные уплотняющие устройства вращающихся валов жидкостных насосов. Они имеют существенные преимущества перед сальниковыми уплотнениями, т. к. более долговечны, надежны и просты в обслуживании. Основные области применения торцевых уплотнений – энергетика, нефтехимия, машиностроение. В энергетическом комплексе Беларуси лишь 20 % насосного оборудования оснащены торцевыми уплотнениями, причем 100 % – импортными (Россия, Германия) [1, 2]. Нефтегазовое оборудование работает в исключительно тяжелых условиях комплексного нагружения, включающего высокие статические и динамические нагрузки, присутствие абразива и гидроабразива, содержащихся в продуктах сероводорода, наличия агрессивных сред, развитие коррозии и усталости металла [3–5]. Преждевременный отказ оборудования может привести к экологическому ущербу и загрязнению окружающей среды вследствие выброса нефтепродуктов или промывочных жидкостей. В нефтегазовом комплексе определено, что в среднем годовая стоимость ремонта оборудования равна 25 % его первоначальной стоимости. Для некоторых видов оборудования средства, расходуемые на его обслуживание в процессе работы, превышают в несколько раз первоначальную стоимость. Анализ причин отказов нефтегазопромыслового оборудования показывает, что подавляющее большинство аварийных ситуаций и выходов из строя оборудования происходит в результате изнашивания контактных поверхностей деталей [6]. Торцевые уплотнения насосов нефтеперерабатывающего производства работают как в режиме сухого трения (при запуске насоса), так в условиях гидроабразивного износа (в режиме перекачки жидкостных сред). Состав жидкостных сред по плотности и уровню pH может значительно изменяться в зависимости от типа перекачиваемого нефтепродукта и химического реагента, используемого при промывке системы. Отказы по торцевым уплотнениям происходят по причине попадания абразивных частиц в зазоры между трущимися поверхностями. Кроме того, обнаруживаются следы механического изнашивания вследствие явления механического схватывания при работе в режиме сухого трения. Анализ изнашивания сопряженных элементов в условиях граничного трения в жидкостных средах, содержащих свободный абразив [7, 8], позволяет сделать вывод, что наибольшему

гидроабразивному изнашиванию в контакте будет подвергаться поверхность материала, имеющего меньшую твердость. Это происходит вследствие того, что при соударении частиц абразива с металлической поверхностью вначале происходит его наклеп поверхности. Внедрение абразивных частиц в материал уплотнения сопровождается образованием дорожек скольжения и канавок, высота которых совпадает со средним размером абразивных частиц. Это в некоторой степени способствует изменению процесса фрикционного взаимодействия: из абразивного оно переходит в трение скольжения, и частично в гидроабразивное трение с элементами качения и скольжения крупных абразивных зерен в канавках и вне дорожки скольжения. По этой причине резко уменьшается интенсивность изнашивания металла, причем последнее наблюдается до тех пор, пока процесс гидроабразивной эрозии не приведет к удалению внедренных в поверхностный слой материала уплотнения абразивных частиц. Таким образом, в паре трения металл – уплотнительный элемент с твердостью ниже твердости металлической сопрягаемой поверхности, в первую очередь будет изнашиваться уплотнительный элемент.

Выбор составов износостойких материалов для изготовления уплотнений насосов

Из условий требования к покрытиям, форме и размерам детали очевидно, что наиболее оптимальным будет являться технология нанесения плазменных покрытий, так как нанесение газопламенных покрытий с последующим оплавлением приведет к поводам, что в свою очередь приведет к значительным затратам при проведении последующей механической обработки детали. При рассмотрении материалов для покрытий следует отметить, что покрытия из антифрикционных материалов на основе бронз и латуней имеют недостаточную твердость. Наибольшей износостойкостью обладают, как правило, материалы с высокой трещиностойкостью и прочностью, низким модулем упругости и коэффициентом Пуассона. По крайней мере половине этих критериев керамические материалы не отвечают. Представление об априорно высокой износостойкости керамики основано на данных по микротвердости керамики, но не учитывает влияния тангенциальных сил и неупругих деформаций. Коэффициент трения керамики при отсутствии смазки часто превышает 0,5. Наиболее сильный износ отмечается при чистом скольжении, значительной шероховатости покрытия, высоких скоростях, нагрузках и температурах. При разработке стратегий использования керамики для получения антифрикционных покрытий необходимо учитывать, что керамика не сможет работать без смазки [8]. Таким образом, учитывая, что в момент включения насоса покрытие может работать в условиях сухого трения, а в перекачиваемых жидкостях может присутствовать абразивный материал, то применение чисто цельнокерамических покрытий для данного случая является нецелесообразным.

Наши исследования направлены на изучение технологий формирования защитных износостойких покрытий для повышения показателей у эксплуатационных характеристик узлов и деталей, работающих при тяжелых нагрузках при наличии недостаточного количества смазки, значительных колебаниях температурных факторов [9, 10]. Для подобных условий наиболее приемлемы упрочненные плазменные износостойкие покрытия, имеющие в своей основе

металлокерамику, в которых в металлической матрице на никелевой основе равномерно распределены керамики с добавлением твердой смазки [11]. Указанные покрытия в последующем подвергают высокоэнергетической обработке импульсами компрессионной плазмы или лазерного излучения [12]. К показателям, от которых зависит износостойкость, относят состав композиционных порошковых частиц исходных материалов, формирующих необходимую структуру покрытий. Использование высокоэнергетической обработки плазменных покрытий дает добавочный импульс их упрочнению благодаря уплотнению с формированием измельченной структуры за счет моментального охлаждения оплавленных слоев (20–90 мкм) [12]. Для успешного внедрения таких покрытий необходимо подробнее изучить нюансы синтеза новых композиций порошков с применением керамики и создать критерии по прогнозированию свойств износостойких плазменных покрытий из них с исследованием и оптимизацией технологических параметров.

Разработка торцевых уплотнений насосов нефтеперерабатывающего производства, обладающих более высокими эксплуатационными характеристиками, по сравнению с используемыми, является важной и актуальной. Кроме того, разработка и внедрение технологии изготовления торцевых уплотнений позволит сократить поставки комплектующих по импорту.

Торцевые уплотнения насосов нефтеперерабатывающего производства работают как в режиме сухого трения (при запуске насоса), так в условиях гидроабразивного износа (в режиме перекачки жидкостных сред). Состав жидкостных сред по плотности и уровню pH может значительно изменяться в зависимости от типа перекачиваемого нефтепродукта и химического реагента, используемого при промывке системы. Отказы по торцевым уплотнениям происходят по причине попадания абразивных частиц в зазоры между трущимися поверхностями. Кроме того, обнаруживаются следы механического изнашивания вследствие явления механического схватывания при работе в режиме сухого трения.

На основе анализа используемых материалов для нанесения антифрикционных покрытий определено, что наиболее оптимальным является применение металлокерамических покрытий, в которых в металлической матрице на никелевой основе равномерно распределены керамики с добавлением твердой смазки.

Список использованных источников и литературы

1. Sealing devices // Zh. "Snabzhenets", No. 14 (366), 2003, pp. 8-11.
2. Dzhanakmedov A.Kh. / Tribological problems of oil and gas equipment. Zh. "Friction and wear", Gomel, IMMS ANB, volume 18 No. 2, .2011. pp.187-193.
3. Zaitsev A.L., Kirilenko V.P. On the relationship of the frictional properties of polymers with their structural and mechanical characteristics under boundary friction in the presence of a free abrasive //Zh. Materials, technologies, tools, Gomel, LLC "Infotribo", 2007, volume 2 No. 3. Pp. 46-51.
4. Gardos Michel N. Tribology of ceramics // Lubric Eng. 2008. V44, No. 5. R. 400-407.
5. Gaidarenko A.L., Borisova A.L. Structure and properties of powder materials nichrome-boron nitride for tribotechnical units // J. Powder metallurgy (Kyiv). 2000 No. 6. S. 47-51.

6. Kitaev F.I., Lekarev Yu.G. Properties of plasma composite coatings metal-solid lubricant // J. Powder metallurgy (Kyiv). 2001. No. 8. S. 91-95.
7. Kadyrov V.Kh., Shchepetov V.V. Antifriction detonation coatings // J. Mashinostroitel. 1999, No. 5. Pp. 33-34.
8. Paidassi Serge Trends in advanced solid lubricant coatings // J. Vide, couches minces. 2002, V.48, No. 261. P. 350-352.
8. Perspective materials and technologies / S.M. Aldoshin [and others]; ed. V.V. Rubanika.-Minsk: Ed. center of BSU, -2021.-658 p.
9. Panteleenko, F.I. Formation and study of multilayer composite plasma coatings based on M-rabbits and oxide ceramics with subsequent high-energy effects / Panteleenko F.I., Okovity V.A., Sidorov V.A., Okovity V.V., Devoino O.G., Volodko A.S., Astashinsky V.M., Uglov V.M. // International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and systems of mechanical engineering", DonNTU - Donetsk. - 2021. №2. - P. 68-83.
10. Panteleenko, F.I. Modern application of ceramic-metal coatings based on metal-chromium-aluminum-yttrium (M-rabbit) systems / Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Sidorov V.A., Okovity V.V., Volodko A.V., Astashinsky V.M. // International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and systems of mechanical engineering", DonNTU - Donetsk. - 2021. No. 3. - S. 72-81.
11. Panteleenko, F.I. Formation and study of multilayer composite plasma coatings / Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Okovity V.V., Astashinsky V.M., V.V. Uglov, V.I. // Bulletin of the Gomel State Technical University. № 2. 2021. S. 15-27.
12. Panteleenko, F.I. Overview of the modern application of ceramic-metal coatings / Panteleenko F.I., Okovity V.A., Sidorov V.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M. // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. No. 3.2021. Pp. 5-17.

Сведения об авторах

Федор Иванович Пантелеенко, доктор технических наук, профессор, член-корр. НАН Б заведующий кафедрой «ПМС и ТМ», Белорусский национальный технический университет (Республика Белоруссия, г. Минск), Panteleyenkovfi@tut.by

Вячеслав Александрович Оковитый, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИИЛ СРТиНК, Белорусский Национальный Технический Университет (Республика Белоруссия, г. Минск), vasil_ok@inbox.ru

Олег Георгиевич Девоино, доктор технических наук, профессор, заведующий ОНИЛ ПиЛТ, Белорусский национальный технический университет (Республика Белоруссия, г. Минск), plazteh@bntu.by

Артем Анатольевич Литвинко, научный сотрудник НИИЛ СРТиНК, Белорусский национальный технический университет (Республика Белоруссия, г. Минск), niil_svarka@bntu.by

Василий Вячеславович Оковитый, научный сотрудник НИИЛСРТиНК, Белорусский национальный технический университет (Республика Белоруссия, г. Минск), vasil_ok@inbox.ru

Валентин Миронович Асташинский, доктор технических наук, профессор, член-корр. НАН Б, заместитель директора по научной и инновационной работе Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, НАН Беларуси (Республика Белоруссия, г. Минск), ast@hmti.ac.by

**Экспериментальное исследование качества поверхности
после удаления окалина с поверхности деталей цилиндрической формы
свободными абразивами**

А. В. Логвиненко

Проведено экспериментальное исследование качества поверхности после удаления окалина с поверхности деталей цилиндрической формы свободными абразивами. Получены результаты после вибрационной обработки сухим способом и мокрым способом.

Ключевые слова: окалина, вибрационный сухой способ, вибрационный мокрый способ, качество поверхности.

**Experimental study of surface quality after removing scale from the surface
of cylindrical parts with free abrasives**

A. V. Logvinenko

An experimental study of surface quality was carried out after removing scale from the surface of cylindrical parts using free abrasives. The results were obtained after vibration treatment using the dry method and the wet method.

Keywords: scale, vibration dry method, vibration wet method, surface quality.

Целью проведения экспериментального исследования является выявление наиболее производительного метода очистки поверхности деталей цилиндрической формы свободным абразивом.

Для проведения экспериментального исследования была разработана методика, которую можно разделить на несколько этапов.

1. Изготовление исследуемых образцов.
2. Проведение вибрационной обработки сухим способом.
3. Проведение вибрационной обработки мокрым способом.
4. Выбор метода исследования результатов обработки.
5. Обработка результатов исследования.

Изготовление исследуемых образцов

На первом этапе экспериментального исследования было подготовлено 8 образцов деталей. 4 образца для вибрационной обработки сухим способом и 4 образца для вибрационной обработки мокрым способом.

Подготовка образцов заключалась в отрезке трубы из материала 30ХГСА ТУ14-3-730-78 диаметром 10 мм, с толщиной стенки 1,2 мм и длиной 150 мм. Далее образцы были подвергнуты закалке с выдержкой при $t=(890\pm 10)^\circ$ в течение 12 минут в шахтной электрической печи и охлаждением в баке с раствором жидкого стекла в вертикальном положении в течение 3–5 с.

В результате проведенной термической обработки твердость поверхности имеет значение от 47,5 до 51,5 единиц (рис. 1). Технические характеристики исследуемых образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики исследуемых образцов

Наименование	Значение
1. Диаметр	10 мм
2. Длина	150 мм
3. Материал	Труба В 10Х1.2Х 30ХГСА ТУ14-3-730-78
4. Твердость	47,5 ... 51,5 HRC
5. Шероховатость поверхности	Ra2,4



Рис. 1. Исследуемые образцы после термической обработки

Проведение вибрационной обработки сухим способом

Вторым этапом экспериментального исследования являлась вибрационная обработка сухим способом (рис. 2). Для проведения данного этапа в качестве оборудования использовалась вибрационная установка. Она состоит из трех двигателей, монтируемых на нижней плите станины, трех приводных головок и столика, устанавливаемого на плите. Столик закреплен на спиральных пружинах, получает колебательные движения в трех взаимно перпендикулярных направлениях через тяги от приводных головок.

В качестве расходного материала для выполнения вибрационной обработки применялся абразивный бой. Для поглощения частиц металла, окалины и прочих загрязнений в ванну вибрационной установки в небольшом количестве были добавлены опилки, которые также являются полировочным материалом в процессе сухой вибрационной обработки [3].

После того как было подготовлено оборудование и материалы для экспериментальных исследований, был начат этап непосредственной обработки исследуемых образцов.

Все четыре образца поместили в ванну вибрационной установки. Далее через каждые два часа вынимался один образец из ванны и отправлялся на измерение шероховатости поверхности. Таким образом, последний исследуемый образец был вынут из ванны только через 8 часов после начала экспериментального исследования.

В качестве промежуточного результата экспериментального исследования установлено, что при обработке детали в течение 2 часов и 4 часов с поверхности деталей окончательно не удаляются ликвиды.



Рис.2. Исследуемые образцы после вибрационной сухой обработки

Проведение вибрационной обработки мокрым способом

На третьем этапе экспериментального исследования была проведена вибрационная обработка мокрым способом (рис. 3).

Для проведения экспериментального исследования вибрационным мокрым способом в качестве оборудования использовалась вибрационная машина HUMO XZG (A) 500. Она предназначена для широкого спектра операций от шлифовки до финишной полировки (в зависимости от выбранного наполнителя). Наилучшим образом подходит для обработки удлиненных изделий до 1200 мм в длину [4].

Для подачи рабочей жидкости использовался насос перистальтический с процессорным управлением ХД/НПП – 100. Он предназначен для высокоточной дозированной перекачки (подачи) жидкостей, при различных технологических процессах [4].

В качестве наполнителя для вибрационной обработки был применен наполнитель АСТ FC 15×15. Он применяется для агрессивной мокрой шлифовки различных металлов (сталь, титан, чугун) в барабанных, вибрационных и роторных галтовках [4].

В качестве рабочей жидкости применялся компаунд марки OTEC SC 25. Компаунд марки OTEC SC 25 отлично подходит для шлифования изделий с фарфоровыми, пластиковыми и керамическими наполнителями, в вибрационных машинах любого типа. В своем химическом составе имеет блокообразующие и осветляющие компоненты [1].

Так же, как и на втором этапе, после того как было подготовлено оборудование и материалы для экспериментальных исследований, был начат этап непосредственной обработки исследуемых образцов.



Рис. 3. Исследуемые образцы после вибрационной мокрой обработки

Оставшиеся ранее подготовленные четыре образца поместили в ванну вибрационной установки и через насос начали подавать рабочую жидкость.

Далее через каждые два часа вынимался один образец из ванны и отправлялся на измерение шероховатости поверхности. Таким образом, последний исследуемый образец был вынут из ванны только через 8 часов после начала экспериментального исследования.

В качестве промежуточного результата можно принять тот факт, что уже после 2 часов обработки с поверхности деталей окончательно удаляются все ликвиды. Поверхность деталей приобретает ровный серебристый цвет.

Выбор метода исследования результатов обработки

Для определения количественных результатов экспериментальных исследований выбран метод измерения шероховатости с помощью портативного профилометра MARSURF PS10.

Данный прибор предназначен для измерения параметров шероховатости поверхности изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию [2].

Принцип работы прибора основан на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой. Механические колебания, возникающие в процессе измерения, преобразуются в напряжения, пропорциональные этим колебаниям, которые усиливаются и преобразуются в микропроцессоре. Результаты измерений выводятся на жидкокристаллический дисплей в виде профилограммы и числовых значений параметров шероховатости.

Профилометр MARSURF PS10 состоит из базового блока. Механизм подачи имеет цилиндрическую форму и интегрирован в призматическую опору, что позволяет выполнять измерения в любом положении (рис. 4).

Питание прибора осуществляется от сети или от батареи [2].

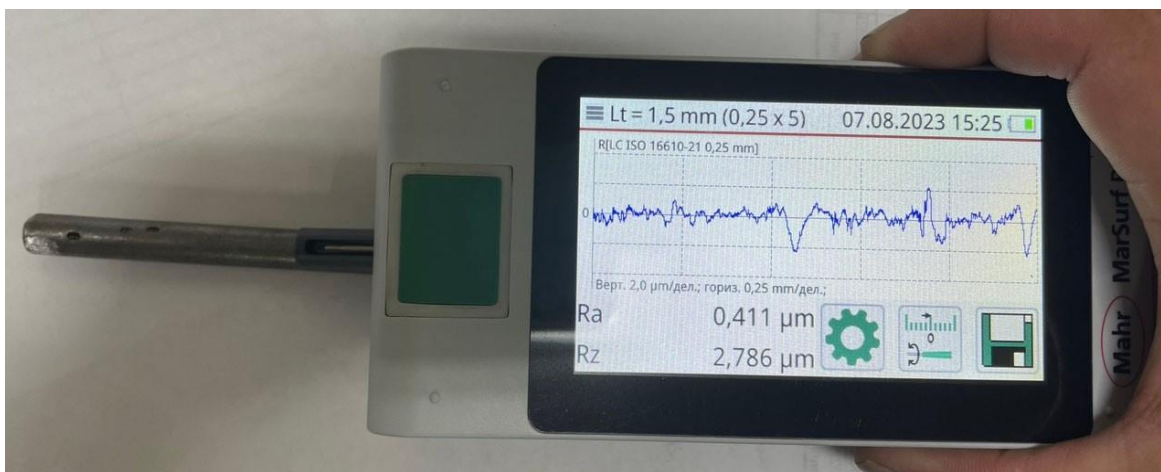


Рис. 4. Прибор MARSURF PS10 в рабочем состоянии

Результаты исследования

После вибрационной обработки сухим способом и измерения шероховатости были получены следующие данные (табл. 2).

Таблица 2. Данные замеров шероховатости Ra образцов после вибрационной обработки сухим способом

Продолжительность обработки	Номер измерения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2 часа	2,50	2,05	1,73	2,26	1,84	1,58	1,71	2,15	1,59	2,45
4 часа	2,70	1,88	1,66	1,81	1,84	2,28	2,16	1,66	1,57	1,84
6 часов	1,6	2,5	2,3	1,68	1,75	1,8	1,63	2,1	1,7	1,78
8 часов	1,75	1,80	2,50	1,20	1,90	1,50	1,57	1,46	1,58	1,98

На основании данных табл. 2 вычисляют математическое ожидание и дисперсию.

Расчет математического ожидания производят по формуле [1]:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n a[i]}{n}, \quad (1)$$

где $a[i]$ – элемент выборки; n – объем выборки.

Математическое ожидание для вибрационной обработки в течение 2 часов равно 1,99 мкм, в течение 4 часов равно 1,94 мкм, в течение 6 часов – 1,88 мкм, в течение 8 часов равно 1,72 мкм.

Расчет дисперсии производят согласно формуле

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (a[i] - M)^2}{n - 1}, \quad (2)$$

где M – математическое ожидание; $a[i]$ – элемент выборки; n – объем выборки.

Дисперсия для вибрационной обработки сухим способом в течение 2 часов равняется 0,12. Для вибрационной обработки сухим способом в течение 4 ч, 6 ч, 8 ч равно 0,12; 0,1; 0,13 соответственно.

После вибрационной обработки мокрым способом и измерения шероховатости были получены следующие данные (табл. 3).

Таблица 3. Данные замеров шероховатости Ra образцов после вибрационной мокрой обработки

Продолжительность обработки	Номер измерения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2 часа	0,45	0,40	0,42	0,74	0,54	0,42	0,40	0,51	0,43	0,38
4 часа	0,46	0,40	0,46	0,52	0,47	0,39	0,49	0,4	0,49	0,51
6 часов	0,43	0,52	0,50	0,40	0,38	0,44	0,44	0,39	0,38	0,61
8 часов	0,34	0,42	0,48	0,44	0,33	0,44	0,42	0,41	0,47	0,43

На основании данных табл. 3 вычисляют математическое ожидание и дисперсию по формулам (1) и (2).

Математическое ожидание при вибрационной обработке в течение 2, 4, 6, 8 ч равно 0,47 мкм, 0,46 мкм, 0,45 мкм, 0,42 мкм соответственно.

Дисперсия для вибрационной обработки сухим способом в течение 2 часов равняется 0,012. Для вибрационной обработки сухим способом в течение 4, 6, 8 ч равно 0,002; 0,006; 0,002 соответственно.

По полученным расчетам математического ожидания стоят график зависимости времени обработки на шероховатость поверхности деталей.

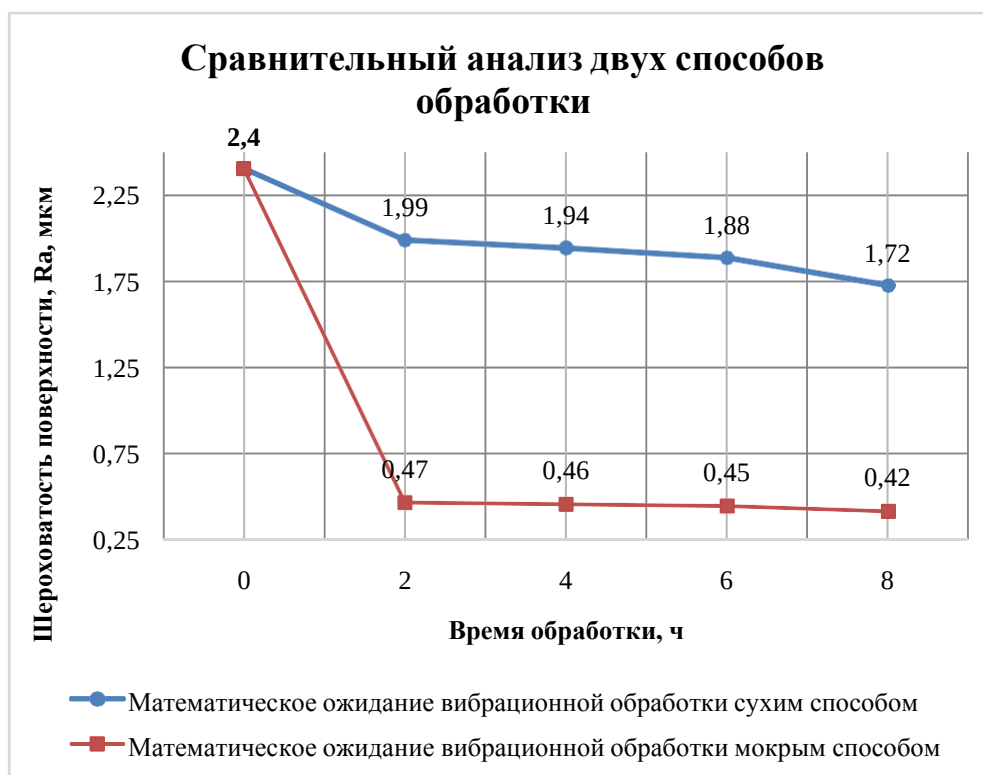


Рис. 5. График зависимости времени обработки на шероховатость поверхности деталей

Начальная шероховатость поверхности образцов после закалки равняется 2,4 мкм. По графику зависимости времени обработки на шероховатость поверхности образцов наблюдается, что при обработке вибрационным сухим способом самое большое снижение шероховатости отмечается при обработке в течение первых двух часов. Шероховатость поверхности на этом временном отрезке снизилась в 1,2 раза со значения 2,4 мкм до 1,99 мкм.

При дальнейшей обработке образцов происходит незначительное снижение шероховатости, и самое минимальное значение шероховатости поверхности имеет образец, который подвергался обработке в течение 8 часов.

Так же стоит отметить, что после обработки в течение 2 и 4 часов с поверхности деталей окончательно не удаляются ликвиды и следы от окалины.

Далее, проанализировав рис. 5, наблюдаем, что при вибрационной обработке мокрым способом, так же, как и в предыдущем методе, наибольшее снижение шероховатости выделяется в течение первых двух часов. Шероховатость поверхности образцов в этом периоде снизилась в 5,1 раза и приобрела значения с 2,4 до 0,47 мкм. При этом дальнейшая обработка образцов является малоэффективной и экономически не выгодной.

Таким образом, проведя экспериментальное исследование 4 образцов, подвергаемых вибрационной обработке сухим и мокрым способом, приходят к выводу, что наиболее производительным методом очистки поверхности деталей цилиндрической формы свободным абразивом является вибрационная обработка мокрым способом.

При обработке сухим способом шероховатость поверхности образцов снижается в целом на 1,4 раза со значения 2,4 мкм до 1,72 мкм, т. е. шероховатости повышается с 5-го класса до 6-го класса в течение 120 мин.

При обработке вибрационным мокрым способом шероховатость поверхности образцов в течение 8 часов снизилась в 5,7 раза со значения 2,4 до 0,42 мкм. Шероховатость при этом повышается с 5-го класса до 8-го класса в течение 120 мин.

Список использованных источников

1. *Павлюкова, Н.Л.* Повышение эффективности отделочной обработки художественных изделий из медных сплавов свободными абразивами / Н.Л. Павлюкова, В. А. Полетаев, М.Ю. Волкова. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2010. – 100 с.
2. *Очистка изделий в машиностроении* / Ю. С. Козлов, О. К. Кузнецов, А. Ф. Тельнов. – Москва : Машиностроение, 1982. – 264 с.
3. *Кулаков, Ю. М.* Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрельков. – Москва : Машиностроение, 1979. – 216 с.
4. *Бабичев, А. П.* Вибрационная обработка деталей : монография. – Москва : Машиностроение, 1974. – 136 с.

Сведения об авторах

Алена Васильевна Логвиненко, магистрант кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова» (Россия, г. Сарапул), Ale.Mol4anowa@mail.ru

Обзор и критический анализ методов удаления окалина с поверхности деталей цилиндрической формы свободными абразивами

А. В. Логвиненко

Проведен обзор и критический анализ методов удаления окалина с помощью свободных абразивов. Выделены достоинства и недостатки галтовочного, вибрационного и центробежно-ротационного методов очистки поверхности деталей.

Ключевые слова: окалина, галтовочный метод очистки, вибрационный метод очистки, центробежно-ротационный способ, качество поверхности.

Review and critical analysis of methods for doubling scale from the surface of cylindrical parts with free abrasives

A. V. Logvinenko

A review and critical analysis of descaling methods has been carried out the power of free abrasives. The advantages and disadvantages of tumbling cleaning, vibration and centrifugal-rotational cleaning methods details.

Keywords: Scale, tumbling cleaning method, vibration cleaning method, centrifugal-rotational method, surface quality

В процессе изготовления, механической обработки и хранения различных деталей и сборочных единиц на их поверхности возникают загрязнения в виде посторонних веществ, наличие которых на поверхности нежелательно, а зачастую и вредно [1].

К причинам образования загрязнений можно отнести:

- окисление поверхности металлов – окислы и продукты коррозии;
- термическое разложение масел – нагары, асфальтосмолистые отложения;
- эмульсионные и масляные пленки, которые в процессе производства были некачественно удалены;
- различные механические частицы, такие как абразив, стружка, заусенцы, остатки шлифовальных и полировальных паст;
- остатки от обработки давлением и литья, например, графитные и жировые смазки, пригары, формовочная земля.
- остатки после процесса сварки и пайки - остатки флюса, окалина;
- образования, возникающие в момент хранения и транспортирования;
- попадание загрязнений из окружающей среды и др. [1].

При формообразовании деталей такими методами, как штампование, прессование, литье,ковка и др., поверхность и кромки деталей могут приобретать излишки материалов, которые в свою очередь, вызывают нарушение формы

и точности обработанных поверхностей деталей. Такие излишки материалов в обязательном порядке должны быть ликвидированы, поэтому их называют ликвидами. К ликвидам относятся: грат, облой, заусенцы, окалины, пригары, шаржированные частицы [3].

Ликвидировать их можно несколькими способами. Например, методом абразивной обработки, закрепленным абразивом (шлифование, хонингование и т. д.) и методом абразивной обработки свободными абразивами [3].

Обработка свободными абразивами отличается от закрепленного абразива тем, что инструмент не имеет механической связи со станком. Достоинствами такого метода является высокая производительность, высокое качество обработанной поверхности деталей сложной конфигурации из различных материалов, простота конструкции оборудования [1].

В данной статье будут рассматриваться наиболее интересные методы очистки поверхностей свободными абразивами.

Галтовочный метод обработки деталей

Метод обработки заготовок и деталей сыпучими или жидкими абразивными материалами в специальных емкостях, которые подвержены вращению или вибрации называется галтовка. Этот метод получил широкое распространение в промышленности, за счет простоты конструкции устройства для обработки и возможностью обработки широкой номенклатуры деталей [2].

Непосредственно галтовочный метод разделяется на два вида: сухая галтовка и мокрая галтовка.

Первой разновидностью галтовки, при которой используются только сухие галтовочные тела, без добавления водного раствора компаунда является сухая галтовка.

Технологический процесс сухой галтовки начинается с размещения деталей и абразивного материала внутрь специального оборудования. Далее происходит воздействие на поверхность деталей сыпучего абразивного материала за счет вращения и вибрации. Такой процесс предусматривает шлифование, удаление различных неровностей и заусениц, скругление острых кромок. Основное предназначение, которое несет в себе этот вид галтовки, – это ускорение процесса шлифования из-за добавления в барабан машины вместе с деталями абразивных материалов.

Абразивный материал является инструментом при галтовочном методе обработки. К ним относят крошка и обломки абразивных кругов, абразив в гранулах, шлифовальные зерна и порошки, металлические наполнители, такие как стальные полировочные шары и неметаллические наполнители в виде деревянных шаров и кубиках, обрезки кожи, войлока разной формы и размеров.

Для наилучшего поглощения масла, образовавшейся измельченной окалины и пыли в галтовочное оборудование вместе с деталями и абразивом добавляют древесные опилки [2].

При подготовке оборудования к рабочему циклу допускается заполнять объем барабана материалами и деталями до 80 %. Продолжительность цикла обработки – в зависимости от конфигурации деталей и толщины окалины.

Соотношение объемов компонентов должно составлять 80–85 % для деталей и 15–20 % опилок. Частота вращения барабана при этом должна быть 30–50 об/мин [2].

Вследствие выше сказанного продолжительность операции галтовки составляет от 4,5 до 47 часов. При этом стоит отметить, что производительность галтовочного метода все-таки от двух до тридцати раз выше, чем механизированного крацовочного метода, при котором удаление заусенцев и обработка поверхностей происходит вращающимися металлическими щетками абразивного ленточного и абразивного струйного методов [2].

Способы обработки сухой галтовки разнообразны, но зачастую в основе лежит вращение цилиндрических или многогранных барабанов вокруг вертикальной, горизонтальной или наклонной осей с загруженными в них деталями и обрабатывающей средой (рис.1).

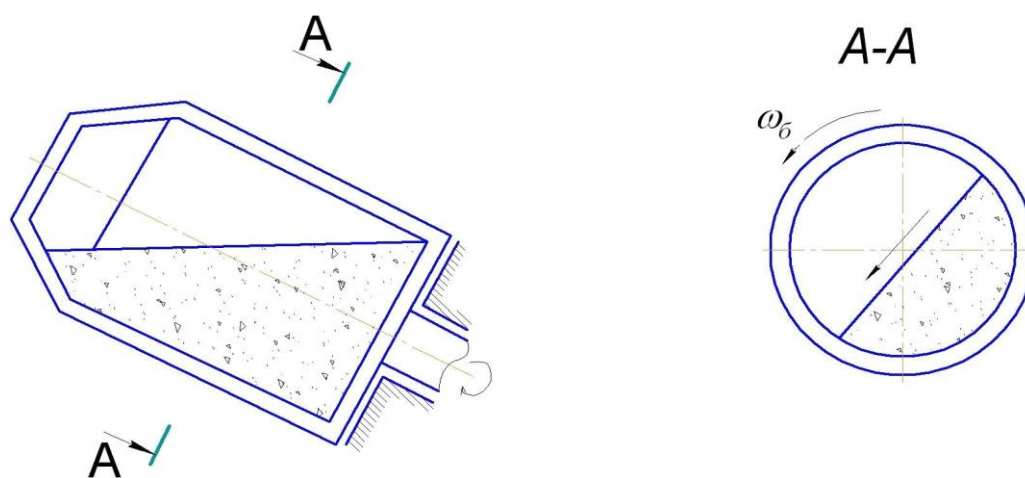


Рис.1. Схема обработки деталей в галтовочном барабане

Вторым видом галтовочного метода выделяют мокрую галтовку. Она представляет собой способ обработки металлов галтовкой с добавлением буферного раствора или компаунда.

Технологический процесс мокрой галтовки можно описать следующим образом. Рабочую область наполняют специальным буферным раствором, который может состоять из галтовочного компаунда, разведенный с водой в рекомендуемых пропорциях от производителя. Далее галтовочный барабан наполняют абразивными материалами и помещают обрабатываемые детали [4]. В конце так же, как и при сухой галтовке, происходит воздействие на поверхность деталей абразивного материала за счет вращения и вибрации.

Метод мокрой галтовки рекомендовано применять на металлических изделиях, натуральном камне, пластмассовых, резиновых, стеклянных материалах. При обработке некоторых типов материалов мокрая галтовка является строго рекомендуемой.

Качество очистки деталей от окалины по способу мокрой галтовки настолько высоко, что во многих случаях она может полностью исключить дорогую и трудоемкую последующую механическую обработку [4].

Таким образом, при галтовочном методе обработки деталей можно выделить следующие достоинства и недостатки.

За счет того, что при сухой галтовке величина контактного пятна шлифовального материала на поверхность деталей невелика, снятие металла практически минимальное, следовательно, размерные характеристики деталей остаются практически неизменными [4].

Достоинствами мокрой галтовки является возможность добиться высокого класса чистоты обрабатываемых поверхностей за счёт смыва с неё твёрдых диспергированных частиц и загрязнений, образующихся в процессе обработки.

Недостатками в обоих видах галтовки выделяют то, что эффективно обрабатываются преимущественно наружные поверхности деталей, а следовательно, обработка внутренних поверхностей становится затруднительной.

Низкая производительность процесса сухой галтовки, так как частицы наполнителя при падении свободно скользят по поверхности деталей, но этот недостаток преобразовывается в достоинство, когда в галтовочный барабан размещают большое количество деталей.

Вибрационный метод обработки деталей

Ко второму методу обработки деталей свободным абразивом с соударением частиц относят метод вибрационной обработки. Физический смысл такого метода заключается в последовательном нанесении на поверхность обрабатываемых деталей большого числа микроударов гранулами абразивного материала под действием возникающих вибраций в рабочей камере [6].

Благодаря механическому или механохимическому тонкому измельчению твердых мельчайших частиц металла производится снятие металла и его окислов с обрабатываемой поверхности абразивным материалом.

Схема вибрационной обработки приведена на рис. 2.

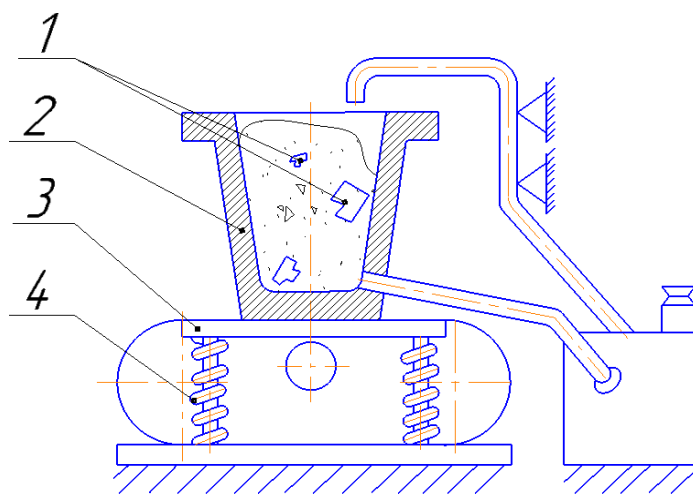


Рис. 2. Схема вибрационной обработки деталей:
1 – деталь; 2 – рабочая камера; 3 – основание; 4 – пружины

Типовая компоновка вибрационного оборудования состоит из рабочей камеры 2 и основания 3, установленного на пружинах 4 вибропривода.

Технологический процесс вибрационной обработки деталей происходит следующим образом [6].

В рабочую камеру 2, установленную на основание 3, загружают абразивный материал и детали, которые необходимо обработать 1. Вибрационный привод передает рабочей камере колебательное движение с частотой от 14 до 49 Гц и амплитудой от 0,6 до 8 мм. Создающаяся вибрация приводит рабочую загрузку в интенсивное относительное перемещение, совершая при этом два вида движений: осциллирующее и медленное вращение массива загрузки, так называемое циркуляционное движение.

В ходе выполнения технологического процесса обработки детали изменяют свое месторасположение и проходят различные зоны рабочей камеры, что, в свою очередь, обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей. Для достижения наилучших показателей чистоты поверхности и снижения трудоемкости изготовления в процессе обработки рекомендуется подавать в рабочую камеру технологическую жидкость [6].

В зависимости от требований к качеству поверхности могут применяться абразивные шлифовальные материалы различных характеристик, а также металлические и неметаллические полирующие материалы различной формы и размеров.

На интенсивность виброобработки влияют следующие факторы:

- амплитуда A и частоты f колебаний рабочей камеры;
- длительности цикла обработки;
- характеристики и размеров гранул шлифовального материала;
- объем рабочей камеры и степени ее заполнения;
- механические свойства материала обрабатываемых деталей.

Скорости гранул шлифовального материала могут достигать от 0,3 до 1 м/с, при этом ускорения составляют от 20 до 150 м/с², а силы микроударов от 1,5 до 30 Н.

При вибрационной обработке происходит многократно повторяющиеся микроудары гранул шлифовального материала на детали, которые вызывают изменение геометрических и физико-механических параметров поверхностного слоя, например повышение чистоты шероховатости, упрочнение твердости детали, появление остаточных напряжений и улучшение микроструктуры деталей.

Таким образом, при вибрационном методе обработки можно выделить следующие достоинства и недостатки.

За счет того, что в процессе обработки детали изменяют свое месторасположение и проходят различные зоны в рабочей камере, это позволяет получить достаточно равномерную обработку всех поверхностей.

Благодаря многократно повторяющимся микроударам гранул шлифовального материала на детали происходит изменение геометрических и физико-механических параметров поверхностного слоя, которые в дальнейшем могут негативно влиять на дальнейшую работу детали в изделии.

Центробежно-ротационная обработка поверхностей деталей

К третьему методу обработки свободным абразивом с соударением частиц относят центробежно-ротационный метод.

С целью увеличения пятна контакта, качественных и количественных характеристик обработанных поверхностей деталей допустимо применять центробежные силы. Такая сила прижимает гранулы абразивного материала к поверхностям обрабатываемых деталей [5].

Основой центробежно-ротационной обработки является образование тороидального потока абразивного материала на цилиндрической поверхности неподвижной камеры при вращении ротора в виде тарелки с коническими стенками [5].

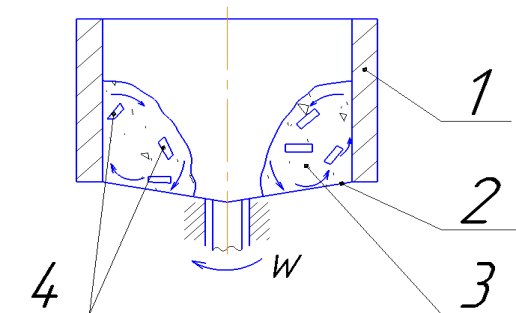


Рис. 3. Схема центробежно-ротационной обработки деталей в свободном состоянии

Типовая компоновка центробежно-ротационного оборудования состоит из рабочей камеры 1 с коническим дном 2, которая выполнена в виде ротора. Такая камера вращается вокруг оси из-за установленных подшипников на оси [5].

Технологический процесс обработки центробежно-ротационной обработки заключается в следующем. В камеру 1 загружают абразивный материал 3 и детали 4, которые необходимо подвергнуть обработке.

Включают вращение ротора. Возникает вращательное движение вокруг вертикальной оси, и масса с абразивным материалом и деталями за счет возникновения центробежных сил уплотняется. Рабочая масса, поднимаясь по неподвижной стенке цилиндрической камеры 1, приобретает тороидальную форму. Вследствие этого масса рабочей загрузки перемещается с высокой скоростью по спиральной траектории. Стоит отметить, что у стенок рабочей камеры скорость перемещения деталей и абразивного материала снижается, и вся масса рабочей загрузки вновь опускается к центру ротора. Далее процесс повторяется. При обработке деталей происходит непрерывная подача специальной технологической жидкости через насос [5].

Физический смысл обработки деталей можно объяснить тем, что из-за их перемещения происходит контакт абразива с обрабатываемой поверхностью, т. к. детали и гранулы абразивного материала находятся в постоянном движении с различными скоростями движения.

При сравнении обработки вибрационным методом и центробежно-ротационной стоит отметить, что из-за большего давления, возникающего в рабочей массе последнего, производительность обработки в 6...9 раз выше [5].

Угловая скорость вращения ротора находится в пределах от 5 до 35 рад/с. Для эффективного очищения поверхности деталей объем загрузки не должен превышать 0,51..0,72 от общего объема камеры [5].

Недостатком центробежно-роторной обработки можно выделить ограничения номенклатуры обрабатываемых деталей и грануляцию абразивного материала.

Объясняется это тем, что в тороидально-винтовом потоке возникают достаточно высокие скорости и давление, которые могут деформировать мелкие детали. При этом размеры гранул абразивного материала не должны быть меньше 4...5 мм.

По теоретическим данным достоинством центробежно-ротационной обработки является ее производительность. В некоторых источниках указано, что такой вид обработки превосходит галтовочную обработку в 35 раз, а вибрационную до 11,5 раза.

Таким образом, к методам обработки свободным абразивом с соударением частиц относят метод вибрационной обработки, центробежно-ротационной обработки и галтовку. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки.

Наиболее экономически эффективным является метод центробежно-ротационной обработки, т. к. в ходе технологического процесса в тороидально-винтовом потоке возникают достаточно высокие скорости вращения и давление на обрабатываемые детали. Самым не эффективным и не производительным способом является метод сухой галтовки деталей. Это объясняется тем, что частицы абразивного наполнителя при падении свободно скользят по поверхности деталей, за счет этого происходит низкий контакт между наполнителем и деталями.

Общим достоинством всех методов можно отметить повышенную производительность по сравнению с обработкой закрепленным абразивом.

Общим недостатком всех методов обработки является снятие основного слоя металла по всей поверхности заготовки, следовательно, изменение геометрических и физико-механических параметров поверхностного слоя.

Список использованных источников и литературы

1. Павлюкова, Н. Л. Повышение эффективности отделочной обработки художественных изделий из медных сплавов свободными абразивами / Н. Л. Павлюкова, В. А. Полетаев, М. Ю. Волкова. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2010. – 100 с.
2. Тамаркин, В. О. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами : дис. ... докт. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 1995. – 285 с.
3. Очистка изделий в машиностроении / Ю. С. Козлов, О. К. Кузнецов, А. Ф. Тельнов. – Москва : Машиностроение, 1982. – 264 с.
4. Кулаков, Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрельков. – Москва : Машиностроение, 1979. – 216 с.

5. *Трилисский, В. О.* Объемная центробежно-ротационная обработка : монография / В. О. Трилисский, И. Е. Бурштейн, В. И. Алферов. – Москва : НИИмаш, 1983. – 52 с.
6. *Бабичев, А. П.* Вибрационная обработка деталей : монография. – Москва : Машиностроение, 1974. – 136 с.

Сведения об авторах

Алена Васильевна Логвиненко, магистрант кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), Ale.Mol4anowa@mail.ru

Конструктивное определение глубины вхождения плунжера в зацепление из условия отсутствия интерференции

М. Н. Каракулов, Е. С. Коробейникова, Д. А. Хайбуллина

Рассматривается определение оптимальных значений радиальной деформации для волновой зубчатой передачи. Также ее выбор на основе требований для работоспособности передачи и расчет на примере плунжерной передачи плунжерного газогидравлического двигателя ПГД-1.

Ключевые слова: плунжерная передача, передаточное отношение, эвольвентное колесо, зубчатое колесо.

Constructive determination of the depth of engagement of the plunger from the condition of absence of interference

M. N. Karakulov, E. S. Korobeynikova, D. A. Khaibullina

The article considers the choice of optimal values of radial deformation for a wave gear. Also, the definition of the basic conditions for its operation and calculation on the example of the PG-1 plunger transmission.

Keywords: gear drive, gear ratio, involute wheel, gear wheel.

Известно, что радиальная деформация волновой зубчатой передачи e_0 практически не влияет на передаточное отношение, но от ее величины сильно зависят качественные показатели зацепления: КПД, коэффициент перекрытия, коэффициенты удельного скольжения, крутящий момент на выходном валу [1]. Так как большинство качественных показателей находятся в противоречивой связи друг с другом, то актуальными задачами являются 1) определение закономерностей, связывающих e_0 с каждым из указанных показателей и 2) определение такого e_0 , при котором бы качественные показатели зацепления принимали бы наилучшие значения для предполагаемых условий применения привода с плунжерной передачей.

Сложность определения необходимой e_0 связана с тем, что при проведении геометрического расчета элементов передачи [2] диаметры выступов эквивалентного колеса плунжеров и зубчатого колеса, принимают такое значение, что назначение $e_0 = a_w$, как это производится при проектировании волновых передач с ГЗК и цилиндрических эвольвентных зубчатых передачах [3], нецелесообразно в связи с тем, что в этом случае глубина захода плунжеров в зацепление принимает слишком малые размеры. Например, при принятии $e_0 = a_w$ глу-

бина захода $h_{\text{зах.}} = a_w = 2,715 \text{ мм}$ или всего $0,545m$, что приводит к тому, что контакт между плунжером и зубом колеса фактически отсутствует.

С одной стороны, необходимая e_0 может быть определена построением графиков положения точки контакта в передаче при входе одиночного плунжера в зацепление с зубом колеса. Полученный, таким образом, график удобнее отображать в долях модуля передачи [3].

Например, анализ показывает, что в плунжерной передаче ПГД-1 для обеспечения контакта плунжера и зубчатого колеса минимально необходимая $e_0 = 1,75m$. При значениях e_0 менее, чем определенного построением указанных графиков, ведет на практике к ударной работе двигателя и потере кинематической точности при его реверсировании за счет наличия больших зазоров при входе плунжера в зацепление.

Так, при $e_0 = 1,5m$, при проведении расчетов по указанной методике [3], угол отклонения выходного вала от установленного положения при реверсировании составит ($S_{\min}$ – минимальный зазор между рабочими поверхностями плунжера и зуба колеса, R_{a2} – радиус окружности выступов зубчатого колеса передачи)

$$\psi_K = \frac{S_{\min}}{R_{a2}} = \frac{0,77 \text{ мм}}{0,5 \cdot 233,88 \text{ мм}} = 0,0066 \text{ рад.} = 0,37^\circ,$$

а угловое отклонение вала волнообразователя (при заданном передаточном отношении i_{3K}^C) уже $\psi_3 = i_{3K}^C \psi_K = 28 \cdot 0,37 = 10,6^\circ$, что по степени кинематической точности не соответствует зубчатым прямозубым передачам даже 12 степени при аналогичных габаритах.

Если условия работы проектируемой передачи не предусматривают ее частого реверсирования, то небольшой первоначальный зазор в зацеплении допустим, так как он выбирается при работе привода за счет упругих деформаций деталей [4, 5]. Кроме того, погрешность передаточного отношения передачи частично компенсирует малые зазоры в зоне зацепления за счет увеличения окружного шага между плунжерами.

Исходя из этого, e_0 должна выбираться с соблюдением следующих основных условий, определяющих общую работоспособность передачи:

- обеспечение полноценного и наиболее продолжительного контакта зубьев колеса и плунжеров, которое можно обеспечить максимальной величиной захода плунжера в зацепление;
- отсутствие интерференции по окружности граничных точек.

Для обеспечения наиболее продолжительного контакта плунжеров и зубчатого колеса необходимо принять

$$e_0 = h_{\text{зах}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{зах}}$ – максимальная величина захода плунжеров в зацепление.

Максимально возможную величину захода плунжеров в зацеплении из геометрических соображений можно определить из зависимости

$$h_{\text{зах}} = h_2 - \Delta_h m, \quad (2)$$

где h_2 – высота зуба зубчатого колеса; $\Delta_h m = T_L + 0,5T_{da2} + 0,5T_{d\Gamma}$ – величина запаса захода, которая вводится для гарантированного выхода из зацепления неработающих плунжеров; T_L – поле допуска на длину плунжера; T_{da2} – поле допуска на диаметр окружности выступов зубчатого колеса d_{a2} ; $T_{d\Gamma}$ – поле допуска на диаметр генератора волн.

Максимальная величина захода плунжеров в зацепление ограничивается условием отсутствия интерференции плунжеров и зубьев колеса по окружностям граничных точек, которое для плунжерной эвольвентной передачи может быть представлено следующим образом:

$$\begin{cases} d_{a\Pi} \leq d_{IK} - 2e_0, \\ d_{aK} \geq d_{I\Pi} + 2e_0, \end{cases} \quad (3)$$

где $d_{a\Pi}$ – диаметр окружности выступов эквивалентного колеса; d_{aK} – диаметр окружности выступов зубчатого колеса; $d_{I\Pi}$ и d_{IK} – диаметры окружности граничных точек эквивалентного и зубчатого колес соответственно.

Из (3) можно получить зависимость, для определения e_0 из условия отсутствия интерференции по окружностям граничных точек (m – модуль зацепления, Z_K – количество зубьев колеса, Z_Π – количество плунжеров, x_1 и x_2 – коэффициенты радиального смещения эквивалентного и зубчатого колес, K – кратность передачи, h_a^* – коэффициент радиального зазора)

$$\begin{cases} e_0 \leq \frac{d_{IK} - d_{a\Pi}}{2} = 0,5m \left(\frac{Z_K \cos \alpha}{\cos \alpha_{IK}} - Z_\Pi K + 2(h_a^* + x_1) \right), \\ e_0 \leq \frac{d_{aK} - d_{I\Pi}}{2} = 0,5m \left(Z_K + 2(h_a^* - x_2) - \frac{Z_\Pi K \cos \alpha}{\cos \alpha_{I\Pi}} \right). \end{cases} \quad (4)$$

где α_{IK} и $\alpha_{I\Pi}$ – угол профиля, соответствующий окружности граничных точек колеса и эквивалентного колеса плунжеров соответственно, который, при изготовлении их с помощью долбяка, определяется из зависимости:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_{IK} &= \operatorname{tg} \alpha_{twK0} + \frac{Z_0}{Z_K} (\operatorname{tg} \alpha_{a0} - \operatorname{tg} \alpha_{twK0}), \\ \operatorname{tg} \alpha_{I\Pi} &= \operatorname{tg} \alpha_{tw\Pi0} - \frac{Z_0}{Z_\Pi K} (\operatorname{tg} \alpha_{a0} - \operatorname{tg} \alpha_{tw\Pi0}), \end{aligned} \quad (5)$$

где Z_0 – число зубьев долбяка; $\alpha_{a0} = \arccos(mZ_0 \cos \alpha / d_{a0})$ – угол профиля на окружности выступов долбяка; d_{a0} – диаметр выступов долбяка,

$$\begin{aligned} \operatorname{inv} \alpha_{twK0} &= \left(\frac{2}{Z_K - Z_0} \frac{x_2 - x_0}{\cos \alpha} \operatorname{tg} \alpha + \operatorname{inv} \alpha \right), \\ \operatorname{inv} \alpha_{tw\Pi0} &= \left(\frac{2}{Z_\Pi K + Z_0} \frac{x_1 + x_0}{\cos \alpha} \operatorname{tg} \alpha + \operatorname{inv} \alpha \right) - \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

угол зацепления в станочном зацеплении с долбяком колеса и эквивалентного колеса соответственно (x_0 – коэффициент радиального смещения долбяка в станочном зацеплении).

Для ПГД-1 со следующими параметрами: $\alpha=30^0$, $m=4\text{мм}$, $d_{a2}=233,88\text{ мм}$, $d_{ПК}=185,7\text{ мм}$, $Z_{П}=27$, $Z_K=56$, $i_{3K}^C=28$, $k_1=2$, $k_2=2$, $K=2$, $x_2=2,1$, $x_1=2,08$, $h_a^*=1,0$, в котором колесо нарезалось одним долбяком, выполненным по ГОСТ 9323-79, со следующими параметрами: $Z_0=31$, $d_0=124\text{ мм}$, $d_{a0}=135,68\text{ мм}$, $x_0=0,21$, а плунжеры червячной фрезой были получены следующие результаты [6]: $h_2=2,05m$, $h_{зах}=1,9m$, проверка на отсутствие интерференции граничных точек дала результаты $e_0<3,29m$.

Список использованных источников и литературы

1. Крайнев, А. Ф. Словарь-справочник по механизмам. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1987. – 560 с.
2. Каракулов, М. Н. Основы геометрического расчёта эвольвентного плунжерного зацепления / М. Н. Каракулов, А. С. Мельников, Е. Е. Ермолаева // Вестник ИжГТУ. – 2015. – №1. – С. 21–22.
3. Каракулов, М. Н. Исследование функции передаточного отношения плунжерного зацепления / М. Н. Каракулов, А. С. Мельников // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 1. – С. 40–42.
4. Каракулов, М. Н. Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния элементов плунжерного зацепления / М. Н. Каракулов, А. С. Мельников, А. Э. Саблин // Вестник ИжГТУ. – 2016. – № 1. – С. 18–22.
5. Popov K. Pavel Russian concept of wave gear production // Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions. – Chongqin University (China), 26-30.09.2006. - Pp. 310-315.
6. Karakulov M.N. Geometrical synthesis of a plunger transmission// Proceedings of JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2009-Sendai)/ – No. 09-203. - 13-15.05.2009, Matsushima (Japan). - Pp. 98-103.

Сведения об авторах

Максим Николаевич Каракулов, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая механика», Воткинский филиал ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Воткинск), tm@vfistu.ru

Елизавета Спартаковна Коробейникова, студент, Воткинский филиал ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Воткинск), lizakorobeinickova@yandex.ru

Динара Артуровна Хайбуллина, студент, Воткинский филиал ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Воткинск), leprechaunkh526@gmail.com

Обзор и анализ технических решений опоры вращения на аэростатическом подвесе

Д. В. Бульканов

Рассматриваются аэростатические и аэродинамические опоры, их характеристики, достоинства и недостатки.

Ключевые слова: аэростатическая опора, аэростатический подвес, система пористых сред, система отверстий.

Review and analysis of technical solutions for the rotation support on an aerostatic suspension

D. V. Bulkanov

Aerostatic and aerodynamic supports, their characteristics, advantages and disadvantages are considered. And also compared with roller bearings.

Keywords: aerostatic support, aerostatic suspension, rolling bearing, sliding bearing.

Введение

Актуальность темы аэростатического подвеса приобретает все большее значение с развитием прецизионных станков, обработки на высоких скоростях, микрообработка и на уникальных станках. Аэростатические опоры позволяют получить высокую точность и чистоту обработки, нагрузочные характеристики, виброустойчивость, а также высокую стойкость сверхтвердых режущих инструментов, чего не могут обеспечить другие типы опор скольжения и качения.

Опоры с воздушным зазором.

Как и все опоры, аэростатические опоры могут быть сконструированы таким образом, чтобы выдерживать радиальные, осевые или комбинированные нагрузки.

Независимо от типа нагрузки, на которую они рассчитаны, все аэростатические опоры работают за счет нагнетания сжатого воздуха в узкий зазор между двумя поверхностями.

Эти поверхности не соприкасаются, вследствие чего удается избежать проблем, связанных с опорами скольжения (таких как износ, образование частиц или потребность в смазке), и это является серьезным преимуществом, если нужна точная посадка (например, отсутствие зазора и статическое трение) и высокоскоростные приложения [1].

Существует две категории опор: аэродинамические и аэростатические, разница между которыми заключается в том, как воздух вводится в зазор, рис. 1.



Рис. 1. Виды воздушных опор:
а – аэродинамическая опора; *б* – аэростатическая опора

Аэродинамические опоры полагаются на относительное движение между поверхностями для создания градиента давления. Когда одна из поверхностей статична, а другая вращается и увлекает за собой воздух, тем самым заполняя зазор между двумя поверхностями, в результате чего обе поверхности разделены воздушным зазором.

Аэростатические опоры используют внешний источник для нагнетания сжатого воздуха непосредственно в зазор, который затем течет наружу по поверхностям к краям и выходит наружу под давлением окружающей среды в зазоре.

Данные опоры можно применять в прецизионных станках, измерительно-обрабатывающих и быстроходных (шпиндели, малогабаритные турбомашины, прецизионные гироскопы).

Существуют также гибридные подшипники, объединяющие два семейства. В таких случаях подшипник обычно питается сжатым извне газом на низких скоростях, а затем частично или полностью зависит от эффекта самонагнетания на более высоких скоростях [2].

К преимуществам таких опор можно отнести: долговечность, точность, высокую скорость, низкое время разогрева шпинделя до его рабочей температуры не загрязняют окружающую среду.

Среди недостатков стоит отметить самовозбуждающую вибрацию, жесткие допуски при изготовлении таких опор, а также нужна чистая окружающая среда.

Также воздушные подшипники разделяются по технологии создания компенсирующего эффекта.

Существуют два основных подхода к созданию компенсирующего эффекта в пневматических подшипниках.

Компенсация отверстия – подход, при котором воздух проходит через одно или несколько отверстий, просверленных в поверхности подшипника.

Компенсация пористых сред – подход, который использует естественную проницаемость пористого углеродного материала для регулирования потока воздуха к поверхности подшипника.

Аэростатические опоры с отверстиями

При использовании обычной компенсации отверстий необходимо подобрать размер подшипника с правильным количеством, размером и распределением

отверстий для поддержания стабильности во время работы (рис. 2). Иногда для равномерного распределения сжатого воздуха по поверхности подшипника добавляются канавки. Однако такая технология очень трудна в реализации.

Пневматический подшипник неустойчив, если он подвержен колебаниям. Это часто проявляется в виде вибрации или гула, известного как «пневматический молоток». При применении пневматических подшипников такого типа крайне важно иметь представление о характеристиках ограничения компенсации.

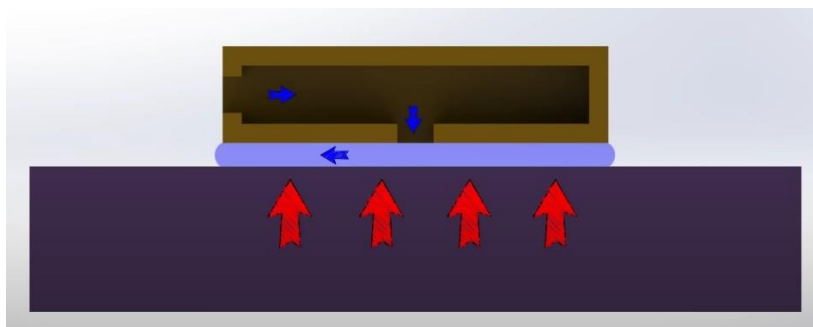


Рис. 2. Аэроостатические опоры с отверстиями

Другая проблема возникает, если поверхность подшипника поцарапана поперек канавки или вблизи отверстия. Это существенно изменяет баланс подшипника, поскольку объем выходящего воздуха может быть больше, чем может подавать отверстие, что приводит к выходу подшипника из строя даже при нормальном давлении подаваемого воздуха.

При аварии повреждение как подшипника из алюминия или нержавеющей стали с твердым покрытием, так и направляющей поверхности из гранита или стали неизбежно и часто обходится очень дорого. Царапины на направляющих размером более 0,051 мм могут привести к повреждению пневматического подшипника с отверстием или повлиять на высоту полета.

Аэроостатическая опора с пористой средой

Технология пористых материалов дает преимущество компенсации с использованием миллионов отверстий субмикронного размера, которые естественным образом образуются в подложке. Эти отверстия снабжены «извилистыми проходами», по которым воздух должен проходить, чтобы достичь поверхности подшипника. Это обеспечивает гораздо больший контроль воздушного потока через зазор, обеспечивая равномерное давление воздуха по всей поверхности подшипника. Одновременно это ограничивает и гасит воздушный поток (рис. 3).

При перебоях в подаче воздуха, как правило, ограниченный поток воздуха будет медленно вытекать, мягко опуская подшипник на направляющую поверхность. Кроме того, углеродистая поверхность подшипника мягкая, что изначально обеспечивает хорошие свойства подшипника скольжения, которые с меньшей вероятностью могут повредить эту поверхность.

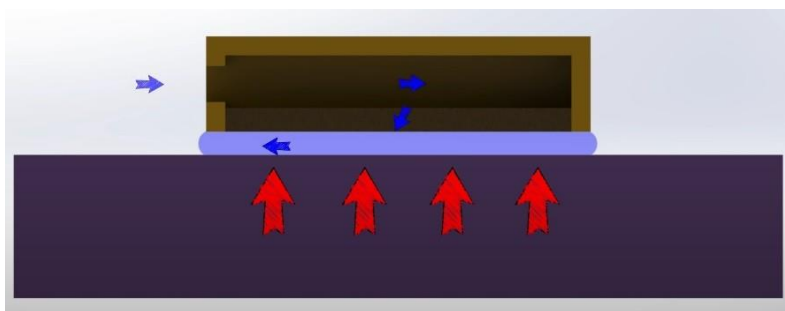


Рис. 3. Аэростатическая опора с пористой средой

Благодаря распределению воздуха по всей поверхности подшипника даже сильно поцарапанный воздушный подшипник с пористыми материалами будет продолжать эффективно работать.

При условии стабильности жесткость, вероятно, будет самой важной характеристикой производительности пневматических подшипников. Это связано с тем, что жесткость определяет стабильность работы [3].

Жесткость – это коэффициент изменения толщины воздушной пленки в ответ на изменение нагрузки. Она сильно зависит от толщины воздушной пленки.

Это может показаться немного нелогичным, но для оптимизации жесткости воздушные зазоры должны быть небольшими. (Чем толще воздушный зазор, тем более сжимаемым он будет.) Характеристика воздушных подшипников из пористого графита ясно показывает, что здесь у них есть преимущество, поскольку они могут «летать» при небольших воздушных зазорах без разрушения. Подшипники с отверстиями разрушаются, когда зазор становится достаточно ограниченным, чтобы лишить нижележащие области воздушного потока [3].

Из вышеописанных двух способов создания компенсирующего эффекта резюмируем их самые важные характеристики [4].

Аэростатические опоры с пористыми средами:

- миллионы субмикронных отверстий;
- равномерное давление воздуха;
- ограниченный поток воздуха;
- трудно засоряется;
- высокая жесткость;
- значительное демпфирование сжимающей пленки;
- устойчивость к ударам;
- пористые среды по своей сути являются опорной поверхностью;
- царапины оказывают номинальное влияние на производительность.

Аэростатические опоры с отверстиями:

- несколько отверстий и канавок сложных в изготовлении;
- перепады давления;
- высокий расход воздуха;
- легко засоряется;
- пониженная жесткость;

- относительно низкое демпфирование;
- подвержены авариям;
- удары металла о металл повреждают поверхности;
- царапины изнурительны и дорогостоящи.

Из данных характеристик мы видим, что по стабильности, жесткости, консистенции и ударопрочности, воздушные подшипники с пористыми вставками намного лучше воздушных подшипников с отверстиями и канавками.

Рассмотрены аэростатические опоры, приведены их преимущества и недостатки. А также рассмотрели виды аэростатических опор, принцип действия и область применения таких опор в машиностроении.

Список использованных источников и литературы

1. Проектирование гидростатических подшипников / под ред. Гарри Риппела ; пер. с англ. Г. А. Андреевой. – Москва : Машиностроение, 1967. – 135 с.
2. URL: <https://www.newwayairbearings.com>.
3. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А. В. Космынин [и др.]. – Москва : РАЕ, 2005. – 218 с.
4. *Константинеску, В. Н.* Газовая смазка. – Москва : Машиностроение, 1968. – 709 с.

Сведения об авторе

Денис Викторович Бульканов, магистрант кафедры «Технология машиностроения металлорежущие станки и инструменты», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), elan-els1@yandex.ru

Обзор аэростатических опор с пористыми вставками. Их отличительные особенности от опор качения

Д. В. Бульканов

Рассматриваются виды аэростатических подвесов с системой пористых сред и сравнение эксплуатационных характеристик с опорами качения.

Ключевые слова: аэростатический подвес, система пористых сред, трибологические проблемы.

Overview of aerostatic supports with porous inserts. Their distinctive features from rolling bearings.

D. V. Bulkanov

The types of aerostatic suspensions with a system of porous media and comparison of performance characteristics with rolling bearings are considered.

Keywords: aerostatic suspension, system of porous media, tribological problems.

Многие современные производители постоянно сталкиваются с повышенными требованиями к высокой скорости операций в сочетании с предельным уровнем точности. Эти уникальные требования обуславливают потребность в машинах и инструментах, позволяющих избежать трения и работать с высокой точностью и надежностью.

Несмотря на то, что на рынке представлено множество подшипников для снижения трения, каждый из них работает по-разному и обеспечивает разный уровень производительности. Традиционные роликовые подшипники соприкасаются с поверхностями во время работы и выделяют тепло, что приводит к износу и ухудшению производительности машины.

Аэростатические подшипники используются в широком спектре применений для устранения этих недостатков.

Хотя аэростатические подшипники являются явным усовершенствованием, важно знать, что существуют различные конструкции с отличительными характеристиками, приведенные в данной статье [1, 2].

Плоские круглые аэростатические опоры

Популярность плоских круглых пневматических подшипников обусловлена их универсальностью. Их можно использовать как для линейного, так и для вращательного движения. Подшипники имеют форму хоккейной шайбы и пористую углеродную подложку с одной стороны (рис. 1). Воздух пропускается через углерод и должен проходить по естественным извилистым каналам, чтобы достичь поверхности подшипника. В результате этого перемещения на

поверхности подшипника образуется жесткая, равномерная воздушная подушка, создающая надежное бесконтактное движение без трения. Эти подшипники также могут поставляться с предварительной вакуумной загрузкой, что повышает точность их позиционирования.

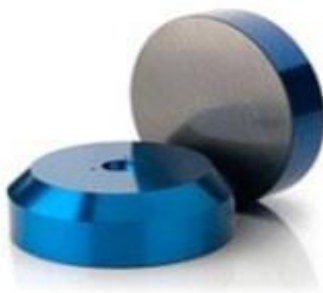


Рис. 1. Плоский воздушный подшипник

Благодаря своим исключительным демпфирующим свойствам плоские круглые пневматические подшипники являются идеальным кандидатом для систем механической обработки. Эти подшипники выгодно отличаются от обычных подшипников качения практически по всем эксплуатационным характеристикам. Их также легко наносить или заменять.

Сферические аэростатические опоры

Сферические воздушные подшипники изготовлены также по технологии пористых материалов для поддержания сферы на жесткой воздушной подушке. Сферический стакан также может поставляться с предварительной вакуумной загрузкой для дополнительной точности позиционирования (рис. 2).



Рис. 2. Сферический воздушный подшипник

Все воздушные подшипники изготовлены из пористой углеродной подложки. Миллионы субмикронных проходов, проходящих через материал, естественным образом ограничивают поток воздуха, оставляя равномерную жесткую воздушную подушку на поверхности подшипника. Поскольку отверстия равно-

мерно распределены по поверхности подшипника, в отличие от пневматических подшипников с отверстиями, перепады давления никогда не возникают, что делает аварии делом прошлого.

Уникальное использование пористой среды в сферических воздушных подшипниках делает их идеальными для использования в чистых помещениях. В сферических воздушных подшипниках не только используется меньше воздуха по сравнению с воздушными подшипниками с отверстиями, но и воздух равномерно распределяется по пористой среде.

Цилиндрические аэростатические опоры

Данный вид подшипников предназначен для применения на вращающихся или линейных валах с метрическим приводом. Эти подшипники устраняют трение в виде «трубки» из пористых сред (рис. 3). Эта проницаемая поверхность естественным образом распределяет ровный, но жесткий слой воздуха, обеспечивая необходимый подъем / зазор для работы.



Рис. 3. Цилиндрический воздушный подшипник

Этот уникальный метод устранения трения обеспечивает повышенную точность, недоступную системам элементов качения, что делает их идеальными для применений, требующих точного вращательного и линейного перемещения одновременно. Время простоя при техническом обслуживании также значительно сокращается, поскольку устаревают обременительные требования к смазке. Эти преимущества делают данный подвес беспроеигрышными в эксплуатации.

Отличительные особенности аэростатических опор

В отличие от контактных роликовых подшипников, в пневматических подшипниках используется тонкая пленка сжатого воздуха, обеспечивающая отсутствие трения и несущую нагрузку поверхность раздела между двумя поверхностями, которые в противном случае соприкасались бы друг с другом. Поскольку пневматические подшипники представляют собой бесконтактную технологию, они позволяют избежать давних трибологических проблем, таких как трение, износ и необходимость смазки [3, 4]. Сравнение эксплуатационных характеристик приведены в таблице.

Эксплуатационные характеристики аэростатических и роликовых опор

Аэростатические опоры	Опоры качения
Более прямое движение для оптимального позиционирования	Импульс шариков усиливает нежелательное движение подшипников, приводящее к отклонениям точности
Высокие скорости вращения, на порядок превышающие обычные подшипники с роликовыми элементами	Контакт с рельсом или направляющей и несколько скоростей вращения шариков ограничивают скорость вращения. Шарiki или ролики могут проскальзывать при большом ускорении
Плавная и бесшумная работа без вибраций	Рециркулирующие ролики или шарики вызывают колебания скорости, которые снижают стабильность и производительность
Нулевое трение и нулевой износ обеспечивают стабильную и долговременную работу при более высоком разрешении	Шарiki изнашиваются при механическом контакте, что приводит к несоответствию характеристик машины
Отсутствие смазочных материалов и низкое образование частиц позволяют избежать загрязнения окружающей среды в чистых помещениях. В запыленных помещениях пневматические подшипники выталкивают пыль	Масляная смазка, необходимая для подшипников качения, может скапливаться, загрязняя участок

Этот набор характеристик обеспечивает аэростатическим опорам уникальные преимущества для точного позиционирования и высокоскоростных применений, такие как положительная взаимосвязь между жесткостью и демпфированием.

Аэростатические опоры обеспечивают превосходную производительность по сравнению с роликовыми подшипниками. Обеспечивают уникальный метод распределения воздуха, что делает ее лучшим выбором среди конструкций опор.

Список использованных источников и литературы

1. URL: <https://www.newwayairbearings.com>.
2. Опоры скольжения с газовой смазкой / С. А. Шейнберг, В. П. Жедь, М. Д. Шисеев, В. С. Баласаньян, Н. Д. Заболоцкий ; под ред. С. А. Шейнберга. – 2- изд. – Москва : Машиностроение, 1979. – 336 с.
3. Пинегин, С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / С. В. Пинегин, Ю. Б. Табачников, И. Е. Сипенков. – Москва : Наука, 1982. – 265 с.
4. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А.В. Космынин [и др.]. – Москва : РАЕ, 2005. – 218 с.

Сведения об авторе

Денис Викторович Бульканов, магистрант кафедры «Технология машиностроения металлорежущие станки и инструменты», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». (Россия, г. Сарапул), elan-els1@yandex.ru

Применение программ для обработки растровых графических изображений в анализе машин и механизмов

М. Н. Каракулов, Н. С. Стерхова, Ю. Н. Русанова

Приведен опыт использования программ для обработки растровых графических изображений в анализе работы машин и механизмов. Подтверждение гипотезы о том, что закон деформирования гибкого элемента в ненагруженном ПГД можно представить в виде уравнения эллипса. Приводятся формулы, описывающие форму гибкого элемента, которую он принимает при работе двигателя.

Ключевые слова: плунжерный газогидравлический двигатель, гибкий элемент, уравнение эллипса, растровые изображения, машина, механизм.

The experience of using programs for processing raster graphic images in the analysis of the operation of machines and mechanism

M. N. Karakulov, N. S. Sterchova, Y. N. Rusanova

The experience of using programs for processing raster graphic images in the analysis of the operation of machines and mechanisms. Confirmation of the hypothesis that the law of deformation of a flexible element in an unloaded PHE can be represented as an ellipse equation. The corresponding formulas are given.

Keywords: plunger's hydraulic engine, flexible element, ellipse equation, raster graphic images, machine, mechanism.

В плунжерном газогидравлическом двигателе (ПГД) могут применяться металлические тросы или кольца, выполняющие функцию замыкания кинематической связи в паре плунжер-генератор [1]. Известно [1], что результаты использующихся алгоритмов прочностных расчетов гибкого элемента зависят от его формы, которую он принимает в процессе упругого деформирования при работе двигателя. Поэтому важной задачей является ее экспериментальное определение с целью выявления погрешностей, вносимых в расчет, обусловленных идеализацией формы деформирования.

Для исключения влияния нагрузочных факторов определение формы деформирования производилось при эксплуатации ненагруженного крутящим моментом выходного вала ПГД. Для этого использовалась цифровая фотокамера, объектив которой был установлен соосно с генератором двигателя. При работе ПГД было сделано несколько снимков с минимальной выдержкой 1/40 с, что позволило получить изображения мгновенной формы гибкого элемента при эксплуатации ПГД.

На рис. 1 представлен снимок, фиксирующий форму деформирования гибкого элемента опытного образца ПГД-1. Здесь 1 – гибкий элемент, 2 – зубчатое колесо, 3 – генератор.

Полученные цифровые растровые изображения подвергались обработке с помощью программного приложения Graph2 Digit V 0.5B. Указанное приложение позволило получить координаты точек, принадлежащих гибкому элементу, в осях, центр которых, находится на оси симметрии генератора.

На рис. 2 представлено основное окно указанного приложения для обработки изображения с целью получения координат точек, принадлежащих гибкому элементу, для расчета формы деформирования гибкого элемента опытного образца ПГД-1.

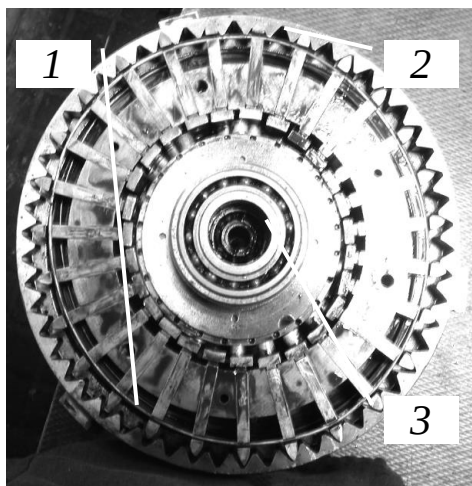


Рис. 1. Снимок, регистрирующий форму деформирования гибкого элемента

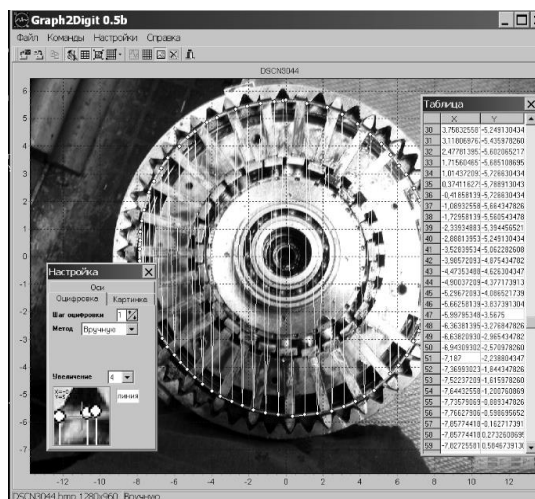


Рис. 2. Диалоговое окно программы обработки изображения для получения координат гибкого элемента ПГД-1

С целью повышения точности полученных результатов проводилась обработка 20 изображений. После получения искоемых координат точек, принадлежащих гибкому элементу, файлы обрабатывались с получением среднеарифметического значения координат. Для этого использовалось программное приложение Microsoft Excel. Результаты обработки данных для опытного образца ПГД-1 при угловой скорости золотника генератора $\omega_3 = 8,4$ рад/с и давлении рабочего тела $p=2,0$ МПа представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов позволяет выдвинуть гипотезу о том, что закон деформирования гибкого элемента при ненагруженном выходном вале ПГД может быть представлен в виде уравнения эллипса.

Для проверки выдвинутой гипотезы, был проведен анализ сходимости результатов проведенных экспериментальных исследований и теоретических данных, полученных расчетным путем. Теоретическая форма деформирования, представлена на рис. 3 в виде уравнения эллипса с координатами:

$$x=b \cdot \cos \gamma, y=a \cdot \sin \gamma, \quad (1)$$

где $a=(Ra_2 + e_0)$ и $b=(Ra_2 - e_0)$ – размеры большой и малой полуосей эллипса, Ra_2 – радиус окружности выступов зубчатого колеса, e_0 – размер деформирования передачи, γ – угол, отсчитываемый против часовой стрелки ($0 < \gamma < 2\pi$).

Анализ погрешности между теоретическими и экспериментальными данными можно провести, используя значения коэффициентов уравнения регрессии a' и b' , считая его заданным в виде уравнения эллипса, т.е. в виде

$$x^2/a'^2 + y^2/b'^2 = 1. \quad (2)$$

Расчеты, проведенные с использованием (2), дают следующие значения коэффициентов для экспериментальных данных: $a' = 123,470$ мм и $b' = 106,210$ мм. Расчеты, проведенные с использованием (1), дают значения коэффициентов для теоретических данных: $a = 123,640$ мм и $b = 109,640$ мм.

Относительное расхождение между результатами экспериментального и теоретического исследований составляет:

$$\Delta_a = \frac{a - a'}{a} = \frac{123,640 - 123,470}{123,640} = 0,0014 = 0,14\%, \quad (3)$$

$$\Delta_b = \frac{b - b'}{b} = \frac{109,640 - 106,210}{109,640} = 0,0312 = 3,12\%. \quad (4)$$

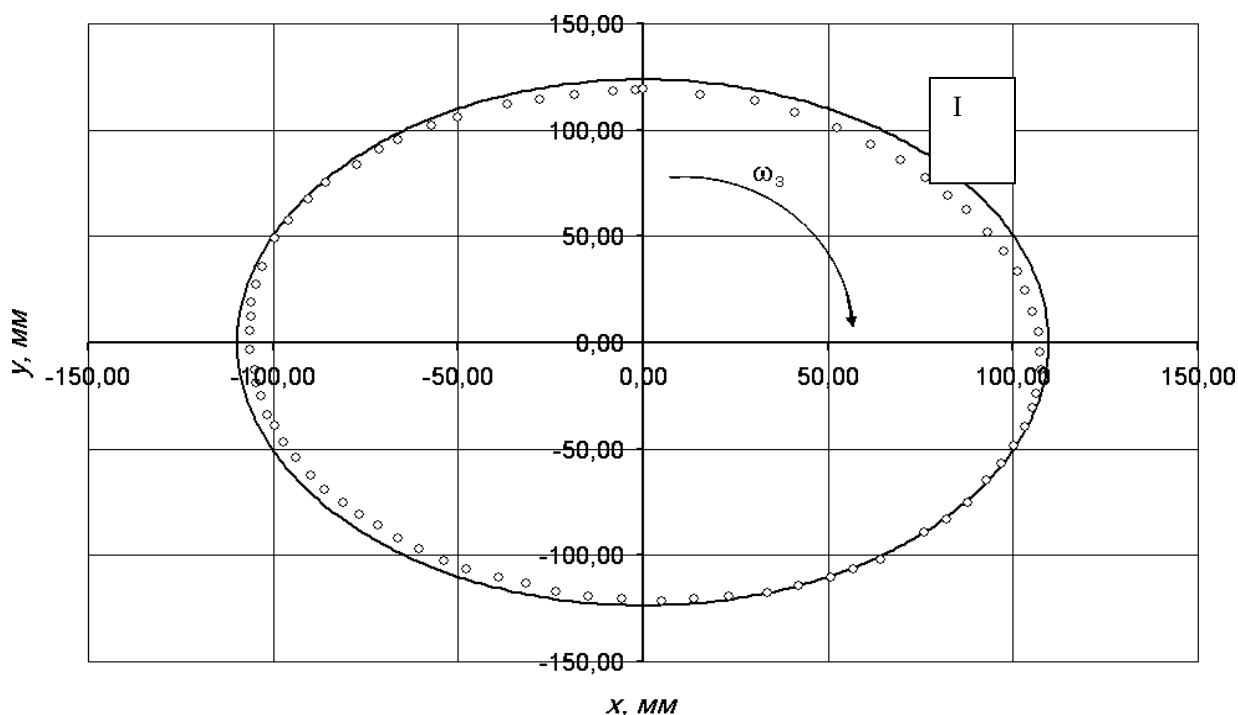


Рис. 3. Теоретическая (уравнение эллипса) и экспериментальная форма гибкого элемента ПГД-1

Полученные результаты позволяют сделать вывод о правомерности выдвинутой ранее гипотезы. Полученные в (3) и (4) результаты позволяют сделать вывод о возможности представления формы гибкого элемента ПГД, которую он принимает в процессе работы, в виде уравнения эллипса с достаточной для инженерных расчетов точностью. Это позволяет значительно сократить трудоемкость прочностного расчета гибкого элемента ПГД.

Дополнительным результатом анализа полученных экспериментальных данных является вывод о том, что условия силового взаимодействия между гибким

элементом и плунжерами в областях *I* и *II* будут отличаться друг от друга (рис. 3). Это подтверждает гипотезу, выдвинутую ранее в [2], согласно которой, распределение сил трения по дуге гибкого элемента не симметрично относительно главных осей эллипса. В связи с этим, силы трения, приложенные к диаметрально противоположным участкам гибкого элемента, не компенсируют друг друга, что приводит к тому, что гибкий элемент при работе ПГД начинает совершать вращательное движение относительно оси генератора, что также необходимо учитывать при проведении его прочностного расчета.

Список использованных источников и литературы

1. Анализ области эффективного использования плунжерных передач / М. Н. Каракулов, М. Г. Исупов, А. С. Мельников, А. Э. Саблин // Вестник ИжГТУ. – 2016. – № 4 (72). – С. 7–10.
2. Каракулов, М. Н. Основы геометрического расчёта эвольвентного плунжерного зацепления / М. Н. Каракулов, А. С. Мельников, Е. Е. Ермолаева // Вестник ИжГТУ. – 2015. – № 1. – С. 21–22.

Сведения об авторах

Максим Николаевич Каракулов, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая механика», Воткинский филиал ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Воткинск), tm@vfistu.ru

Юлия Николаевна Русанова, студент, Воткинский филиал ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Воткинск), uliarusanova81827@gmail.com

Наталья Станиславовна Стерхова, студент, Воткинский филиал ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Воткинск), natasha171188@mail.ru

Расчет системы выталкивания формообразующих деталей при пенополиуретановой заливке

А. Б. Глухов

Рассматривается методика расчета величины перемещения и усилия выталкивания формообразующих деталей пресс-формы пенополиуретаном для радиоэлектронного изделия. Расчеты представлены для двух вариантов исполнения: с формообразующими поверхностями, параллельными направляющей силе выталкивания; и с введением в конструкцию литейного уклона.

Ключевые слова: система выталкивания, формообразующие детали, заливка, пенополиуретан.

Calculation of the system for pushing out form-building parts when pouring polyurethane foam

A.B. Glukhov

A method for calculating the amount of movement and the ejection force of the form-building parts of a mold for a polyurethane foam radio-electronic product is considered. Calculations are presented for two versions: with forming surfaces parallel to the directing force of buoyancy; and with the introduction of a casting slope into the design.

Keywords: ejection system, forming parts, filling, polyurethane foam.

При демонтаже пресс-формы после заливки и затвердевания полиуретановой композиции необходимо обеспечить извлечение формообразующих деталей из тела отливки, при этом не повреждая изделие и затрачивая на демонтаж наименьшее количество времени. Для этого необходимо учесть усадку полиуретана при затвердевании, прилипание (адгезию) материала к поверхности формы, массу изделия и извлекаемых из отливки деталей и прочие нагрузки, влияющие на процесс демонтажа. В результате усадки изделие, как правило, без затруднений извлекается из гнезда матрицы (усадка направлена «в тело» изделия, между ним и стенкой формы проникает воздух), однако в результате сохранения остаточных напряжений, возникающих в процессе вспенивания полиуретановой композиции, этого не происходит. Изделие удерживается на пуансоне, знаке (на внутренней поверхности изделия возникают напряжения растяжения, так как пуансон препятствует усадке) и в матрице. Адгезия зависит от особенностей материалов пары изделие-форма, шероховатости поверхностей пары, величины остаточного давления в форме. Выталкиванию также может препятствовать и разность давления – атмосферного и возникающего между изделием и пуансоном.

При демонтаже результирующее усилие, прижимающее изделие к поверхности формы, должно быть преодолено силой, удаляющей изделие (полное осевое усилие, преодолевающее силы трения, вызываемые результирующим усилием, а также расходуемое на перемещение деталей выталкивающей системы).

В статье предложена методика расчета величины перемещения и усилие выталкивания вставки (5) с крышкой (8) пресс-формы для заливки (рис. 1) пенополиуретаном радиоэлектронного изделия (рис. 2).

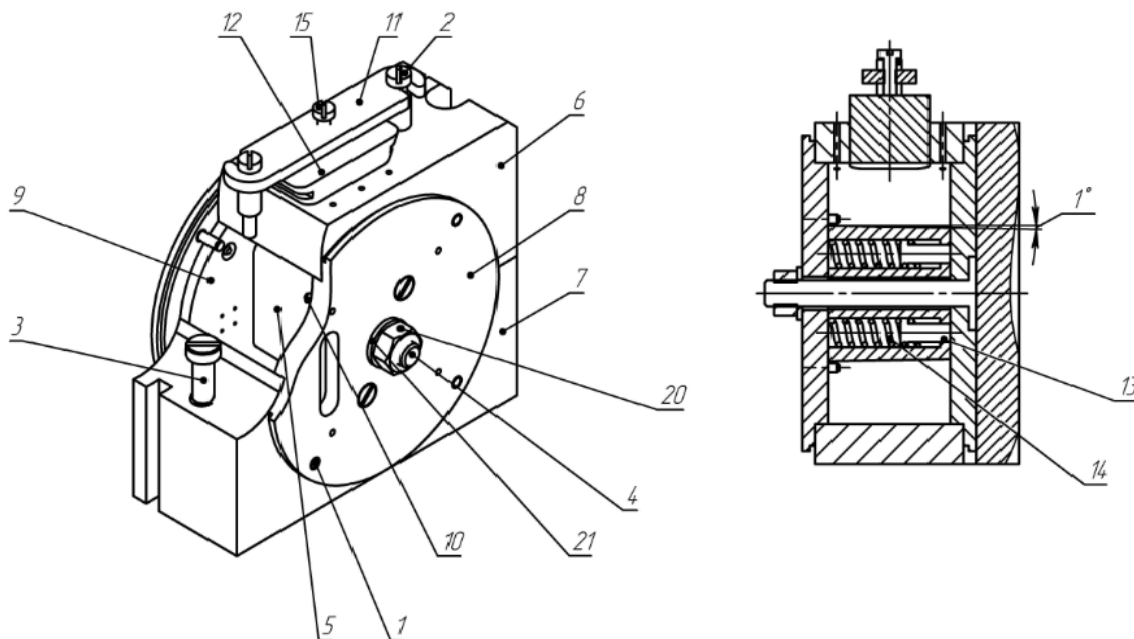


Рис. 1. Пресс-форма для заливки

Расчеты представлены для двух вариантов исполнения вставки (5): с формообразующими поверхностями, параллельными направляющей силы выталкивания; и с введением в конструкцию вставки литейного уклона 1° .

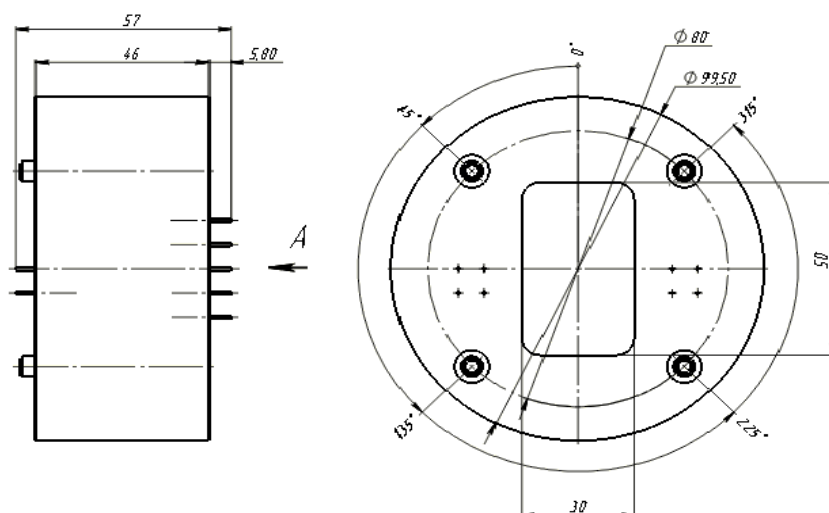


Рис. 2. Изделие

Марка пенополиуретана – ППУ305А ТУ В-121-68 кажущейся плотностью 300 кг/м³ (физико-химические свойства представлены в табл. 1), марка материала формообразующих деталей пресс-формы – сталь 10Х12Н10Т ГОСТ 11068–81.

Таблица 1. Физико-химические показатели пенополиуретанов ППУ-305 и ППУ-305А

Параметр	ППУ-305			ППУ-305А	
Кажущаяся плотность, кг/м ³	35–55	180–220	300–350	35–55	200–300
Предел прочности при сжатии, кг/см ² , не менее	2,4	25	70	1,5	30
Удельная ударная вязкость, кг·см/см ²	0,2	0,6	1	0,2	–
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 ³ Гц, не более	–	6·10 ⁻³	8·10 ⁻³	–	6·10 ⁻³
Диэлектрическая проницаемость, не более	–	1,5	3	–	3
Усадка линейная при 110 °С за 4 ч, %, не более	1	1	1	1	1
Теплостойкость, °С, не ниже	120	120	120	120	120
Водопоглощение за 24 ч, кг/м ² , не более	0,1	–	–	0,1	–
Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·град), не более	0,03	–	–	0,03	–

Определение величины перемещения (хода) выталкивающей системы должно учитывать ограничения хода выталкивания машины-автомата. Для полного сталкивания, например, глубокого изделия с пуансона может понадобиться ход, превышающий возможности машины; тогда определяют минимально допустимый ход $L_{\min}$ (рис. 3):

$$L_{\min} = dS/(200\operatorname{tg}\alpha),$$

где d – наибольший диаметр пуансона, S – усадка материала изделия; α – угол наклона образующей пуансона.

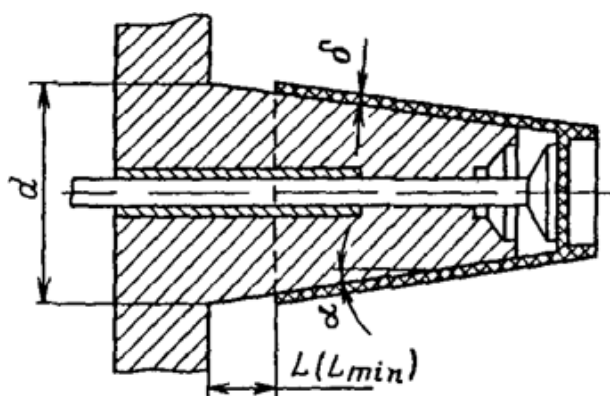


Рис. 3. Схема выталкивания конического изделия с дном

Поскольку вставка имеет прямоугольную форму, преобразуем формулу, выразив $L_{\min}$ через периметр, образованный секущей плоскостью окружности d .

Периметр окружности C :

$$C = \pi d,$$

где d – диаметр окружности.

Следовательно,

$$d = C/\pi.$$

Периметр вставки $C = 151,42$ мм.

Определим минимально допустимый ход выталкивания:

$$L_{\min} = dS/(200\text{tg}\alpha) = (C/\pi)S/(200\text{tg}\alpha) = CS/(200\text{tg}\alpha\pi) = 151,42 \cdot 1 / (200 \cdot 0,0174 \cdot 3,1416) = 151,42 / 10,9328 = 13,85 \text{ мм.}$$

В простейшем случае, когда изделие цилиндрическое, для определения усилия выталкивания определяют величину деформации изделия (уменьшения толщины стенки за счет сжатия, усадки объема)

$$\varepsilon = 3S/100;$$

растягивающее напряжение в отливке

$$\sigma_p = \varepsilon E,$$

где E – модуль упругости материала компаунда.

Удельное давление отливки на пуансон $P_{уд}$:

$$P_{уд} = \sigma_p 2\delta/d,$$

где δ – толщина стенки изделия.

Тогда усилие выталкивания (съема)

$$P_v = f P_{уд} f_6,$$

где f – коэффициент трения пластмассы по стали, f_6 – площадь боковой поверхности отливки,

$$P_v = F_{тр};$$

где $F_{тр}$ – сила трения.

При расчетах следует величину E выбирать при температуре, соответствующей температуре извлечения отливки из формы.

Величина деформации изделия

$$\varepsilon = 3S/100 = 3 \cdot 1/100 = 0,03 \text{ мм.}$$

Для пенополиуретана ППУ305А примем $E=310$ мПа.

Растягивающее напряжение в отливке

$$\sigma_p = \varepsilon E = 0,03 \cdot 310 = 9,3 \text{ мПа.}$$

Толщина стенки (условная):

$$\delta = (D - (C/\pi))/2 = (99,5 - (151,42/3,1416))/2 = (99,5 - 48,1984)/2 = 51,3016/2 = 25,65 \text{ мм.}$$

Удельное давление отливки на пуансон:

$$P_{уд} = \sigma_p 2\delta/d = \sigma_p 2\delta/(C/\pi) = 9,3 \cdot 2 \cdot 25,65/48,2 = 9,9 \text{ мПа.}$$

Усилие выталкивания (при коэффициенте трения стали по пенополиуретану $f = 0,06$):

$$P_v = f P_{уд} f_6 = 0,06 \cdot 9,9 \cdot 69,65 = 41,37 \text{ кгс} = 405,7 \text{ Н.}$$

Схемы на рис. 4 поясняют действие сил при выталкивании изделий: N – нормальная сила от усадки изделия, сжимающая пуансон, знак; $\operatorname{tg} \rho = f$. Для изделия с конической внутренней поверхностью

$$P_v = f_{\text{пр}} P_{\text{уд}} f_{\delta} = (\sigma_p 2\delta / (C_{\text{ср}} / \pi)) \cdot f_{\delta} \cdot \operatorname{tg}(\rho - \beta)$$

где $f_{\text{пр}} = \operatorname{tg}(\rho - \beta)$ – приведенный коэффициент трения; β — угол, дополняющий до нормали к поверхности (при $\beta = \rho$, $P_v = 0$), зависящей от силы адгезии к поверхности.

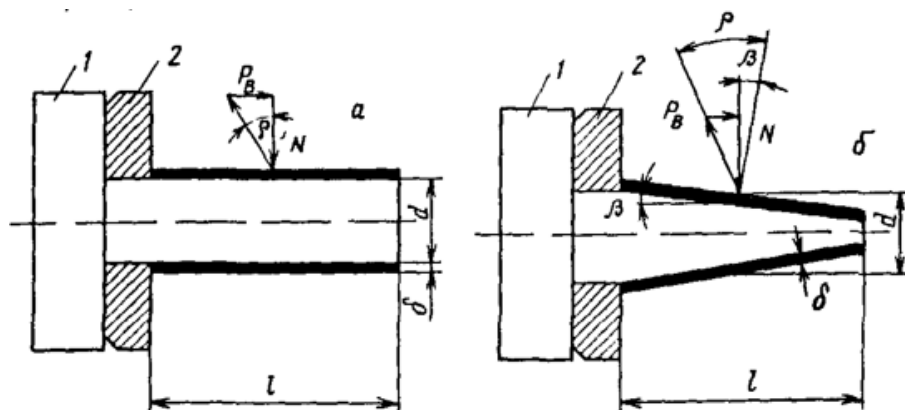


Рис. 4. Схемы действия сил при выталкивании: а – цилиндрического и б – конического изделий; 1 – пуансон (знак), 2 – сталкивающая плита, 3 – изделие

Периметр по средней плоскости сечения вставки

$$C_{\text{ср}} = 156,46 - 151,42 = 153,94 \text{ мм.}$$

Толщина стенки по средней плоскости сечения вставки (условная):

$$\delta = (D - (C_{\text{ср}} / \pi)) / 2 = (99,5 - (153,94 / 3,1416)) / 2 = (99,5 - 49) / 2 = 50,5 / 2 = 25,25 \text{ мм;}$$

$$\operatorname{arctg} f = \rho = 3,4336^\circ;$$

$$P_v = f P_{\text{уд}} f_{\delta} = (\sigma_p 2\delta / (C_{\text{ср}} / \pi)) \cdot f_{\delta} \cdot \operatorname{tg}(\rho - \beta) = (9,5 \cdot 2 \cdot 25,25 / (153,94 / 3,1416)) \cdot 70,82 \cdot 0,042 = (479,75 / 49) \cdot 2,97 = 9,79 \cdot 2,97 = 29,08 \text{ кгс} = 285,18 \text{ Н.}$$

Результаты полученных расчетов занесем в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов

Параметр	Формообразующие поверхности параллельны	Литейный уклон 1°	Степень оптимизации, %
Ход выталкивания, L_{min} , мм	56	14	75
Усилие выталкивания, P_v , Н	405,7	285,18	30

Исходя из полученных результатов, следует, что ход выталкивания в случае применения формообразующей детали с литейным уклоном 1° сократился на 75 %, а усилие выталкивания сократилось на 30 % в сравнении с показателями детали, имеющей параллельные формообразующие поверхности. Полученные

данные свидетельствуют о возможности применение формующих литейных уклонов в пресс-формах для заливки радиоэлектронных устройств пенополиуретаном в условиях промышленного производства с целью сокращения времени демонтажа пресс-форм и предотвращения повышенной утомляемости работников, осуществляющих данные операции.

Список использованных источников и литературы

1. *Гарбар, М. И.* Справочник по пластическим массам / М. И. Гарбар, М. С. Акутин, Н. М. Егорова. – Москва : Химия, 1967. – Т. 2. – 462 с.
2. *Басов, Н. И.* Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов : учебник для вузов / Н. И. Басов, В. Л. Брагинский, Ю. В. Казанков. – Москва : Химия, 1991. – 352 с. : ил.

Сведения об авторе

Андрей Борисович Глухов, студент кафедры «Технология машиностроения металлорежущие станки и инструменты», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». (Россия, г. Сарапул), inroom85@gmail.com

Автоматизированная система демонтажа пресс-форм при полиуретановой заливке

А. Б. Глухов

Рассматривается вопрос автоматизации демонтажа пресс-формы при герметизации радиотехнического изделия методом заливки в съемные формы. Предложена конструкция автоматизированной системы демонтажа пресс-формы, основанная на сокращении количества резьбовых крепежных деталей, включении в конструкцию пресс-формы механизма, частично автоматизирующего процесс демонтажа, а также на введении технологических уклонов.

Ключевые слова: демонтаж, автоматизация, герметизация, заливка, пенополиуретан.

Automated system for dismantling molds during polyurethane pouring

A. B. Glukhov

The issue of automating the dismantling of the mold when sealing a radio-technical product using the method of pouring into removable molds is considered. The design of an automated mold dismantling system is proposed, based on reducing the number of threaded fasteners, incorporating a mechanism into the mold design that partially automates the dismantling process, as well as introducing technological slopes.

Keywords: dismantling, automation, sealing, filling, polyurethane foam.

Автоматизация технологических процессов герметизации изделий радиоэлектронной аппаратуры методом заливки в съемные формы в большей степени решается при помощи автоматизированных установок подготовки и дозирования компаунда. При этом монтаж-демонтаж форм практически всегда выполняется вручную. Повышение производительность труда в этом случае осуществляется использованием универсального механизированного инструмента.

Актуальность исследований методов автоматизации процессов установки и съема пресс-форм при заливке компаундами также подтверждается информационными источниками, указывающими на сложность и малую распространенность автоматизации данных процессов в производстве.

В статье предложена конструкция автоматизированной системы демонтажа пресс-формы для заливки вспененным пенополиуретаном радиоэлектронного устройства. Система основана на сокращении количества резьбовых крепежных деталей, включении в конструкцию пресс-формы механизма, частично автоматизирующего процесс демонтажа; введением технологических уклонов.

В процессе работы был выполнен обзор научно-технической литературы, содержащей сведения о системах демонтажа изделий, монтаж которых выполнен с предварительным натягом, в том числе подшипников. Также были рассмотрены системы съема, выталкивания изделий при формовании изделий из пластических масс, при изготовлении изделий методом штамповки; выполнен обзор механизмов зажимных устройств станочных приспособлений и силовых приводов.

В качестве исходных данных для разработки принята пресс-форма для заливки (рис. 1), обеспечивающая исполнение размеров изготавливаемого изделия согласно рис. 2. Пенополиуретан, применяемый при заливке, – ППУ305А ТУ В-121-68 с кажущейся плотностью 300 кг/м³.

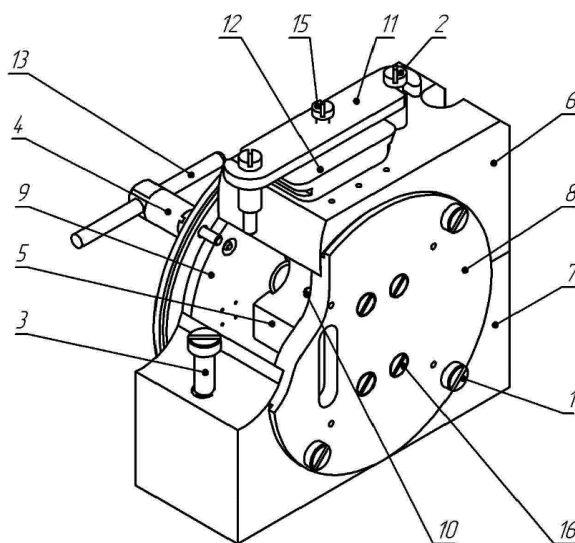


Рис. 1. Пресс-форма для заливки пенополиуретаном

Приспособление состоит из верхнего (6) и нижнего (7) корпусов, между собой скрепленных болтами (3). Корпуса в сборе образуют цилиндрическую полость, с обеих сторон ограниченную крышками (8, 9). Крышки фиксируются на корпусах винтами (1). Верхний корпус имеет отверстие, в которое устанавливается пробка (12). Пробка фиксируется винтом (15), установленным в планке (11). Планка устанавливается на стойки (2). На крышке (8) винтами (16) закреплена вставка (5).

Для демонтажа пресс-формы, после завершения операции заливки и затвердевания пенополиуретана, в крышке (9) предусмотрено резьбовое отверстие, в которое устанавливается съемник (4), снабженный рукояткой (13). В крышках также имеются отверстия для вывода из полости приспособления контактов, не подлежащих герметизации, а для верной ориентации под сборки в приспособлении в крышках установлены пальцы (10).

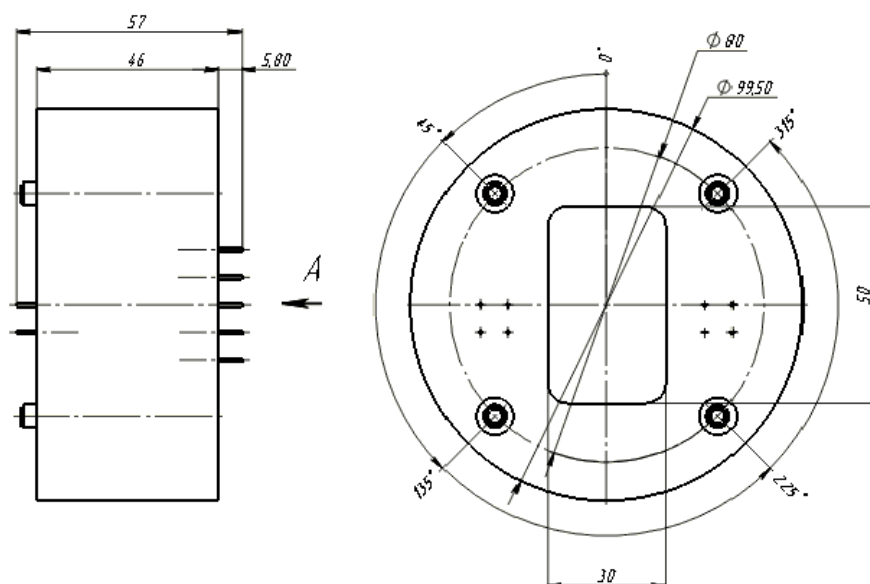


Рис. 2. Изделие

При демонтаже вставки (5) с крышкой (8) при помощи съемника (4), учитывая шаг резьбы съемника 2 мм и расстояние 56 мм, на которое нужно ввинчивать съемник до полного извлечения вставки с крышкой из готового изделия; а также силы трения, возникающей между вставкой и компаундом в момент перемещения вставки, исполнителю операции требуется приложить усилие и затратить время, соизмеримое со временем демонтажа всех остальных частей приспособления.

Для решения данной проблемы разработана автоматизированная система демонтажа пресс-форм (рис. 3).

Компоненты системы:

1. Пресс-форма (конструкция доработана);
2. Кронштейн.

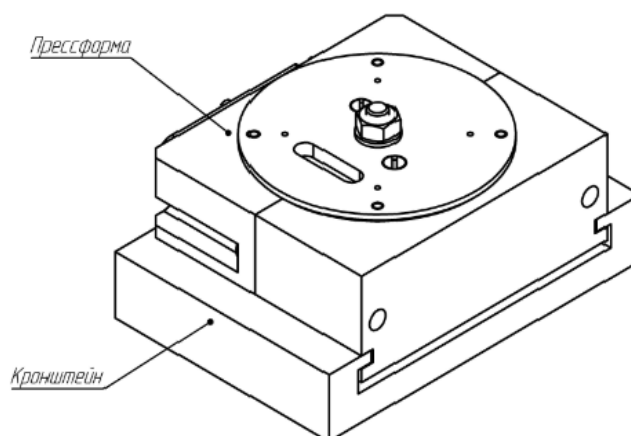


Рис. 3. Автоматизированная система демонтажа пресс-форм

Пресс-форма для заливки подверглась доработке, включающей следующие изменения (рис. 4):

1. Винт поз. 4 доработан, установлен в крышку поз. 9 и жестко на ней зафиксирован.
2. Винты поз. 1 заменены на установочные пальцы.
3. Введена гайка поз. 20, шайба поз. 21.
4. Верхний и нижний корпуса поз. 6, 7 приобрели технологические пазы 7x7 мм.
5. Вставка поз. 5 доработана (введены 2 ступенчатых отверстия, по контуру формообразующей поверхности введен уклон 1°).
6. Введены толкатели поз. 13.
7. Введены пружины поз. 14.

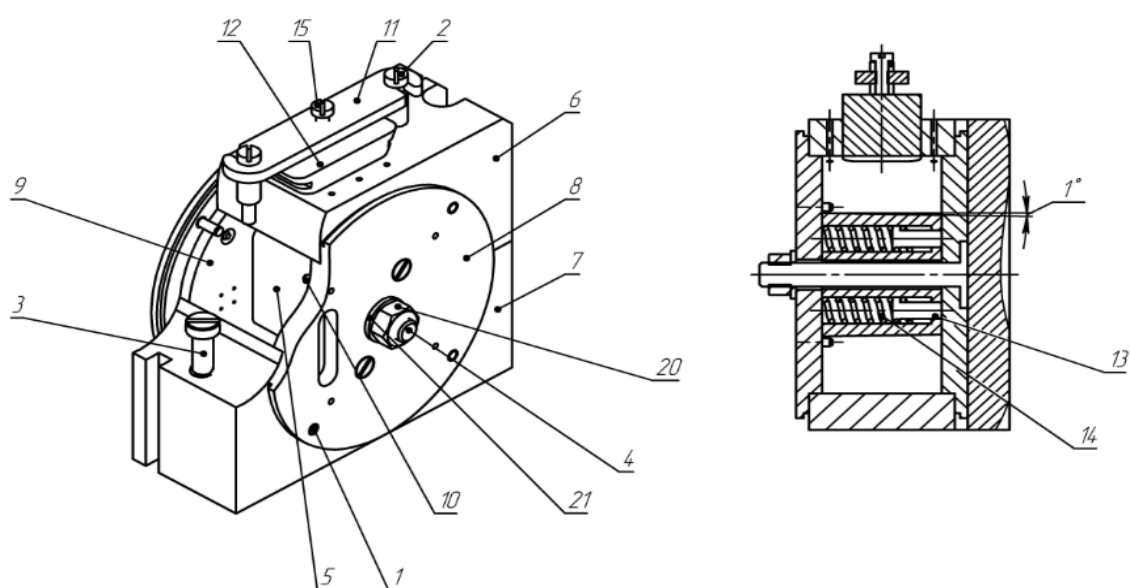


Рис. 4. Доработанная пресс-форма

Принцип действия системы автоматизированного демонтажа

Кронштейн жестко закреплен на рабочем месте заливщика компаундами. Пресс-форма пазами устанавливается в кронштейн. Далее рабочий свинчивает гайку поз. 20, в результате чего вставка поз. 5 с крышкой поз. 8 автоматически перемещаются вверх под действием толкателей 13 и пружин 14. После того как гайка поз. 13 полностью свинчена, вставка поз. 5 с крышкой поз. 8 легко извлекаются из формы.

В процессе разработки были произведены расчеты перемещения и усилия выталкивания при демонтаже, расчет и выбор пружин, расчет усилий зажима.

Также был произведен расчет основного времени для операции демонтажа пресс-формы исходного образца, и в составе разработанной системы демонтажа пресс-форм. Параметры, характеризующие результативность системы демонтажа, отражены в таблице.

Результативность системы автоматизированного демонтажа

Параметр	Исходный образец	Система автоматизированного демонтажа	Степень оптимизации, %
Ход выталкивания, L_{min} , мм	56	14	75
Усилие выталкивания, P_e , Н	405,7	285,18	30
Количество крепежных элементов типа винт-резьбовое отверстие, шт.	11	4	63
Время основное, $T_{осн}$, мин	1,849	0,577	68

По итогам работы получена система демонтажа, автоматизированная за счет сокращения количества резьбовых крепежных элементов, введения в конструкцию пресс-формы подпружиненных выталкивателей и технологических уклонов. Расчеты основного времени операции демонтажа показывают его сокращение на 68 %. Остальные расчетные показатели также оптимизированы. Применение предложенной системы автоматизированного демонтажа пресс-форм при полиуретановой заливке в производстве позволяет повысить производительность труда и сократить утомляемость работника, выполняющего операцию демонтажа.

Список использованных источников и литературы

1. Фридман, Е. И. Герметизация радиоэлектронной аппаратуры. – Москва : Энергия, 1978. – 360 с. : ил.
2. Басов, Н. И. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов : учебник для вузов / Н. И. Басов, В. Л. Брагинский, Ю. В. Казанков. – Москва : Химия, 1991. – 352 с. : ил.
3. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства / А. П. Достанко, В. П. Ланин, А. А. Хмыль, П. П. Ануфриев. – 2002. – С. 321.
4. Чеботарёв, М. И. Технология ремонта машин: учебное пособие / М. И. Чеботарёв, И. В. Масиенко, Е. Л. Шапиро ; под ред. М. И. Чеботарёва. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 352 с.
5. Корсаков, В. С. Сборка и монтаж изделий машиностроения. – 1983.
6. Ципорин, Ю. А. Механизмы технологической оснастки. – 1964. – 340 с.
7. Ермолаев В. В. Технологическая оснастка: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. – 4-е изд., стер. – Москва : Академия, 2015. – 256 с.

Сведения об авторе

Андрей Борисович Глухов, студент кафедры «Технология машиностроения металлорежущие станки и инструменты», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». (Россия, г. Сарапул), inroom85@gmail.com

СЕКЦИЯ № 10 ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК614.841:551.311/2(045)

Комплект сооружений по спасению населенных пунктов от лесных пожаров и речных паводков

Н. А. Перминов

Рассматривается вопрос составления в единый комплект предлагаемых технических сооружений для тушения ежегодных летних лесных пожаров, граничащих с расположенными вдали от рек населенными пунктами, и снижения разрушительных последствий воздействия паводковых вод, которому ежегодно подвергаются территории населенных пунктов, расположенных в поймах разливающихся рек.

Ключевые слова: лесной пожар, тушение, сила ветра, рельсы, генератор электроэнергии, трубопровод, вода, паводок, пойма реки, электронасос.

Set of structures for saving settlements from forest fires and river floods

N. A. Perminov

The issue of compiling into a single set of technical structures for extinguishing annual summer forest fires bordering settlements located far from rivers, and reducing the destructive consequences of the impact of flood waters to which the territories of settlements located in the floodplains of overflowing rivers are annually exposed.

Keywords: forest fire, extinguishing, wind force, rails, electricity generator, pipeline, water, flood, floodplain, electric pump.

В предлагаемом проекте мы пытаемся соединить решение двух значительных ежегодно повторяющихся проблем, стоящих перед службами, обеспечивающими техносферную безопасность РФ: снижение опасности разрушения населенных пунктов лесными пожарами и паводковыми водами рек таким образом, чтобы борьба с каждым из этих природных процессов взаимно дополняла и помогала другой. Сложность того и другого заключается в первом случае в нехватке, а во втором – избытке воды: и тот факт и этот заканчиваются катастрофически. Нехватке воды в количестве, необходимом для качественного и своевременного тушения лесного пожара, который подвергает опасности населенный пункт, затерянный среди тайги, когда воду приходится доставлять самолетами, и огромном избытке воды, которая затопляет значительные территории вместе с находящимися на ней населенными пунктами во время паводков на реках и других аналогичных бедствий. С лесными пожарами пытаются

ся бороться различными мобильными техническими средствами, от снабжения водой индивидуальных и машинных средств тушения до транспортирования людских ресурсов и оборудования к местам пожаров. Но территории пожаров огромны, а разливы рек значительны, и это связано со значительным, если не сказать большего, привлечением объемов денежных, технических и людских ресурсов.

В информационном поле технических разработок по этому вопросу с 2020 года есть информация о патенте № 2753330 Российской Федерации на изобретение автора «Способ снижения силы ветра на объекте при пожаре», где предлагается следующее: в пожароопасных лесных территориях вокруг населенных пунктов на некотором расстоянии прорубают просеки, вдоль которых сооружают стандартный рельсовый путь. На рельсы ставят несколько сцепленных между собой рельсовых платформ, на каждой размещают ветровой генератор электроэнергии, образуя всей конструкцией практически сплошную стену, являющуюся препятствием для продвижения фронта огня. Вдоль рельсовой трассы также заранее проложен трубопровод с водяными электронасосами, имеющими возможность питания электроэнергией от ветровых генераторов и подсоединения к пожарным шлангам с брандспойтами [1]. Применение ветровых генераторов электроэнергии аналогичной конструкции для перемещения на железнодорожных платформах описано в патенте № 2008519 Российской Федерации на изобретение российского учёного В. П. Овечкина «Устройство для преобразования электроэнергии», где предлагается использовать их для выработки электроэнергии для населенного пункта, вокруг которого проложен рельсовый путь [2].

Наш проект предлагает использовать такое сооружение также и для перекачки воды по сооруженному заранее трубопроводу, проложенному от места ее забора, так как наличие трубопровода с водяными электронасосами, имеющими возможность питания электроэнергией от ветровых генераторов, вблизи пожара помогает в его тушении, если на участке пожара нет стационарных источников воды и электроэнергии.

Что касается паводковых вод и в случаях других водных катаклизмов, то для находящихся в опасности населенных пунктов в настоящее время из всех средств и способов спасения существуют только меры по подготовке к этим ЧС, такие как эвакуация и частичная защита нижних этажей зданий. К такой защите относится конструкция, описанная в статье автора, где сообщается о возможности уберечь нижний этаж здания от воздействия паводковых вод при помощи полиэтиленового рукава, в который перед паводком как в пакет оборачивают здание со стороны почвы и развешивают по стенам на высоту, большую уровня воды [3].

Наш проект предлагает создавать сооружения защиты от паводковых вод в более широких масштабах: не для отдельных зданий, а всего населенного пункта одновременно. В местах, располагаемых от населенного пункта вверх по течению реки, сооружать гидротехнические заборники воды с производительностью, позволяющей во время паводка снижать ее уровень до приемлемого.

Такие сооружения должны быть снабжены электронасосами и фильтрами для очистки паводковых вод от мусора и песка, чтобы складировать запасы водой на случаи пожаров.

Учитывая огромные расстояния между местами расположения заборников воды и районами тушения лесных пожаров, а также сезонную периодичность лесных пожаров и паводков на реках, проект предлагает на бескрайних просторах тайги ближе к возможным местам возгораний сооружать искусственные пруды, например в природных низинах, для аккумуляирования водных запасов и поддерживать их постоянно в требуемых количествах, закачивая в паводковый период воду из рек и расходуя ее по мере надобности во время пожаров. Для этого от мест на реках, где предвидится паводок, сооружают соответствующие трубопроводы до мест аккумуляирования водных запасов с искусственными прудами, а от них – в критические районы лесных пожаров до участков с просеками около населенных пунктов, где сооружены заранее железнодорожные пути, на которых установлены рельсовые платформы с ветровыми генераторами электроэнергии, которая потребуется для перекачки воды и работы электронасосов и заборных сооружений на реках. Наличие такого комплекса сооружений создаст возможность если не аннулировать полностью оба изложенные выше вида ЧС, то как минимум снизить до безопасных пределов их воздействие на населенные пункты, находящиеся в зонах лесных пожаров и речных паводков.

Список использованных источников и литературы

1. Патент на изобретение № 2753330 Российская Федерация, МПК А62С 99/00 (2010.01). Способ снижения силы ветра на объекте при пожаре: № 2020117047: заявл. 25.05.2020: опубликовано 13.08.2021. Бюл. № 23 / Перминов Н. А.; заявитель УдГУ. – 4 с.
2. Патент на изобретение № 2008519 Российская Федерация, МПК F03D 5/04 (1990.01) Устройство для преобразования электроэнергии: № 4840842/06: заявл. 15.03.1990: опубликовано 28.02.1994. Бюл. № 4 / Овечкин В. П.; заявитель. – Овечкин В. П. – 6 с.: ил.
3. *Перминов, Н. А.* Способ обеспечения безопасности здания от паводка // Менеджмент безопасности жизнедеятельности: перспективы развития и проблемы преподавания : сб. материалов IV отк. Республ. науч.-практ. интернет-конф. (13 дек. 2022 г.) / гл. ред. А. В. Ключников ; отв. ред. Л. И. Буякевич. – Гомель : Изд-во УГЗ, 2023. – С. 94–95.

Сведения об авторе

Николай Алексеевич Перминов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), na_perminov@mail.ru

СЕКЦИЯ № 11 ЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 346.26

Формирование индивидуальной предпринимательской активности молодого человека в новых социально-экономических реалиях

О. Н. Шилыева

В статье поднимаются вопросы формирования компетенций будущего у молодого человека – выпускника высшего учебного заведения. Исследуются текущие изменения в социально-экономической формации страны. На основе анализа определений предпринимательства дается авторское определение предпринимательской деятельности.

Ключевые слова: молодежь, предприниматель, предпринимательская деятельность, предпринимательская активность, профессиональное самоопределение, финансовая стабильность.

Training for individual entrepreneurial activity of a young person in a new socio-economic reality

O. N. Shilyaeva

The article raises issues how to develop skills of the future in a young person graduating from university. The current changes in socio-economic formation of our country are explored. The author's definition of entrepreneurial activity, based on different definitions of entrepreneurship, is given.

Keywords: the youth, entrepreneur, entrepreneurial practice, entrepreneurial activity, professional self-determination, financial stability.

Формирование у молодежи трудовой мотивации, активной жизненной и профессиональной позиции, обучение основным принципам построения профессиональной карьеры и навыкам поведения на рынке труда – одна из целей образования, установленная Постановлением Правительства от 4 октября 2000 г. № 751 в Национальной доктрине образования в Российской Федерации на период до 2025 года.

Формирование индивидуальной предпринимательской активности молодого человека обусловлено объективной необходимостью подготовки молодежи к жизни в новых социально-экономических реалиях.

Социально-экономические и научно-технические изменения, происходящие в мире и нашей стране в связи со сложной политической обстановкой, высокой

долей глобальной неопределенности, требуют совершенствования мышления и компетенций молодежи.

Целью образовательного процесса становится развитие у обучающихся способности к самоопределению в динамических условиях, к осознанному личностному росту в условиях преодоления неопределенности и новых социально-экономических вызовов.

Наша главная задача – воспитать поколение, адаптированное и гибкое к реалиям будущего.

Одна из возможностей создать основу финансового благополучия подрастающего поколения в условиях риска и неопределенности – сформировать индивидуальный интерес к предпринимательской деятельности. На Западе, как известно, с ранних лет детей приучают мыслить категориями прибыли, выгоды, бизнеса. В нашей стране это направление до сих пор остается недостаточно развитым.

В условиях изменения в России общественно-экономической формации, повышения риска неопределенности в мире, переход экономики на цифровую, изменения условий и форм рабочих мест неизбежно меняется характер труда и, следовательно, формы и методы подготовки обучающихся к самостоятельной жизни.

От современного выпускника высшего учебного заведения требуются, во-первых, способности к профессиональному самоопределению и осуществлению деятельности в динамичном мире, во-вторых, умение проводить объективный анализ меняющейся социально-экономической ситуации, постоянный напряженный труд для поддержания финансовой стабильности.

Очевидно, что необходима планомерная долгосрочная работа по формированию предпринимательской активности российской молодежи. Речь идет о подготовке поколения, способного не только финансово обеспечить себя, но также наращивать производственно-технологические, финансово-экономические, духовно-культурные ресурсы страны.

Кризисные ситуации – пандемия COVID-19, специальная военная операция на Украине – убедительно показали нам, что одних только знаний в области экономики и финансов недостаточно. Требуется планомерное формирование способностей личности к проектной деятельности, умение оперативно корректировать планы, мотивация к наращиванию новых компетенций, способность прогнозировать кратко- и долгосрочные последствия принятых решений.

Сегодня созрела необходимость готовить молодых людей к гораздо более быстрым экономическим, политическим, технологическим и социальным переменам, чем когда-либо прежде, к профессиям и деятельности, которые еще даже не созданы, к применению технологий, которые еще не изобретены, к решению проблем, которые сегодня невозможно даже предсказать.

Слова «предприниматель», «предпринимательская деятельность», «предпринимательские компетенции» все чаще используются в методических материалах системы образования, учебниках и учебных пособиях. Однако до сих пор нет точного определения этих понятий. Между тем такое определение необхо-

димо. Невозможно создать эффективную систему подготовки обучающихся без определения базовых понятий.

В истории слово «предприниматель» прошло следующие последовательные стадии:

- 1) организатор парадов и музыкальных перформансов;
- 2) лицо, ответственное за выполнение крупномасштабных идей;
- 3) лицо, действующее в условиях риска;
- 4) лицо, заключившее государственный контракт с заранее оговоренной стоимостью;
- 5) человек, создающий что-либо новое [1].

О возникновении предпринимательства в его классическом смысле можно говорить, начиная с эпохи первоначального накопления капитала, а далее – после возникновения и развития капитализма.

Развитие предпринимательства как деятельности индивида происходит в эпоху перехода от меркантилизма к капитализму. Наиболее значимым произведением в области предпринимательства в этот период стал труд М. Вебера «Протестантская этика и дух капитализма». Запрещенное ранее ростовщичество стало допустимым при условии, что оно осуществлялось на благо бизнеса. Появился культ труда и аскетизма, которые, по мнению многих экономистов, стали основным толчком к первоначальному накоплению капитала, что в свою очередь послужило одной из причин промышленного переворота и развития капитализма.

Первые теоретические представления о сущности предпринимательства в рыночных (капиталистических) реалиях можно найти в труде А. Смита «Исследование о природе и причинах богатства народов».

Основная черта предпринимателя, согласно точке зрения А. Смита, – индивидуализм. Ориентация индивида на личную выгоду приводит к большей общественной выгоде. Такую неизбежную общественную выгоду Смит объяснял действием «естественного» закона, а также склонностью людей к обмену. Смит увязывает предпринимательство с теорией спроса и выражает их через понятие общественной полезности. Он утверждает, что доход предпринимателя прямо пропорционален общественной полезности.

Множество определений понятий – «предпринимательство» и «предпринимательская деятельность», – предлагаемых современными отечественными и зарубежными учеными, основываются на более ранних и часто не содержат личностную составляющую. Как правило, позиция ученых, занятых исследованием подобных определений, не совпадает с видением собственно предпринимателей. Вследствие чего из поля их зрения ускользает, например, тот факт, что предприниматель много времени уделяет планированию и проектированию будущей деятельности, работе в идеальном плане.

Другой факт, не рассматриваемый и не находящий отражения в современных определениях понятий «предпринимательство», «предпринимательская деятельность», – это условие наличия или отсутствия духовности, веры.

Предприниматель – это тот, кто идет на риск, создавая новую организацию или внедряя новую идею продукта, работы или услуги. Именно этот риск и

придает всей деятельности настоящего предпринимателя ни с чем не сравнимую привлекательность игры.

Под предпринимательской деятельностью мы предлагаем понимать следующее. Это проектно-практическая деятельность индивида, направленная на создание необходимой обществу продукции (работ, услуг) с целью получения прибыли, осуществляемая в контексте высокой нравственной культуры и общечеловеческих ценностей.

Быть предпринимателем – значит успешно проектировать и претворять в жизнь созидательные идеи, достигать в этой деятельности на свой страх и риск реальных позитивных результатов. Именно такие идеи необходимо формировать у представителей современной молодежи, желающих стать предпринимателями. Только такие ценности приведут молодого человека к успеху в новых социально-экономических условиях, позволят наращивать не только научно-технологические, но и духовно-культурные ресурсы страны.

Список использованных источников и литературы

1. *Галиев, Ж. К.* Планирование коммерческой деятельности. Бизнес-планирование : учебник / Ж. К. Галиев, Н. В. Галиева. – Москва : Издательский Дом МИСиС, 2020. – С. 89–95.
2. *Звягинцев, С. А.* Бизнес с нуля. Как заявить о себе на рынке? : практическое пособие. – Москва : Дашков и К, Ай Пи Эр Медиа, 2021. – С. 54–62.
3. *Оверби, Х.* Цифровая экономика: как информационно-коммуникационные технологии влияют на рынки, бизнес и инновации / Х. Оверби, Я. -А. Одестад ; перевод И. М. Агеева, Н. В. Шилова ; под ред. М. И. Левина. – Москва : Дело, 2022. – С. 147–153.

Сведения об авторе

Ольга Николаевна Шилиева, ст. преподаватель кафедры «Математика и информатика», ФГБОУ ВО «Глазовский государственный инженерно-экономический университет имени В. Г. Короленко» (Россия, г. Глазов), o.shiliaeva@mail.ru

Развитие инвестиционной составляющей экономики Республики Беларусь

Т. Г. Нечаева, Т. А. Бородич, О. Г. Гудыно

В современной экономике социально-экономическое развитие территорий зависит от инвестиционной активности. Для выявления тенденций развития экономики Республики Беларусь с позиции инвестиционной составляющей проанализируем соответствующие статистические данные за период с 2021 по 2022 год.

Ключевые слова: инвестиции, инвестиционный климат, развитие экономики, преференциальные режимы.

Development of the investment component of the economy of the Republic of Belarus

T. G. Nechaeva, T. A. Borodich, O. G. Gudyno

In the modern economy, the socio-economic development of territories depends on investment activity. To identify trends in the development of the economy of the Republic of Belarus from the perspective of the investment component, we will analyze the relevant statistical data for the period from 2021 to 2022.

Keywords: investments, investment climate, economic development, preferential regimes.

В Республике Беларусь инвестиции носят как государственный, так и частный характер, о чем свидетельствует финансирование на уровне развития государственных программ и рост частных предприятий, импортозамещение, развитие СЭЗ, применение новых технологий и выпуск новых видов продукции.

Финансирование Государственной инвестиционной программы в республиканском бюджете 2021 года [1] и 2022 года [2] представлено в табл. 1.

Таблица 1. Финансирование Государственной инвестиционной программы в республиканском бюджете в 2021 и 2022 году

Финансирование	2021 год	2022 год
Всего, млн руб.	664,17	694,9
в том числе фонд национального развития, млн руб.	105,2	105,2
целевые расходы, млн руб.	159,47	163,2

Бюджет направлен:

1) на строительство социально значимых объектов, общежитий для студентов государственных учреждений высшего образования, капитальных строений (зданий, сооружений) государственного специализированного ле-

сохозяйственного учреждения «Боровлянский спецлесхоз», станций обезжелезивания воды, инфраструктуры для БелАЭС, республиканских автомобильных дорог;

2) финансирование важнейших инвестиционных проектов. К важнейшим инвестиционным проектам относится строительство индустриального парка, авиаремонтного завода, инженерной и транспортной инфраструктуры СЭЗ;

3) мелиорацию.

Как видно из выше приведенных данных, инвестиции по государственным программам решают стратегические цели общества.

Иностранные инвестиции в экономическую деятельность Республики Беларусь за период 2021/22 года представлены в табл. 2 [3].

Таблица 2. Иностранные инвестиции в экономическую деятельность Республики Беларусь

Инвестиции	2021 год	2022 год	Темп прироста, %
Прямые	6 557 965,6	5 959 297,6	–9,13
Портфельные	4 349,0	1 270,1	–70,8
Прочие	2 136 337,9	1 018 044,9	–52,35
Всего	8 698 652,5	6 978 612,6	–19,77

За 2 года произошло сокращение иностранных инвестиций в экономику Республики Беларусь, что указывает на отрицательную тенденцию развития мирового рынка с учетом экономико-политической нестабильности.

Национальное агентство инвестиций и приватизации Республики Беларусь выделяет следующие преимущества при вложении инвестиций в страну [4]:

- 1) стратегически выгодное местоположение;
- 2) квалифицированные трудовые ресурсы;
- 3) прямой доступ к рынку 5 стран ЕАЭС;
- 4) достойное качество жизни;
- 5) благоприятный налоговый климат;
- 6) развитая логистическая инфраструктура.

В Беларуси действует ряд преференциальных режимов, предоставляющих значительные налоговые и иные льготы для иностранных компаний. Места, где действуют преференциальные режимы, и их характеристики представлены в табл. 3.

Республика Беларусь имеет развитую логистическую инфраструктуру. Здесь широкая сеть автомобильных, железнодорожных и воздушных путей. Беларусь пересекают 2 трансевропейских транспортных коридора: «Север-Юг» и «Восток-Запад». Пролегающие магистрали – это важнейший элемент европейской транспортной системы.

Изменение объема инвестиций в основной капитал в 2021 и 2022 году представлено в табл. 4 [3].

Таблица 3. Преференциальные режимы

Свободные экономические зоны (СЭЗ)	Налог на прибыль, земельный налог, налог на недвижимость, НДС, ввозные таможенные пошлины равны 0 %
Индустриальный парк «Великий камень»	НДС и оффшорный сбор равны 0 %
Парк высоких технологий (ПВТ)	Налог на прибыль, НДС и оффшорный сбор равны 0 %
Малые и средние города, сельская местность	Налог на прибыль, налог на недвижимость, НДС, ввозные таможенные пошлины равны 0 %
Юго-восточный регион Могилёвской области	Подходный налог равен 10% в течение 7 лет со дня начала деятельности
ОЭЗ «Бремино-Орша»	Налог на прибыль, налог на недвижимость, подходный налог, налог на дивиденды равны 0 %
Инвестиционный договор	НДС, таможенные пошлины и НДС при ввозе оборудования равны 0 %

Таблица 4. Темп прироста инвестиций в основной капитал

Территория Республики Беларусь	Темп прироста, %			
	Всего по формам собственности	государственная собственность	частная собственность	иностранная собственность
Республика Беларусь	–8,31	–2,6	–10,56	–22,29
Брестская область	1,16	–2	1,06	52,44
Витебская область	–16,73	–9,67	–22,75	–25,78
Гомельская область	–8,54	1,92	–17,85	–11,18
Гродненская область	–3,88	–7,76	3,34	–11,56
г. Минск	–9,68	1,18	–22,56	–4,74
Минская область	–12,29	–6,02	–7,88	–54,01
Могилевская область	–2,12	6,46	–3,35	–33,52

Исходя из данных табл. 4, в 2022 году инвестиции в основной капитал по республике уменьшились. Возросли инвестиции в основной капитал в Брестской области, а значительно убыли – в Витебской области. В Брестской области на 52,44 % увеличились инвестиции в иностранную собственность. На 3,34 % увеличились инвестиции в частную собственность в Гродненской области и на 1,06 % – в Брестской области.

Инвестиции в государственную собственность увеличились в Гомельской области (1,92 %), в Минске (1,18 %) и в Могилёвской области (6,46 %). Приведенные данные указывают на отток средств из реального сектора экономики за счет различных факторов, таких как привлекательность бизнеса, стабильность экономического развития, политическая обстановка на мировой арене, партнерство и т. д.

Тенденция и динамика развития инвестирования средств, например, с одной стороны, указывает на регресс в развитии экономики, а с другой – на рост частных инвестиций в приграничных областях, на снижение конкуренции со стороны зарубежных фирм и уход их с белорусского рынка, что освободило нишу на рынке и позволило осуществить импортозамещение. Другими словами, отток иностранного капитала заставляет экономических субъектов региона решать проблемы и изыскивать резервы для поддержки экономики страны.

Отрицательная динамика по инвестиционной составляющей в экономике страны с позиций движения капитала в практике экономического развития оценивается отрицательно, но динамика изменения других показателей по совокупности свидетельствует об оживлении экономики, поскольку иностранный капитал и открытость рынка вытесняют частный малый бизнес с внутреннего рынка из-за его неконкурентоспособности по фактору масштаба деятельности. Оживление малого бизнеса позволяет поступенчато достичь приоритетов развития в долгосрочном периоде.

Список использованных источников и литературы

1. Бюджет Республики Беларусь для граждан / Министерство финансов Республики Беларусь. – Минск, 2021. – URL: <https://www.minfin.gov.by/upload/bp/budget/budget2021.pdf>.
2. Бюджет Республики Беларусь для граждан / Министерство финансов Республики Беларусь. – Минск, 2022. – URL: <https://www.minfin.gov.by/upload/bp/budget/budget2022.pdf>.
3. Национальный статистический комитет Республики Беларусь / Республиканский орган государственного управления в области государственной статистики. – Минск, 2023. – URL: <https://www.belstat.gov.by>.
4. Национальное агентство инвестиций и приватизации Республики Беларусь / Министерство экономики Республики Беларусь. – Минск, 2021. – URL: <https://investinbelarus.by/why-belarus>.

Сведения об авторах

Татьяна Георгиевна Нечаева, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Логистика и организация производства», Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилев), tanjabor11@gmail.com

Татьяна Анатольевна Бородич, старший преподаватель кафедры «Логистика и организация производства», Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилев), tanjabor11@gmail.com

Оксана Геннадьевна Гудыно, студент, Белорусско-Российский университет (Республика Беларусь, г. Могилев), ok1oksanagud@gmail.com

Повышение эффективности деятельности РУП «Белоруснефть-Витебскоблнефтепродукт»

Е. И. Бекиш, О. В. Алепкина, Е. Е. Мантур

При изучении деятельности организации выявлено, что она в течение ста лет реализует нефтепродукты. Конкурентным преимуществом является продажа широкого ассортимента сертифицированной нефтяной продукции. Ведется модернизация автозаправочных станций, где заряжают электромобили. Небольшая текучесть кадров повышает эффективность их труда.

Ключевые слова: эффективность, деятельность, конкуренция, нефтепродукты, реализация, логистика, услуг сервиса.

Improve Operational Efficiency of Belarusneft-Vitebskoblnfteproduct Company

E. I. Bekish, O. V. Alepkina, E. E. Mantur

When studying the activities of the organization, it was revealed that it has been selling oil products for a hundred years. The competitive advantage is the sale of a wide range of certified petroleum products. Gas stations where electric cars are charged are being modernized. Low staff turnover increases their efficiency.

Keywords: efficiency, activity, competition, oil products, sales, logistics, service services.

Особое внимание в условиях глобализации мировой экономики в Республике Беларусь уделяется поиску путей совершенствования по использованию и реализации нефтепродуктов. Суммарные инвестиции в реализацию стратегии развития нефтехимического комплекса до 2030 года оцениваются в \$8,8 млрд. [1].

Наличие таких сырьевых ресурсов обеспечивает государству формирование за счет их национального дохода.

Объем добычи нефти в Белоруссии в 2022 г. составил 1,81 млн т. В 2022 г. получен прирост запасов нефти в 2,15 млн т. Добыча нефти в 2022 г. стала рекордной для Белоруссии за последние 20 лет. По сравнению с 2021 г., когда в стране было добыто 1,737 млн т нефти, показатель вырос на 4,2%. При этом в 2022 г. получен прирост запасов нефти в 2,15 млн т, что на 390 тыс. т больше, чем в 2021 г. [2].

Нефть и ее продукты входят в основные товарные группы, составляющие экспортный потенциал Беларуси. Организации концерна «Белнефтехим» формируют почти 20 % промышленной продукции Республики Беларусь и около 25 % экспорта товаров (с учетом экспорта нефти и ее продуктов в целом по республике). Они приносят 20 % поступлений в бюджет по налогам и сборам

при производстве свыше 500 видов нефтехимических и химических продуктов, которые поставляются более чем в 100 стран мира [3].

Цель исследований – проведение оценки и анализа эффективности деятельности РУП «Белоруснефть-Витебскоблнефтепродукт» для определения направлений ее повышения.

В процессе исследований использовались документы бухгалтерской и статистической отчетности, показатели производственно-хозяйственной деятельности предприятия, размещенные на электронных информационных ресурсах и в печатных изданиях.

Основная часть

РУП «Белоруснефть-Витебскоблнефтепродукт» стремится занимать ведущие позиции на рынке нефтепродуктов. Компания в феврале 2023 г. отметила столетие своего существования. За этот период времени она прошла ряд реорганизаций. С 2005 г. входит в состав структуры ПО «Белоруснефть», куда включены еще 7 областных предприятий страны по нефтепродуктообеспечению. В течение столетнего периода организация обеспечивает своих клиентов нефтепродуктами.

Основная задача деятельности компании состоит в получении наибольшей финансовой прибыли, которая будет в дальнейшем использована для расширения производства и повышения эффективности финансово-хозяйственных результатов [4].

Одним из основных видов деятельности предприятия является торговля нефтепродуктами, которую осуществляет через сеть автозаправочных станций, а также склады хранения нефтепродуктов и мини-наливные терминалы, расположенные в г. Витебске и Витебской области.

На балансе предприятия находятся 73 автозаправочные станции, 5 складов хранения нефтепродуктов, 27 объектов общественного питания, в том числе кафетерии, мини-кафе, а также кафе с полным циклом приготовления пищи и ресторанным меню, 2 мойки автомобилей [5].

Маркетинг и логистика в компании применяются для повышения конкурентоспособности производимой продукции. Они постоянно взаимодействуют между собой, в первую очередь, в системе сбыта предприятия [6].

Одним из существенных конкурентных преимуществ продаваемых продуктов организации является значительное разнообразие их ассортимента.

Предприятием предлагается широкий ассортимент нефтепродуктов на внутреннем рынке Республики Беларусь, который составляет основную часть объема продаж и является общим для компаний в обеспечении нефтепродуктов концерна «Белнефтехим».

Конкурентоспособность относится к показателям, которые могут характеризовать результативность производственной деятельности компании. Неконкурентоспособное предприятие не может считаться эффективным.

Чтобы повысить конкурентоспособность и осваивать новые рынки в зарубежных странах, продукция компании сертифицирована [7].

Реализуемые неэтилированные бензины и дизельное топливо экологического класса К5 соответствуют требованиям европейского стандарта «Евро-5» и

Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту»; масла, смазки, специальные жидкости соответствуют требованиям ТР ТС 030/2012 «О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям» [8].

Реализацию нефтепродуктов производят, как со складов их хранения, так и на АЗС, ПАЗС и мини-терминалах.

В настоящее время на всех АЗС отпускаются нефтепродукты за наличный и безналичный расчет. Для удобства клиентов на всех заправочных станциях используется система «АЗС-Сервис», действующая по всей территории Белоруссии, а также на некоторых АЗС России и Польши.

На информационном ресурсе «Белоруснефти» <https://www.belorusneft.by> для всех потребителей постоянно доступна информация о наличии реализуемой продукции и ценах на нее. Здесь же на сайте можно узнать новости и события нефтяной отрасли и Беларуси.

Одно из главных направлений эффективного развития организации – совершенствование логистики нефтепродуктов. С этой целью осуществлена централизация технологического транспорта предприятия по нефтепродуктообеспечению.

Для совершенствования логистической и производственной деятельности предприятие использует цифровую трансформацию, внедряя автоматизацию процессов на АЗС. Для эффективной работы производственных процессов и мониторинга за движением нефтепродуктов в компании функционирует «система электронного взаимодействия для предприятия с территориально-распределенной структурой».

Среди мероприятий, повышающих эффективность работы организации с потребителями, осуществляется переход на электронные товарно-транспортные накладные при реализации нефтепродуктов, т. е. предоставление услуги электронного документооборота. Специалисты компании для своих пользователей постоянно осуществляют поддержку по возникающим вопросам использования программного обеспечения в формате 24/7.

Среди преимуществ предприятия – близость транспортных коммуникаций, которая дает возможность без проблем быстро поставлять нефтепродукты потребителям Витебской области. Наличие в требуемом количестве нефтепродуктопроводов и близость расположения ОАО «Нафтан» способствуют своевременному обеспечению ресурсами нефтепродуктов.

Чтобы более рационально и эффективно исполнять свою работу, предприятие проводит модернизацию старых автозаправочных станций. Учитывая новые мировые тенденции развития рынка электромобильного транспорта, дополнительно устанавливают многофункциональные комплексы с зарядными устройствами для электромобилей. Это позволит обеспечить комфортное и беспрепятственное движение по всей территории республики электромобилей, которым все больше отдают свое предпочтение водители транспортных средств.

Новые и после реконструкции современные станции способны предоставлять максимум разных услуг и даже для людей с ограниченными возможностями.

В частности, на этих станциях могут проводить подкачку шин, чистку ковров, делать уборку в салоне пылесосом.

При этом на станциях имеются магазины с самыми разнообразными необходимыми сопутствующими товарами, а также работают кафе с полным циклом приготовления еды, где клиенты могут отдохнуть, выпить кофе, попробовав выпечку собственного производства.

Реализация сопутствующих товаров и продукции общественного питания и оказание дополнительных услуг сервиса значительно увеличивают прибыль и обеспечивают достойную конкуренцию организации на рынке сбыта нефтепродуктов.

Особое внимание в стратегии развития компании уделяется эффективности труда коллектива.

Здесь работает почти 1100 человек. На предприятии организована круглосуточная работа, без перерывов и выходных. Для перехода на цифровизацию в компании для повышения профессиональной квалификации работники постоянно проходят переподготовку.

Для работников предоставляется значительный социальный пакет, что стимулирует всех работать с полной отдачей, выполняя добросовестно свои обязанности. В итоге текучесть кадров небольшая, создаются новые рабочие места, что способствует развитию не только самой организации, но и Витебской области.

Заключение

При исследовании выявлено, что для повышения конкурентоспособности компания предлагает широкий ассортимент продукции, качество которой подтверждено сертификатами.

Установлено, что в совершенствовании деятельности используется цифровая трансформация, проводится модернизация автозаправок.

Увеличению прибыли способствует реализация сопутствующих товаров и оказание сервиса услуг.

Небольшая текучесть кадров повышает квалификацию и эффективность их труда.

Таким образом, с помощью использования современного оборудования и перехода на электронный документооборот при минимальных затратах с высокой скоростью будет доставляться топливо от поставщика к потребителям, что приведет к повышению эффективности функционирования РУП «Белоруснефть-Витебскоблнефтепродукт».

Список использованных источников и литературы

1. «Белнефтехим» оценивает в 8,8 млрд долларов... – URL: <https://belchemoil.by/news/oficialno/belneftehim>.
2. 20-летний максимум. – URL: <https://neftegaz.ru/news/dobycha>.
3. О стратегии развития нефтехимического комплекса до 2030 года. – URL: <https://belchemoil.by/news/tehnologii-i-trendy>.

4. *Бекиш, Е. И.* Использование логистики для повышения эффективности деятельности организации / Е. И. Бекиш, Е. Е. Мантур // Право. Экономика. Психология. – 2023. – № 1 (29). – С. 28–33.

5. Сто лет качества. – URL: <https://www.belorusneft.by/sitebeloil/.content/images/newspaper/2023/39>.

6. *Бекиш, Е. И.* Значение интеграции маркетинга и логистики в условиях конкуренции / Е. И. Бекиш, О. А. Брагина, Е. Е. Мантур // Право. Экономика. Психология. – 2022. – № 3 (27). – С. 60–64.

7. *Бекиш, Е. И.* Эффективность деятельности ОАО «Витебский завод тракторных запасных частей» / Е. И. Бекиш, Е. Е. Мантур // Право. Экономика. Психология. – 2023. – № 2 (30). – С. 80–85.

8. ПО «Белоруснефть». – URL: <http://www.belorusneft.by>.

Сведения об авторах

Евгений Иванович Бекиш, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры экономики и информационных технологий УО «Федерации профсоюзов Беларуси» «Международный университет «МИТСО», Витебский филиал (г. Витебск, Республика Беларусь), bekish_e@tut.by

Ольга Владимировна Аленкина, студент ФЗО УО «Федерации профсоюзов Беларуси» «Международный университет «МИТСО», Витебский филиал (г. Витебск, Республика Беларусь), rezck.olga@yandex.by

Елена Евгеньевна Мантур, кандидат филологических наук, доцент УО «Белорусский национальный технический университет» (Республика Беларусь, г. Минск), E_Mantur@tut.by

СЕКЦИЯ № 12 ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

УДК 378.147

Важность метакогнитивных навыков у студентов инженерных специальностей и роль преподавателя в их формировании

Е. А. Алфёрова

В работе рассмотрена важность формирования и развития метакогнитивных навыков у студентов в системе высшего образования, показаны возникающие проблемы. Приведен фреймворк для поддержки саморегулируемого обучения, а также показана роль преподавателя в формировании метакогнитивных навыков у студентов.

Ключевые слова: метакогнитивные навыки, роль педагога, модель метамышления, самообучение.

The importance of metacognitive skills in engineering students and the role of the teacher in their formation

E. A. Alferova

The paper considers the importance of the formation and development of metacognitive skills among students in the system of higher education, and shows the problems that arise. A framework to support self-regulated learning is provided, and the role of the teacher in the formation of metacognitive skills in students is shown.

Keywords: metacognitive skills, teacher's role, metathinking model, self-learning.

Современный мир требует у человека постоянного обучения и получения новых компетенций. ФГОС РФ содержит требования к формированию универсальных компетенций профессионального саморазвития и самообучения в процессе подготовки студентов инженерных специальностей. Наличие и высокий уровень развития метакогнитивных навыков (МН) являются ключом к дальнейшему самостоятельному профессиональному саморазвитию инженера. Формальное образование в рамках программ бакалавриата, магистратуры и специалитета должно заложить и развить соответствующие компетенции у студента.

Однако реальная ситуация такова, что многие студенты и преподаватели с пренебрежением относятся к развитию универсальных компетенций. И что еще хуже, совершенно не понимают, что такое МН и как они могут помочь студентам в их академической жизни и инженерам в их профессиональном развитии.

Цель настоящей работы – рассмотреть основные компоненты МН, описать фреймворк для поддержки саморегулируемого обучения, а также обозначить роль и значимость педагога в формировании и развитии МН у студентов.

Метапознание было определено американским психологом Дж. Флавеллом (John H. Flavell) как «процесс размышление о собственном мышлении» [1]. Процесс метапознания включает в себя такие метакогнитивные навыки, как планирование/выбор стратегии обучения, отслеживания/оценивание результатов, корректировка действий. Именно эти навыки становятся ключевыми в контексте самообразования и развития.

Основными компонентами метапознания являются [2]:

1. Убеждения. Декларативные, процедурные и условные знания и представления о том, как человек учится. Знания и убеждения о МН могут очень сильно влиять на процесс обучения и самообучения, например, обуславливать выбор стратегии обучения, или вера в то что ежедневное повторение теста позволит сдать экзамен, или в то что после N лет научиться новому нельзя.

2. Отслеживание/мониторинг и оценка процесса обучения и успеваемости.

3. Контроль и регулирование процесса обучения, например, выбор когда и что изучать, какой трудный материал нужно проработать дополнительно, а какой уже освоен и не нужно больше тратить на него времени.

Очевидно, что убеждения оказывают влияние на мониторинг и контроль. Это влияние может быть как положительным, когда человек знает различные стратегии обучения, условия, при которых их лучше применять, знает основы работы памяти и как он должен использовать особенности памяти для успеха в обучении. Так и отрицательным, когда человек не знаком с эффективными стратегиями обучения или неверно понимает работу памяти и мозга при обучении. Одним из типичных примеров такого негативного влияния убеждений является приверженность студентов к использованию стратегии многократного перечитывания материала зачастую даже в течение одного дня, к которой они привыкли со времен школьной скамьи. Со стороны преподавателя такими отрицательными примерами могут служить требования дословно записывать лекцию или дословно «зубрить» материал.

Таким образом, убеждения – это важнейшая сфера, где роль педагога может быть очень влиятельной (положительной или отрицательной). Преподаватель высшего образования должен иметь представления о том, как протекают процессы запоминания, удержания и воспроизведения информации у человека, знать правильные стратегии обучения и применять их на своих занятиях.

В работе [3] предлагается фреймворк для поддержки саморегулируемого обучения, который включает следующие части:

1. Знания о существующих эффективных стратегиях обучения.
2. Убеждения, что эти стратегии работают.
3. Обещание использовать эти стратегии.
4. Планирование, как стратегии будут внедряться.

В таблице рассмотрены возможные варианты, как преподаватель может формировать и развивать МН студентов в рамках фреймворка, описанного выше.

Таблица 1. Роль преподавателя в формировании МН у студентов

Часть фреймворка	Роль преподавателя
Знания о существующих эффективных стратегиях обучения	Предоставление знаний о существующих стратегиях обучения, внедрение этой информации в лекции, формирование короткого блока с информацией в LMS, объяснение, когда и почему та или иная стратегия работает. Пояснение на занятиях, почему преподаватель использует тот или иной подход, почему студенты делают те или иные задания и т. д.
Уверенность в том, что стратегии работают	Конкретная демонстрация на собственном примере учащихся, когда они могут увидеть разницу в результатах обучения при использовании и НЕ использование какой-либо стратегии (с обратной связью от преподавателя). Анализ что и почему сработало, а что нет
Обязательство использовать эти стратегии	Обсудить со студентами результаты предыдущего пункта, рефлексировать о том, какую ценность может иметь для студента умение выбирать и использовать ту или иную стратегию обучения не только в рамках формального обучения в университете, но и в его будущем самостоятельном профессиональном развитии
Планирование использования стратегии	Когда преподаватель задает задание, то он обсуждает со студентами, когда, где и как они будут делать это задание, какие стратегии использовать. При выполнении долгосрочных заданий (курсовых работ, индивидуальных домашних заданий) преподаватель просит, чтобы студенты разработали план реализации

Несмотря на то, что это кажется сложным и требующими большого количества времени, в реальности проговаривание и объяснение моментов, указанных в таблице, занимает немного времени, это легко реализуется с использованием LMS и позволит студентам улучшить академическую успеваемость при обучении в университете, а также сформирует у них метакогнитивные навыки и компетенции, которые в будущем помогут им профессионально развиваться в карьере инженера.

Основной проблемой, на мой взгляд, здесь является то, что далеко не все преподаватели высшей школы имеют соответствующие знания, компетенции и желание отойти от привычных действий и модернизировать свой педагогический арсенал.

Список использованных источников и литературы

1. *Flavell, J. H.* Metacognition and cognitive monitoring: A new area of cognitive–developmental inquiry // *American Psychologist*, 1979, 34(10), P. 906–911. doi:10.1037/0003-066X.34.10.906.
2. *Rivers, Michelle L.* Metacognition about practice testing: a review of learners’ beliefs, monitoring, and control of test-enhanced learning // *Educational Psychology Review*, 2021, 33(3), P. 823-862. doi.org/10.1007/s10648-020-09578-2
3. *McDaniel M., Einstein G.* Training learning strategies to promote self-regulation and transfer: the knowledge, belief, commitment, and planning framework // *Perspectives on Psychological Science*, 2020, 15(6), P. 1363-1381. doi:10.1177/1745691620920723.

Сведения об авторе

Екатерина Александровна Алфёрова, кандидат физико-математических наук, доцент отделения машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий Томского политехнического университета (Россия, г. Томск), alferova@tpu.ru

Интерактивный способ обучения грамматике в предметной области «английский язык»

И. В. Бескровная, Н. В. Козлова

Рассматривается важность изучения грамматики английского языка, обозначены противоречия между традиционными методами ее изучения и требованиями современного общества, подчеркивается актуальность интерактивного способа изучения грамматики английского языка и описывается структура дистанционного курса «Сам себе грамматик».

Ключевые слова: интерактивное обучение, грамматика английского языка, информатизация, современный урок и его этапы, дистанционное обучение.

An interactive way to teach grammar in English

I. V. Beskrovnaya, N. V. Kozlova

The article discusses the importance of studying English grammar, identifies the contradictions between traditional methods of studying it and the requirements of modern society, emphasizes the relevance of the interactive method of studying grammar in the subject area of the English language, and describes the structure of the interactive distance learning course “Be your own grammarian.”

Keywords: interactive learning, English grammar, informatization, modern lesson and its stages, distance learning.

Ни у кого не вызывает сомнений, что одним из условий достижения успеха в жизни является владение иностранным языком. По статистике 1,8 миллиарда человек, живущих на планете Земля, говорят на английском языке. Для 400 миллионов человек английский является родным языком. Это официальный язык в 54 странах, что охватывает более 28 % суши на всей планете. Английский язык используется практически во всех сферах жизнедеятельности человека. Это язык интернет-сервиса, мирового кинематографа и культуры, науки. Кроме того, умение использовать иностранный язык, в том числе и английский, является одним из критериев понятия «современный человек».

Владение иностранным языком подразумевает освоение различных языковых аспектов, составной частью которых является грамматика. Необходимость овладения грамматическим материалом обуславливается тем, что грамматика присутствует во всех видах речевой деятельности. Не умея применять грамма-

тические явления, невозможно успешно продемонстрировать языковой уровень ни в чтении, ни в письменной, ни в устной речи, что крайне важно как для результативного прохождения экзаменов в формате ГИА, так и для гармоничного интеллектуального развития личности в целом. «Неправильное употребление слов ведет за собою ошибки в области мысли и потом в практической жизни», – говорил Дмитрий Иванович Писарев [7].

Изучению грамматики всегда уделяется особое внимание как на уроках английского языка, так и во внеурочной деятельности. Однако практика показывает, что традиционные способы изучения грамматических явлений в рамках урока для современных детей становятся недостаточно увлекательными. Это связано как с информатизацией общества, так и с новыми требованиями в системе обучения. Современная наука об образовании «пришла» к тому моменту, когда возникла острая потребность в новых педагогических технологиях, которые обеспечивают самое главное в образовательном процессе – развитие личности каждого ребенка, его активности. Необходимо создавать и использовать такие условия обучения, чтобы учащийся стремился получить новые результаты своей работы и в дальнейшей работе успешно применить их в практической деятельности [3]. Сейчас остро стоит вопрос о целенаправленной работе по развитию учащихся – его интеллектуальных, физических, эмоционально-волевых, познавательных умений. Наилучшие результаты при решении этой проблемы можно получить только при наличии активной позиции учащихся в учебном процессе. Каким же тогда педагогу нужно построить обучение, чтобы процесс познания стал обоюдно увлекательным, значимым, как для педагога, так и для самого учащегося? Педагогика предлагает различные пути: воспитание ответственности, развитие мотивации, адаптирование учебного материала к учебным возможностям учащего и др. [3, 29].

В русле этих поисков сегодня появился новый подход – интерактивное обучение (*inter* – между, *aktio* – действие). Интерактивное обучение – диалоговое обучение, в ходе которого осуществляется взаимодействие учителя и ученика [5, 135]. Суть интерактивного обучения состоит в том, что учебный процесс базируется на сотрудничестве, взаимообучении: учитель – ученик, ученик – ученик. При этом учитель и ученик – равноправные, равнозначные субъекты обучения. Интерактивное взаимодействие исключает доминирование одного участника учебного процесса над другим. Во время такого общения ученики учатся быть демократичными, общаться с другими людьми, критически мыслить, принимать обоснованные решения.

В 2022/23 учебном году авторы данной статьи, являясь учителями английского языка МБОУ «Лингвистическая гимназия № 20 имени Л. Л. Верховцевой», разработали и внедрили во внеурочную деятельность дистанционный интерактивный курс для учащихся 7-го класса «Сам себе грамматик».

Перед началом работы с данным курсом авторы провели стартовое тестирование с целью выявления уровня владения языковым материалом по предлагаемым грамматическим темам. В течение последующих 18 занятий обучающиеся работали дистанционно. По окончании курса было проведено итоговое

тестирование, результаты которого позволили авторам сделать вывод, что работа на интерактивном курсе была оправдана, так как качество результатов по итоговому тестированию превысило качество результатов по стартовому тестированию.

Данный курс составлен на платформе «Эдуардо» с использованием приложения Learning Apps для практики применения грамматического материала. Курс рассчитан на 18 академических часов. Режим занятий – 1 раз в неделю. Курс включает в себя 5 разделов грамматики: времена группы Simple (4 часа), времена группы Continuous (4 часа), времена группы Perfect (4 часа), времена группы Perfect Continuous (4 часа), согласование времен (2 часа).

Интерактивный курс составлен в соответствии с требованиями ФГОС. Интерактивность курса заключается в том, что обучение проходит при постоянном курировании обучающегося учителем на любом этапе освоения курса. С другой стороны, обучающиеся могут обратиться к учителю за помощью посредством сообщений, а также обсудить в форуме друг с другом либо с учителем возникающие вопросы по практической части в заданиях репродуктивного уровня. Кроме этого, обучающиеся могут прокомментировать высказывания друг друга при выполнении заданий продуктивного уровня.

Каждый раздел включает в себя задания:

- на проблематизацию;
- мотивацию и целеполагание;
- ознакомление с теоретическим материалом;
- применение теории на практике;
- контроль освоения материала;
- рефлексию.

Задания на проблематизацию представляют собой упражнения с использованием визуальных стимулов и вопросов, вызывающих ситуацию затруднения. В связи с этим у обучающегося возникает необходимость разрешить проблему, что непосредственно связано с мотивацией к учебной деятельности по изучаемой тематике (рис. 1).

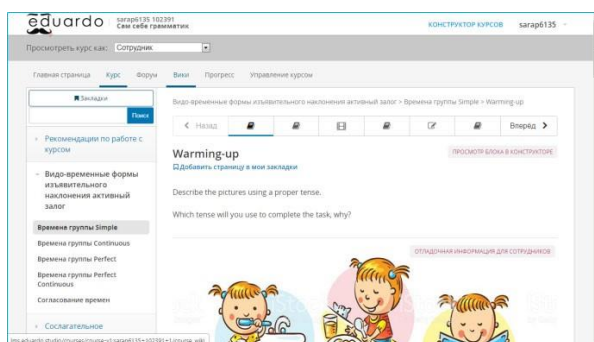


Рис. 1. Задание на проблематизацию

На следующем этапе обучающийся ставит цель и формулирует задачи для достижения цели, а также составляет план действий. В случае затруднения обу-

чающемуся предлагается воспользоваться шаблоном. Подобного рода задания способствуют совершенствованию регулятивных УУД, а именно целеполаганию, планированию (рис. 2).

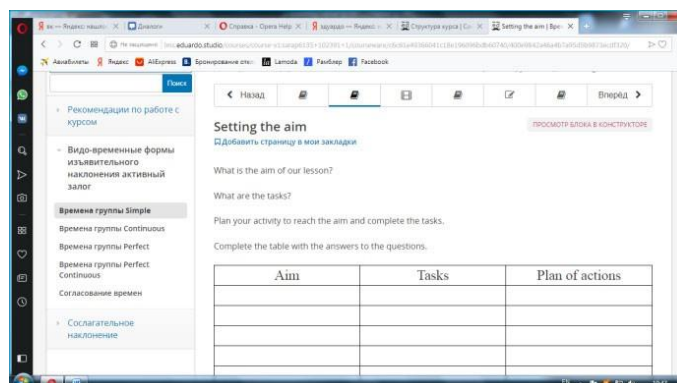


Рис. 2. Задание на целеполагание

Ознакомление с теорией рассчитано на обучающихся с разными способами восприятия информации. На этом этапе представлена аудио, видео, текстовая информация, в том числе в виде таблиц и описания (рис. 3). Эти задания дают возможность обучающимся развивать такие полезные для учебной деятельности умения, как анализ, синтез, классификацию, систематизацию.

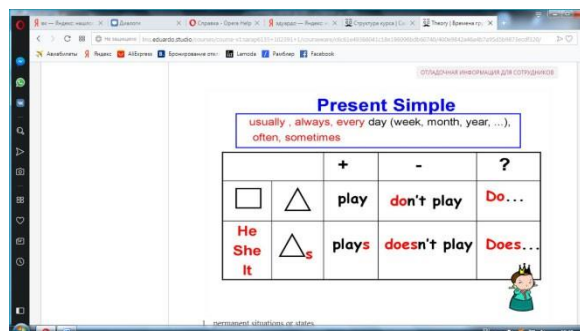


Рис. 3. Теоретический материал, представленный в виде таблицы

Практический этап составлен по принципу от простого к сложному. Вначале обучающимся предлагается выполнить задания на репродуктивном уровне типа: сопоставьте, найдите, выберите (рис. 4). Далее следуют задания на репродуктивно-продуктивном уровне типа: раскройте скобки, найдите ошибку, переведите с русского на английский. В заключение обучающиеся выполняют задание продуктивного уровня, типа составление письменного высказывания с использованием грамматического материала, изученного в данном разделе. На нашем курсе есть возможность выполнения творческих заданий продуктивного уровня в формате форума. Это значит, что учащиеся могут комментировать ответы друг друга, формулировать оценочные суждения по заданным критериям.

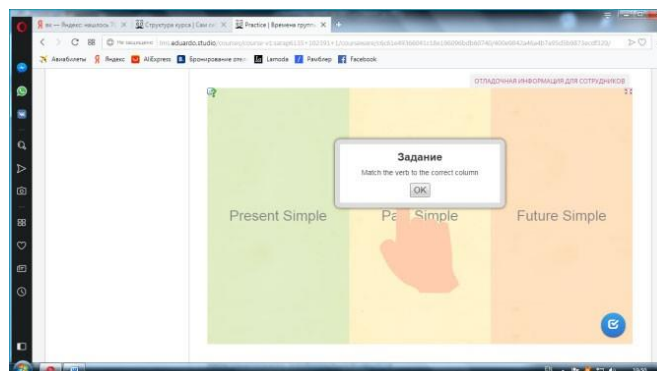


Рис. 4. Практическое задание репродуктивного уровня

На этапе контроля обучающиеся выполняют тестовые задания, направленные на проверку усвоения теоретического материала и умения применить его на практике. Возможности платформы «Эдуардо» и приложения Learning Apps позволяют учителю увидеть самые проблемные области грамматики по изучаемой теме, которые представлены в виде сводной диаграммы, и диаграммы индивидуального прогресса.

Практический и контрольный этапы нацелены, в основном, на совершенствование предметных УУД, связанных с освоением грамматического материала по изучаемому разделу.

Этап рефлексии является неотъемлемой частью современного урока, и также представлен в интерактивном курсе в виде следующих заданий: самооценка собственного прогресса, планирование коррекционной работы (рис. 5). У детей повышается самооценка и уверенность в себе. Данный этап, как и этап целеполагания, способствует совершенствованию регулятивных УУД, особенно умения оценивать себя.

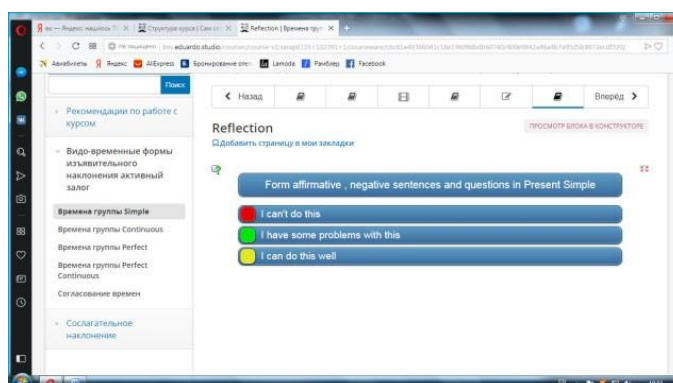


Рис. 5. Задание на рефлексия

Работа обучающихся в рамках интерактивного курса предполагает выполнение заданий всех шести этапов по каждому заявленному разделу грамматики. Выполнение заданий каждого этапа ограничено по времени, один этап – одна неделя, что позволяет обучающимся организовать процесс обучения по индивидуальному графику.

По окончании курса обучающиеся, освоившие грамматический материал на удовлетворительном, хорошем и отличном уровнях, получают сертификат об успешном прохождении курса.

Таким образом, являясь интерактивным, данный курс достаточно продуктивен, поскольку он способствует хорошей мотивации, максимальной индивидуальности преподавания, предполагает широкие возможности для творчества, самореализации учащихся. Налицо более прочное усвоение материала, так как учащиеся добывают знания самостоятельно, сознательно, переживая каждый шаг обучения. Именно интерактивные методы позволяют обучающимся почувствовать свои силы, свои способности и умения. Интерактивные методы позволяют создавать учебную среду, в которой теория и практика усваиваются одновременно, а это дает возможность ученикам формировать характер, развивать мировоззрение, логическое мышление, связную речь; формировать критическое мышление; выявлять и реализовать индивидуальные возможности.

Список использованных источников и литературы

1. *John Eastwood*. Oxford Guide to English Grammar. Oxford University Press, 1996. С.367-375; 303-316
2. *Michael C. Middleton*. Useful Exercises in English. Nicosia. Casoulides Printing Works, 1991. С.87-89; 197-200; 107-108
3. *Бабанский, Ю. К.* Методы обучения в современной общеобразовательной школе. – Москва : Просвещение, 2003. – 259 с.
4. *Ваганова, Н. А.* Изучение особенностей проявления творческого потенциала школьников. – Москва : Просвещение, 2010. – 265 с.
5. *Давыдов, В. В.* Проблемы развивающего обучения. – Москва : Педагогика, 1986. – 230 с.
6. *Коровина, О.* Сборник разноуровневых учебных методических тестов. 10–11 классы. – Москва : Чистые пруды, 2010. – 32 с. – (Библиотечка «Первого сентября», серия «Английский язык»).
7. *Лебедева, Л. С.* Неправильное употребление слов ведёт за собой ошибки в области мысли и потом в практике жизни. Д. И. Писарев. – URL: <https://solncesvet.ru/opublikovannyye-materialyi/nepravilnoe-upotreblenie-slov-vedet-zas367151>.

Сведения об авторах

Илона Викторовна Бескровная, учитель английского языка МБОУ «Лингвистическая гимназия № 20» (Россия, г. Сарапул), bilvik71@gmail.com

Надежда Владимировна Козлова, учитель английского языка, МБОУ «Лингвистическая гимназия № 20» (г. Сарапул, Россия), sarap6135@gmail.com

Сравнение видов словосложения существительных как способов словообразования в немецком и китайском языках

О. К. Бакловская, М. Н. Каменских

В статье описываются особенности словосложения существительных в немецком и китайском языках, выделяются основные виды словосложения. Проводится анализ видов словосложения, выявляются их сходства и различия, на основе результатов которого делается вывод о закономерностях в механизме словосложения в немецком и китайском языках, их отличительных и схожих чертах.

Ключевые слова: словообразование, сравнительно-сопоставительный подход, словосложение существительных, морфема, композита.

Comparison of noun composition in German and Chinese

O. K. Baklovskaya, M. N. Kamenskikh

The article describes the features of the composition of nouns in the German and Chinese languages, highlighting the main types of composition. An analysis of the types of word composition is carried out, their similarities and differences are revealed, based on the results of which a conclusion is drawn about the patterns in the mechanism of word formation in the German and Chinese languages, their distinctive and similar features.

Keywords: word formation, comparative approach, composition of nouns, morpheme, composite.

Изучение словообразования перспективно для формирования лексического навыка и более эффективного расширения словарного запаса, так как позволяет понимать закономерности образования слов, предполагать их лексическое значение по морфемному составу. Словосложение является ведущим и продуктивным способом словообразования в немецком и китайском языках, поэтому представляется актуальным проанализировать и сравнить механизмы словосложения существительных в данных языках, выделить их сходства и различия. Языки выбраны по причине их популярности для изучения, а также предполагаемой схожести словообразовательных процессов.

В связи с вышеизложенным была определена **цель** работы: сравнение видов словосложения существительных в немецком и китайском языках для выявления сходств и различий и составление лексической подборки сложных существительных на двух языках.

Задачи:

1. Описать механизмы словосложения в немецком и китайском языках.
2. Сравнить особенности словосложения и выявить сходства и различия.
3. Определить уникалии словосложения, характерные для обоих языков.

4. Сделать выводы о природе словосложения в немецком и китайском языках.

В исследовании используется **сравнительно-сопоставительный подход**, позволяющий задействовать метакогнитивные стратегии сравнения и переноса и сравнить явление словосложения в неродственных языках [1, с. 46–47].

Теоретические методы исследования:

анализ, сравнение и синтез научной литературы

Прежде всего необходимо составить представление об основных видах словосложения, существующих в каждом языке, для понимания общих принципов и знания наиболее продуктивных способов словообразования. Так, в немецком языке выделяются словосложение, безаффиксное словопроизводство (субстантивация), аффиксное словопроизводство. При словосложении последняя морфема в слове является управляющей, род сложного существительного определяется по роду последнего элемента. Еще одной особенностью немецкого словосложения является наличие соединительных элементов. В китайском обнаруживаются примерно те же словообразовательные модели, однако словопроизводство разбито на более узкие уровни. Словосложение может быть сложносочинительным и сложноподчинительным, помимо аффиксации, выделяется также полуаффиксация, присутствует контракция (табл. 1). До сих пор четко не установлено, какие морфемы в составе сложных слов можно считать самостоятельными (свободными), а какие перешли в класс полуаффиксов или аффиксов (Солнцев, Packard, Yang Xuming). Знание перечисленных нюансов подготовит обучающихся к восприятию информации, позволит избежать затруднений при овладении базовыми особенностями словообразования.

Таблица 1. Основные словообразовательные модели в немецком и китайском языках

Немецкий язык	Китайский язык
Словосложение	
der Bund + die Regierung = die Bundesregierung; das Glück + der Pilz = der Glückspilz	血压 xuèyā – кровяное давление 血 xuè – кровь; 压 yā – давление; 冰箱 bīngxiāng – холодильник 冰 bīng – лед; 箱 xiāng – ящик, сундук
Аффиксация	
Ab + fliegen = abfliegen ab - префикс; Essen + bar = essbar bar - суффикс	老板 lǎobǎn – шеф, босс, 老 lǎo – старый, уважаемый (префикс); 苦头 kǔtóu – печаль, страдания, 头 tóu – голова (суффикс)
Безаффиксное словопроизводство	Полуаффиксация
ein blinder Mann - ein Blinder; essen – das Essen	超人 chāorén – сверхчеловек, 人 rén – человек (полупрефикс); 对手 duìshǒu – соперник, оппонент, 手 shǒu – рука (полусуффикс)

Сравнение немецкой аффиксации и китайских радикалов по форме, значению и функции категории проведено в статье Ву Цзэжун «Vergleich der Wortbildung des deutschen und chinesischen». Исследование было направлено на выявление сходств и различий в составе двух языков и на применение дидактических указаний в обучении и изучении немецкой и китайской лексики, для обеспечения нового метода в области овладения вторым и третьим иностранным языком. [2, с. 109]. После составления сопоставительных таблиц семантических и грамматических значений аффиксов и радикалов (табл. 2), автор приходит к выводу о том, что в большей степени процесс аффиксации схож в отношении лексических значений слов.

Таблица 2. Сравнение немецких аффиксов и китайских радикалов

Vergleich der deutschen Affixe und chinesischen Radikale

Bedeutung	Affix	Beispiele	Radikal	Beispiele
Wasser	hydr-, hydro-	Hydrant, Hydrophon	氵	海(See), 汁(Saft)
Mensch	anthrop-	Anthropologie, anthropozentrisch	亻	伴(Paar), 仆(Diener)
klein	mikro-	Mikroskop, Mikrowelle	小	少(Jugend), 尘(Staub)

В исследовании Сю Ин «Ein linguistischer Vergleich der deutschen und chinesischen Fernsehwerbung» также встречаются элементы сравнения словообразования в немецком и китайском языках, направленные в основном на демонстрацию их различий. Словосложение определено как одна из основных словообразовательных моделей в обоих языках [3, с. 36].

Словосложение в немецком и китайском языках основано на принципе объединения морфем. При сложении слов в немецком языке формируются определительные и неопределительные композиты. Одна морфема в составе сложного слова всегда является существительным либо субстантивированной частью речи. Вторая морфема может быть как существительным, так и глаголом, прилагательным, реже наречием. Как правило, первый компонент определяет второй, а второй дает общую морфологическую и семантико-категориальную характеристику соединения [4, с. 10]. Данная характеристика относится к определительному типу словосложения, смысл одной морфемы подчиняется смыслу другой. При неопределительном словосложении степень зависимости основ друг от друга отсутствует, морфемы появляются в речи автономно. Схожие типы словосложения выделяются и в китайском языке.

Большинство слов в китайском языке являются двуморфемными образованиями, компоненты которых свободно функционируют в языке как лексические единицы. Однако есть морфемы в составе композит, приравненные к полусуффиксам или суффиксам по причине малой семантической автономии: «Иногда

же компоненты сложных слов – это знаменательные морфемы, утратившие в современном языке качество отдельных лексических единиц и в силу этого неспособных употребляться самостоятельно» [5, с. 11].

Согласно исследованиям, сложные слова в китайском языке делятся на сложные сочинительные и сложные подчинительные (неопределительные и определительные), которые в свою очередь включают несколько типов. Для сравнения были подобраны сложные сочинительные слова синонимического типа первой разновидности (сочетание корнеслогов, обозначающих предметы); особого типа (когда исходное лексическое значение одного компонента поглощено другим) и сложные подчинительные слова определительного типа первой разновидности (первая морфема – признак, вторая – предмет); предикативного типа первой и второй разновидности 1) первая морфема – действие, вторая – предмет, 2) первая морфема – предмет, вторая – признак).

Уникалией немецкого словосложения является наличие соединительного элемента *-(e)s-*, *-(e)n-*, *-ens-*, *-e-* или *-er-*), появление которого зависит от типа основы (субстантивированные и глагольные основы). Помимо этого, принципиальное отличие от китайского языка заключается в наличии рода у всех сложных существительных в немецком языке, который определяется второй составной морфемой. В китайском языке данное грамматическое явление отсутствует, что объясняется отсутствием категории рода как таковой и иероглифами, которые исключают наличие соединительных элементов.

Словосложение существительных в немецком и китайском языках как способ словосложения имеет схожие черты, в обоих языках есть определительные композиты (подчинительные слова) и неопределительные (сочинительные слова), некоторые морфемы являются субстантивированными частями речи. В данных языках также есть сложные слова, мотивировка которых утратила смысл, он стал более метафоричным. Безусловно, существуют и различия, обусловленные языковыми уникалиями двух языков. В данном исследовании внимание акцентируется на соположении семантики морфем, входящих в состав сложных слов, зачастую выявляющих сходства (см. табл. 3).

Таблица 3. Сравнение моделей словосложения в немецком и китайском языках

Сущ.+сущ. (кровенное давление)	
der Blutdruck ← das Blut – кровь; der Druck – давление	血压 xuèyā ← 血 xuè – кровь; 压 – yā давление
Гл.+сущ. (швейная машинка)	
die Nähmaschine ← näh (от nähen) – шить; die Maschine – машина	缝纫机 féng rèn jī ← 缝纫 féng rèn – шить; 机 jī – механизм
Сущ.+прил. (помада)	
Das Lippenrot, der Lippenstift ← die Lippen – губы; rot – красный /der Stift – карандаш	口红 kǒuhóng ← 口 kǒu – рот; 红 hóng – красный

В приведенной выше таблице представлены примеры сложных слов из разных лексических тем, которые в дальнейшем могут быть использованы для составления мини-словарей, подходящих для сопоставления сложных слов при изучении словосложения в немецком языке как ИЯ2 и китайском языке как ИЯ3 в рамках сравнительно-сопоставительного подхода.

Таким образом, можно сделать вывод, что словосложение как способ словообразования в немецком и китайском языках схоже и основано на принципе объединения морфем, которые зачастую имеют сходное значение. В немецком языке выделяются определительный и неопределительный виды словосложения, в китайском языке – сложный сочинительный и сложный подчинительный виды. Их объединяет схожесть механизмов формирования, поэтому в немецком и китайском языках их можно назвать эквивалентными. При соизучении сложных слов в немецком и китайском языке можно значительно расширить словарный запас. Основное отличие словосложения в двух языках заключается в наличии уникалий (соединительные элементы, род существительных), осложняющих сравнение. Подобранные лексические примеры в перспективе можно использовать для разработки упражнений для изучающих немецкий язык как ИЯ2 и китайский язык как ИЯ3.

Список использованных источников и литературы

1. Второй иностранный язык в системе мультилингвального обучения : учеб. пособие / О. К. Бакловская, Ю. Н. Ильина, Л. М. Малых, Н. Ю. Милютинская. – Ижевск, 2023.
2. WuZekun, *ergleichderWortbildungdesDeutschenundChinesischen* // Материалы XI Международной научно-методической конференции «Теория и практика языковой коммуникации» / под ред. Т. М. Рогожниковой. – 2019.
3. Xu Ying, *Ein linguistischer Vergleich der deutschen und chinesischen Fernsehwerbung*, Technische Universität Darmstadt, 2020. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/14062/1/PDF-Version.pdf>.
4. Королева, А. В. Особенности словообразования в немецком языке : курсовая работа. – Орел : ОГУ. – 2013. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=808856>
5. Ерохина, П. В. Способы словообразования в китайском языке : курсовая работа. – Москва : МГГУ им. М. А. Шолохова, 2010. – URL: <https://www.docsity.com/ru/sposoby-slovoobrazovaniya-v-kitayskom-yazyke/1802384>.

Сведение об авторах

Ольга Константиновна Бакловская, кандидат педагогических наук, доцент кафедры романской филологии второго иностранного языка и лингводидактики, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» (Россия, г. Ижевск)

Мария Николаевна Каменских, студент курса кафедры теории языка, межкультурной коммуникации и зарубежной литературы, направления «Зарубежная филология: английский язык (мультилингвальное обучение)», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» (Россия, г. Ижевск), mariakamenskih1@gmail.com

Роль европейских мыслителей в распространении идей гуманизма в Европе в XVIII–XIX вв.

И. М. Вельм

Целью настоящей статьи является проведение анализа различных взглядов, нашедших отражение в трудах великих европейских мыслителей. Рассматриваются тенденции становления и развития гуманизма как направления философской мысли в Европе в XVIII–XIX веках. Устанавливается взаимосвязь особенностей представлений о человеке в гуманистической теории и этапов социально-экономического развития общества. Автором рассматриваются основные гуманистические традиции, содержащиеся в работах Дж. Локка, Ж.Ж. Руссо, М. Уоллстонкрафт и Ф. Ницше. Проведен анализ преемственности и взаимосвязи представлений о гуманизме в работах вышеуказанных философов. По результатам проведенного анализа автор пришел к выводу о значительном вкладе рассматриваемых мыслителей в развитие гуманистических идей в Европе в XVIII–XIX веках.

Ключевые слова: гуманизм, гуманистические традиции, свобода и равенство, философ, европейские мыслители, Джон Локк, Фридрих Ницше, Жан-Жак Руссо, Мэри Уоллстонкрафт.

The role of European thinkers in spreading the ideas of humanism in Europe in the XVIII–XIX centuries

I. M. Velm

The purpose of this article is to analyze various views reflected in the works of great European thinkers. The tendencies of the formation and development of humanism as a direction of philosophical thought in Europe in the XVIII-XIX centuries are considered. The interrelation of the features of the ideas about man in humanistic theory and the stages of social and economic development of society is established. The author examines the main humanistic traditions contained in the works of J. Locke, J.J. Rousseau, M. Wollstonecraft and F. Nietzsche. The analysis of the continuity and interrelation of ideas about humanism in the works of the above-mentioned philosophers is carried out. Based on the results of the analysis, the author came to the conclusion about the significant contribution of the considered thinkers to the development of humanistic ideas in Europe in the XVIII-XIX centuries.

Keywords: humanism, humanistic traditions, freedom and equality, philosopher, European thinkers, John Locke, Friedrich Nietzsche, Jean-Jacques Rousseau, Mary Wollstonecraft.

Гуманизм представляет собой философское и культурное движение, базирующееся на принципах значимости и достоинства человека, а также его способности к самореализации и совершенствованию. Впервые идеи о гуманизме в качестве философского учения нашли свое отражение в трудах западных мыс-

лителей в период эпохи Возрождения. В этот период зародилась идея гуманизма как человекоцентрической философии, которая уделяет особое внимание человеческим ценностям и достоинствам. Основные принципы данной парадигмы базировались на позициях о том, что каждый человек имеет право на свободу, равенство и уважение.

В XVIII веке, ознаменованном эпохой Просвещения, произошло основное становление и развитие данного философского направления. Основные гуманистические традиции в указанный период развивались в рамках идеи превосходства образования и просвещения как основных путей совершенствования личности человека. Представлялось, что образование, наука и культура должны быть общедоступными благами, чтобы каждый человек смог полностью реализовать свой потенциал и достичь поставленных целей. Кроме того, гуманистическое философское направление эпохи Просвещения тесно связано с новыми представлениями о человеческих правах и свободах, нашедших отражение в трудах многих европейских мыслителей.

Джон Локк (1632–1704), английский философ XVII века, являлся одним из основоположников развития идеи о равенстве и свободе личности, отстаивал идею индивидуальных прав, права на жизнь, свободу совести и свободу слова. В своих работах Дж. Локк обосновывал концепцию гражданского общества, где люди живут в условиях свободы и равенства, а правительство действует с согласия народа. Мыслитель предлагал новую концепцию общественного договора, где правительство существует для защиты прав граждан и управляется по правилам, согласованным между гражданами.

Одним из наиболее важных трудов Дж. Локка является «Два трактата о правлении» (1690), где он представил свои идеи о государстве и праве на участие в управлении им. Философ утверждал, что государство должно быть создано не для того, чтобы ограничивать свободу и права человека, а для того, чтобы защищать народ. Он также признавал право на революцию, если государство не выполняет свои обязанности и нарушает права граждан [2]. Именно эти идеи Дж. Локка о равенстве и индивидуальных правах человека оказали огромное влияние на развитие гуманизма и укрепление понимания, что ценность каждого человека не зависит от его социального статуса или происхождения.

Представления Дж. Локка о свободе и равенстве нашли отклик у философов и мыслителей XVIII–XIX веков, таких как Ж. Ж. Руссо, Ш. Монтескье, Вольтер, которые в своих трудах развивали идеи гуманизма, свободы и равенства. Концепция Дж. Локка получила свое дальнейшее развитие. В работах его последователя, одного из основателей современного гуманизма Жан-Жака Руссо (1712–1778). В своих трудах философ акцентировал внимание на индивидуальности, свободе и природе человека и считал, что именно они должны быть в центре внимания в общественной жизни.

Одной из наиболее значимых работ Ж. Ж. Руссо стал его труд «Общественный договор», опубликованный в 1762 году. В своем творении в качестве источника власти философ определяет народ, а не монархию, и предполагает, что общество должно быть организовано таким образом, чтобы защищать интересы

всех его членов. Ж. Ж. Руссо утверждал, что главной целью общества является обеспечение свободы и благополучия каждого его члена, при этом вся деятельность государства и власти должна быть подчинена этой цели [8].

Еще одним важным вкладом Ж. Ж. Руссо в развитие идей гуманизма была его работа «О воспитании». Данный труд философ посвятил развитию идеи о новом подходе к воспитанию детей, основанном на уважении к их индивидуальности и свободе. Предполагалось, что воспитание, в первую очередь, ориентировано на природу ребенка, основной целью которого является не формирование подчиненных граждан, а развитие самостоятельных личностей, способных принимать собственные решения и ответственность за свои поступки [4].

Представления Ж. Ж. Руссо о роли женщины в обществе сыграли большую роль в развитии гуманистических идей в XIII–XIX веках. Философ считал безусловным господство мужского пола над женским. Он связывал свои взгляды естественной главной задачей человечества – продолжением рода, по его представлениям мужчина, исполняя свою функцию, должен быть сильным и активным, а женщина – пассивной и слабой. Таким образом, обязанность женщины представляется в нахождении в подчинении у мужчины, «она должна стараться быть приятной мужчине, а не бросать ему вызов». Однако на идеи Ж. Ж. Руссо обрушился поток критики [9, с. 547].

Мэри Уоллстонкрафт (1759–1797), британская писательница, философ, одна из наиболее выдающихся фигур женского движения конца XVIII века, поразила мир своим основным трудом «В защиту прав женщины», опубликованным в 1792 году в Лондоне и США. В своем произведении она резко критикует Жан-Жака Руссо, указывая на то, что философ сознательно искажает образ женщины, представляя ее «более слабым существом, чем она в действительности является» [10, с. 14]. Одним из главных вопросов, поднятых М. Уоллстонкрафт в ее трудах, было рассмотрение действительных отличительных черт женского пола. Она утверждает, что женщины, наравне с мужчинами, обладают умственными способностями и способны к развитию своего потенциала. М. Уоллстонкрафт призывает к равенству полов и к тому, чтобы женщины получили доступ к образованию, политическим и экономическим правам [3, с. 68].

Таким образом, Мэри Уоллстонкрафт внесла значительный вклад в развитие идей гуманизма, пропагандируя равенство, свободу и уважение к правам человека. Ее работы оказали большое влияние на формирование общественного сознания и прогрессивных и гуманистических традиций в различных отраслях жизнедеятельности, а также стали важным шагом на пути к борьбе за права женщин и вдохновили следующее поколение феминисток.

В XIX веке идеи гуманизма стали более широко распространенными. В этот период гуманистические традиции преобладали в процессе борьбы за права женщин, за равенство всех людей независимо от расы, вероисповедания или социального статуса. Вместе с тем быстрый экономический рост в европейских странах обусловили развитие новых тенденций в развитии данного философского направления. Индустриальная революция, которая привела к появлению

новых форм эксплуатации трудящихся, стала следствием социального и экономического неравенства. В связи с этим в конце XIX века появились новые движения, такие как социализм и коммунизм, которые ставили перед собой задачу борьбы за равенство и справедливость. Некоторые философы (С. Кьеркегор, Ф. Ницше, Д.С. Милль) выражали опасения относительно того, как новые технологии и прогресс могут угрожать ценностям человеческой жизни и человеческой личности. Но в то же время приверженцы другой точки зрения (О. Конт, К. Маркс, Г. Спенсер) настаивали на том, что новые технологии могут быть использованы для улучшения жизни людей и обеспечения их свободы и равенства [7].

Одним из ключевых философов, вносящих вклад в развитие гуманизма в XX веке, был Фридрих Ницше. Он признавал ценность индивидуальности и выступал против конформизма и массовой культуры. Одной из главных идей, которую Фридрих Ницше внес в развитие гуманистического направления, была критика религии и морали. Он утверждал, что традиционные ценности и нормы, которые обычно считаются божественными, на самом деле являются социально-культурными конструкциями. Философ утверждал, что это приводит к подавлению индивидуальности и затрудняет развитие личности. Вместо этого он предложил идею «сверхчеловека», который основывается на своих собственных ценностях и не подчиняется традиционным нормам [1, с. 34].

Кроме того, Ф. Ницше активно развивал идею «воли к власти», согласно которой человеческая природа подсознательно стремится к власти. Но вместо того, чтобы подчиняться власти, человек должен стремиться к самореализации и духовному развитию. Философ считал, что истинная свобода и независимость заключаются в возможности следовать своим собственным ценностям и желаниям, а не подчиняться внешним ограничениям [5].

Согласно представлениям, Ф. Ницше, жизнь должна быть исполнена радости и страсти. Он считал, что человек должен полностью ощущать и жить свою жизнь, а не просто существовать в обществе. Представлялось, что истинная жизнь не может быть достигнута через бесконечные жертвы и отказы, а только через полное и непосредственное исполнение своих желаний [6].

Таким образом, основные идеи гуманизма, представленные в трудах великих европейских мыслителей, продолжили развиваться и находить отражение в науке, литературе и искусстве. Философы XVIII–XIX веков выступали за уважение к человеческой личности, ее свободе и равенству, а также за признание ее эмоциональной и духовной составляющей. Рассмотренные гуманистические представления европейских стали важным фактором в формировании современного общества и лежат в основе многих традиционных ценностей и идеалов.

Список использованных источников и литературы

1. *Должигов, Г. И.* Идеология прогрессивного развития. На пути к реальному Гуманизму. – Москва : Авторская мастерская, 2017. – 181 с.
2. *Локк, Дж.* Два трактата о правлении. Фонд либеральных программ

«Свободный мир» / пер. с англ. Е. С. Лагутина и Ю. В. Семенова. – Москва ; Челябинск : Социум, 2014. – 480 с.

3. Луканина, О. Н. Проблема «Женской природы» у Жан-Жака Руссо и Мэри Уоллстонкрафт // Вестник Московского государственного университета культуры и искусств. – 2010. – № 1. – С. 67–70.

4. Мельник, Н. Б. Философия природы и человека Ж.-Ж. Руссо как основание концепции естественного воспитания : дис. ... канд. филос. наук: 09.00.03. Екатеринбург, 2002. – 178 с.

5. Ницше, Ф. Воля к власти / пер. с нем. – Москва : Эксмо, 2017. – 607 с.

6. Ницше, Ф. Человеческое, слишком человеческое: быть великим – значит давать направление / пер. с нем. – Москва : Эксмо, 2018. – 350 с.

7. Ромаева, Н. Б. Развитие социального гуманизма как направления гуманистической педагогики Западной Европы в XIX– XX вв. : монография / Н. Б. Ромаева, Е. В. Карташева; ред. Е. Н. Шиянова. – Москва : АСОУ; Ставрополь : СГПИ, 2010. – 131 с.

8. Руссо, Ж.-Ж. Об общественном договоре. – Москва : Иглмосс Эдишинз, 2012. – 383 с.

9. Руссо, Ж.-Ж. Эмиль, или О воспитании. Избранные сочинения: в 3 т. – Москва, 1961. – Т. 1. Книга У. София, или Женщина. – 850 с.

10. Феминизм в общественной мысли и литературе. Антология / сост. Е. Трофимова. – Москва : Грифон, 2006. – 398 с.

Сведения об авторе

Иван Матвеевич Вельм, доктор культурологии, профессор, заведующий кафедрой «Экономика и гуманитарные науки», СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (Россия, г. Сарапул), velm.i.m.@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ № 1. СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Бурнышева П. А., Чепикова Т. П.</i> К вопросу анализа характеристик теплоизоляционных материалов	3
<i>Закирова О. В.</i> Особенности формирования офисной среды в России в контексте российской практики создания административно-офисных зданий	7

СЕКЦИЯ № 2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Давлетишин Р. И., Хакимьянов М. И., Ван Кебо, ЧжуЧэнье, Чжао Юйхан, Чжао Ипэн</i> Система мониторинга электродвигателя	10
---	----

СЕКЦИЯ № 3. МАТЕМАТИКА И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

<i>Маковецкий И. И.</i> К двухточечной краевой задаче для матричного уравнения Ляпунова (двусторонняя регуляризация)	15
<i>Маковецкая О. А.</i> К анализу периодической краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова – Риккати (правосторонняя регуляризация)	20
<i>Роголев Д. В.</i> К левосторонней регуляризации периодической краевой задачи для системы матричных дифференциальных уравнений Риккати	25
<i>Баяндина М. М., Кустов А. В.</i> Коэффициент гидравлического сопротивления вихревой контактной ступени ректификационной колонны	30
<i>Лаптинский В. Н., Романенко А. А.</i> К решению задачи о тепловом пограничном слое в ламинарном течении	34
<i>Бондарев А. Н.</i> Конструктивный анализ многоточечной краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова (правосторонняя регуляризация)	39
<i>Кашипар А. И.</i> К анализу разрешимости и построению решения краевой задачи Валле-Пуссена для нелинейного матричного уравнения ляпунова второго порядка	44

СЕКЦИЯ № 4. НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО

<i>Ильин А. П., Миловзоров А. Г.</i> Влияние условий эксплуатации штанговых насосных установок на изменение форм динамограмм	49
<i>Майков Д. Н., Макаров С. С.</i> Численное моделирование однофазной изотермической фильтрации флюида при интерпретации ГДИС	54
<i>Сорокин А. В., Сорокин В. Д.</i> Модели внутрипластовой водоносной системы в гидрофобном коллекторе	58
<i>Сорокин А. В., Сорокин В. Д.</i> Анализ общих ошибок при использовании традиционных подходов к изучению внутрипластовых газожидкостных систем	66
<i>Сорокин А. В., Сорокин В. Д.</i> Анализ методологических и методических подходов к отбору и исследованию проб «пластовой» воды	75
<i>Сорокин А. В., Сорокин В. Д.</i> Обзор техногенных воздействий на пластовую водогазовую систему при добыче газа	81
<i>Ильин А. П., Поздняков Е. П., Стерхов К. В., Трифонов А. А., Файзрахманов А. З.</i> Котел отопительный типа КВ-ЦБ	94
<i>Ильин А. П., Стерхов К. В., Трифонов А. А., Файзрахманов А. З.</i> Горелка газовая типа ГГУ	101
<i>Ильин А. П., Стерхов К. В., Трифонов А. А., Файзрахманов А. З.</i> Горелка для водогрейного котла на попутном нефтяном газе мощностью до 100 кВт	107
<i>Ильин А. П., Стерхов К. В., Трифонов А. А., Файзрахманов А. З.</i> Варианты одновременного использования попутных нефтяных газов 1, 2 и 3 ступеней сепарации	113

СЕКЦИЯ № 5. ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

<i>Кочкин Д. А., Афанасьев В. А.</i> Модель системы автоматического полива комнатных растений на основе микроконтроллера Arduino Uno.	121
<i>Игнатьев О. А., Кривоногова Т. В.</i> Разработка автоматизированной информационной системы компаний по продаже и ремонту оборудования	126
<i>Нечаева Т. Г., Бородич Т. А., Гудыно О. Г.</i> Развитие инвестиционной составляющей экономики Республики Беларусь	133
<i>Чернышев Н. Н., Ниженец Т. В., Шевцов Д. Р.</i> Способ комплексирования данных от различных навигационных систем.....	137

СЕКЦИЯ № 6. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Малахов С. П.</i> Феррозондовый измерительный преобразователь в системах контроля формы тока	142
<i>Садыков Р. Р., Ясоев В. Х., Сафинов Ш. С.</i> Разработка современных шариковых расходомеров жидкости в Уфимском университете науки и технологий	148

СЕКЦИЯ № 7. ЭЛЕКТРОНИКА И СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

<i>Люттов А. Г., Озеров М. Ю., Моторина М. С.</i> Анализ требований к системе автоматического управления газовоздушным трактом котла с уравновешенной тягой	155
<i>Макишаков Д. Л., Кузнецова В. А., Кузнецов П. Л.</i> Нейросетевое прогнозирование изменения эксплуатационных характеристик электролитических конденсаторов во времени.....	161
<i>Стрелкова А. Е., Сахаров Ю. В.</i> Механизм пробоя тонких диэлектрических пленок	166
<i>Девятков Д. А.</i> Реализация базы знаний в процессе автоматизации технологической подготовки в единичном и мелкосерийном производстве	171

СЕКЦИЯ № 8. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СВЯЗЬ

<i>Тимофеев А. Л.</i> Повышение скорости передачи данных в мобильных сетях	175
--	-----

СЕКЦИЯ № 9. МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Дубров А. В., Завалов Ю. Н., Родин П. С., Шаршов О. И., Банников М. И.</i> Влияние послойного лазерного переплавления на структуру стали 07X18H12M2 при прямом лазерном выращивании.....	179
<i>Тюкпиеков В. Н.</i> Тепловые процессы при резании полимерного композиционного материала	185
<i>Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Асташинский В. М., Девойно О. Г., Оковитый В. В., Литвинко А. А.</i> Применение износостойких материалов из порошков керамики и М-кролей для изготовления уплотнений насосов.....	190
<i>Логвиненко А. В.</i> Экспериментальное исследование качества поверхности после удаления окалины с поверхности деталей цилиндрической формы свободными абразивами	195
<i>Логвиненко А. В.</i> Обзор и критический анализ методов удаления окалины с поверхности деталей цилиндрической формы свободными абразивами	202
<i>Каракулов М. Н., Коробейникова Е. С., Хайбуллина Д. А.</i> Конструктивное определение глубины вхождения плунжера в зацепление из условия отсутствия интерференции	210
<i>Бульканов Д. В.</i> Обзор и анализ технических решений опоры вращения на аэро-статическом подвесе	214

<i>Бульканов Д. В.</i> Обзор аэростатических опор с пористыми вставками. Их отличительные особенности от опор качения	219
<i>Каракулов М. Н., Стерхова Н. С., Русанова Ю. Н.</i> Применение программ для обработки растровых графических изображений в анализе машин и механизмов	223
<i>Глухов А. Б.</i> Расчет системы выталкивания формообразующих деталей при пенополиуретановой заливке	227
<i>Глухов А. Б.</i> Автоматизированная система демонтажа пресс-форм при полиуретановой заливке.....	233

СЕКЦИЯ № 10. ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Перминов Н. А.</i> Комплект сооружений по спасению населенных пунктов от лесных пожаров и речных паводков	238
--	-----

СЕКЦИЯ № 11. ЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ

<i>Шиляева О. Н.</i> Формирование индивидуальной предпринимательской активности молодого человека в новых социально-экономических реалиях	241
<i>Нечаева Т. Г., Бородич Т. А., Гудыно О. Г.</i> Развитие инвестиционной составляющей экономики Республики Беларусь.....	245
<i>Бекиш Е. И., Аленкина О. В., Мантур Е. Е.</i> Повышение эффективности деятельности РУП «Белоруснефть-Витебскоблнефтепродукт»	249

СЕКЦИЯ № 12. ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

<i>Алфёрова Е. А.</i> Важность метакогнитивных навыков у студентов инженерных специальностей и роль преподавателя в их формировании.....	254
<i>Бескровная И. В., Козлова Н. В.</i> Интерактивный способ обучения грамматике в предметной области «английский язык»	258
<i>Бакловская О. К., Каменских М. Н.</i> Сравнение видов словосложения существительных как способов словообразования в немецком и китайском языках	264
<i>Вельм И. М.</i> Роль европейских мыслителей в распространении идей гуманизма в Европе в XVIII–XIX вв.	269

Научное издание

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ТЕХНИКИ»

Материалы III Международной научно-технической конференции
СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»

Саранул, 15–16 декабря 2023 г.

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети:
[https://politehvpo.ru/images/Konferencia/Sbornik_III_konferencii/
Sbornik%20III%20konferencii%20dekabr%202023.pdf](https://politehvpo.ru/images/Konferencia/Sbornik_III_konferencii/Sbornik%20III%20konferencii%20dekabr%202023.pdf)

Дата размещения на сайте: 29.02.2024

В редакции авторов

Технический редактор *С. В. Логинова*

Корректор *М. А. Ложкина*

Верстка *Б. В. Бусоргина*

Оформление обложки *Е. А. Рябичевой*

Подписано к использованию 29.02.2024. Уч.-изд. л. 13,3
Объем 7,1 МБ. Заказ № 24

Издательство управления информационных ресурсов
Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова
426069, Ижевск, Студенческая, 7