



МАТЕРИАЛЫ

VI Международной
научно-практической конференции

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

12 - 15 апреля 2022 года
Москва

Москва
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
2022

УДК 338.126
ББК 74.584
И 74

И 74 Инфорно-2022 Материалы VI Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» (12-15 апреля 2022 г., Москва) – М.: Издательство МЭИ, 2022. – 100 с.: ил.

ISBN 978-5-7046-2639-8

Отобранные в результате рецензирования и представленные в сборнике материалов конференции русскоязычные доклады отражают основные проблемы, тенденции развития, а также результаты информатизации инженерного образования на современном этапе по основным востребованным направлениям: Индустрия 4.0, кибербезопасность и инженерное образование; информационное и программное обеспечение инженерного образования; ИТ в инженерных расчётах и проектировании объектов промышленности и энергетики; ИТ в учебных, исследовательских и испытательных лабораториях; дистанционные технологии и электронные образовательные ресурсы в инженерном образовании; компьютерная графика и 3D-моделирование в инженерном образовании.

УДК 338.126
ББК 74.584

Издается в авторской редакции




ISBN 978-5-7046-2639-8

© «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022



Организаторы

**VI МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»
ИНФОРИНО-2022**

-  **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**
-  **Министерство энергетики Российской Федерации**
-  **Национальный исследовательский университет «МЭИ»**



Уважаемые участники ИНФОРИНО-2022!

От лица Национального исследовательского университета «МЭИ» поздравляю Вас с началом работы шестой Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования»!

Со времени нашей прошлой конференции применение информационных технологий в образовании значительно расширилось и вышло на качественно новый уровень, что делает рассматриваемые в рамках ИНФОРИНО вопросы ещё более актуальными.

Серьезный импульс с точки зрения применения информационных технологий в разных областях жизни и, конечно, в области образования сделала пандемия: накопленный положительный и даже отрицательный опыт необходимо обязательно использовать, чтобы двигаться дальше.

Крайне важно понять, что является наиболее эффективным и результативным и как это можно использовать и тиражировать на благо всего образовательного процесса и, особенно, в инженерном образовании.

Отдельно хотел бы отметить важность создания IT-решений для образования на основе отечественных решений. Текущая ситуация показывает, что импортозамещение в этом направлении является критически важным для всех направлений экономики. И хотя пандемия коронавируса постепенно отступает, риски остаются, поэтому оргкомитетом конференции с целью обеспечения безопасности участников было принято решение, как и два года назад, провести конференцию с применением дистанционных технологий.

Все наши ожидания от конференции носят позитивный содержательный характер. Желаю участникам конференции успешной работы, установления новых контактов, а также крепкого здоровья вам, вашим коллегам и близким людям!



Программный комитет

**VI МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»
ИНФОРИНО-2022**

Председатель

РОГАЛЕВ Николай Дмитриевич, НИУ «МЭИ»

Члены Программного комитета:

Батыршин И.З.(Мексика)

Герк С. (США)

Гитзельс М. (Германия)

Замолодчиков В.Н. (РФ)

Крейчмар Х. (Германия)

Лепанов М.Г. (IEEE, РФ)

Смелянский Р.Л. (РФ)

Тарасов А.Е. (РФ)

Тепфер Х. (Германия)

Чыныбаев М.К. (Киргизия)



Организационный комитет

**VI МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»
ИНФОРИНО-2022**

Председатель Рогалев Н.Д.

Зам. председателя Белоусов С.В., Орлов К.А.

Ученый секретарь Прудникова Ю.И.

Члены оргкомитета:

Бобряков А.В.	Очков В.Ф.
Бурмистрова О.А.	Росляков П.В.
Варшавский П.Р.	Смыслина А.И.
Васильева Н.С.	Тарасова Т.П.
Вишняков С.В.	Тихонов А.И.
Голубев Д.В.	Топорков В.В.
Горбунова А.О.	Трофимов А.В.
Еремеев А.А.	Федотов Г.В.
Еремеев А.П.	Чернецов А.М.
Крепков И.М.	Шиндина Т.А.
Липай Б.Р.	Ширинский С.В.
Невский А.Ю.	



Секции

**VI МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»
ИНФОРИНО-2022**

Секция 1.

ИНДУСТРИЯ 4.0, КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ И ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ
Сопредседатели: Белоусов С.В., Орлов К.А.

Секция 2.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**
Сопредседатели: Еремеев А.П., Крепков И.М.

Секция 3.

**ИТ В ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЁТАХ И ПРОЕКТИРОВАНИИ
ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЭНЕРГЕТИКИ**
Сопредседатели: Вишняков С.В., Топорков В.В., Очков В.Ф.

Секция 4.

**ИТ В УЧЕБНЫХ, ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ
ЛАБОРАТОРИЯХ**
Председатель: Липай Б.Р.

Секция 5.

**ДИСТАНЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРОННЫЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ**
Сопредседатели: Тихонов А.И., Трофимов А.В.

Секция 6.

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ**
Председатель: Федотов Г.В.

ПОДГОТОВКА БАКАЛАВРОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В НИУ «МЭИ»: УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТРАСЛИ ЭНЕРГЕТИКИ

АННОТАЦИЯ

В значительном по сроку процессе реализации программ подготовки бакалавров по направлению «Информационная безопасность» (ИБ) меняется отношение к необходимости учета отраслевой принадлежности вуза, реализующего данные программы подготовки.

Классический подход к информационной безопасности как к направлению надотраслевому и сейчас имеет место и, в определенной степени, правилен в случае обеспечения безопасности информационных систем и процессов, в которых обрабатывается и хранится информация отдельных видов (тайн): государственной, служебной, коммерческой и других без детализации в чьих интересах (какой организации и какой отрасли) она используется.

Этот подход находит полное отражение в нормативно-методических документах Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России. В данной статье дана оценка необходимости учета отраслевых особенностей при подготовке специалистов ИБ на примере НИУ «МЭИ».

Ключевые слова – бакалавр, направление подготовки, образовательный стандарт, ЦПС, ФСТЭК

1. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

1.1. Об особенностях отрасли

Основной целью данной статьи является выражение мнения выпускающей кафедры по данному направлению подготовки (кафедры безопасности и информационных технологий (БИТ) в отношении необходимости и влияния особенностей отрасли экономики в которой наш вуз по праву является головным, т.е. энергетики.

Приведем соображения относительно необходимости и целесообразности включения в образовательные программы по ИБ отраслевых особенностей вуза. Свидетельства «против», т.е. в большей степени определяющие универсальные подходы к обеспечению ИБ информации без учета отраслевой принадлежности информационных субъектов и объектов имеются и заключаются в существовании единства в:

а) государственном регулировании области ИБ в РФ в виде государственных органов исполнительной власти (ФСТЭК, ФСБ, федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций и др.) и выпускаемых ими организационно-нормативных документов;

б) вопросах стандартизации в сфере ИБ;

в) теоретических подходах к определению, классификации и применению базовых понятий в предметной области ИБ: тайна, угроза, уязвимость, риск, методы и средства защиты и т.д. и др.;

г) подходах к моделированию базовых свойств безопасности информации: конфиденциальности, доступности и целостности [1];

д) содержании государственных образовательных стандартов и профессиональных стандартах области ИБ.

Этот перечень можно продолжать и далее.

Отметим, что ряд пунктов, перечисленных выше, будут справедливы и применительно к объектам информационных систем (ИС), функционирующих в интересах энергетики.

Так, ИС, участвующие в обработке информации, относящейся к видам, меры защиты которой регламентированы в РФ государственными регуляторами, такие как: персональные данные, служебная тайна, информация, содержащаяся в государственных информационных системах (ГИС) и значимых объектах критической информационной инфраструктуры (ЗО КИИ), являются полностью или частично «мультиотраслевыми» [2,3,4].

В поддержку отраслевой принадлежности вопросов информационной безопасности можно перечислить следующее:

а) появление в последнее время значимых документов программного характера в области энергетики с изложением, в том числе и вопросов безопасности, правда энергетической;

б) наряду с общими надотраслевыми положениями документов в области стандартизации ИБ существуют важные исключения отраслевого характера: например, высоко оцененный специалистами комплекс стандартов и рекомендаций по стандартизации для банковской сферы РФ – ОСТ БР ИББС, а также стандарты серии ГОСТ Р 57580 по безопасности финансовых (банковских) операций. Этот пример может найти достойных «подрожателей» и из других сфер экономики;

в) работы по широкомасштабной цифровизации энергетики, ставящие по-новому вопросы безопасности энергетической отрасли страны;

г) недостаточное внимание в энергетической отрасли к вопросам информационной безопасности и защиты, особенно технологической информации, в отличии от а);

д) объективное отсутствие информации о предложениях энергетических компаний по трудоустройству специалистов, подготовленных по направлению ИБ.

1.2. Нормативное регулирование безопасности в энергетике

Проведем анализ значимых отраслевых документов с риторикой безопасности.

Основным документом государственной политики РФ в сфере энергетической безопасности является **Доктрина энергетической безопасности РФ**, принятая Указом Президента РФ № 216 от 13.05.2019 года.

Известно, что доктрина в РФ разрабатывается на срок 10-15 лет и выполняет функции документа стратегического планирования. Назначение доктрины заключается в формировании комплекса целей для органов управления государством и четкого видения ими основных приоритетов, необходимых и достаточных для обеспечения безопасности в важнейших направлениях.

Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ.

Указ Президента Российской Федерации № 270 от 16.04.2020 г. «О развитии техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации», центральным элементом которого является поручение Президента на разработку Программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года», что дает возможность сформулировать основной вывод о том, что высшее руководство РФ фокусирует внимание на проблемах энергетической безопасности;

Главное содержание и смысл этих документов заключается в формировании общей направленности развития энергетической отрасли РФ, а также формирования приоритетов в этой отрасли.

Понятие энергетической безопасности сформулировано следующим образом: *«Энергетическая безопасность - состояние защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, печивается выполнение предусмотренных законодательством Российской Федерации требований к топливо- и энергоснабжению потребителей, а также выполнение экспортных контрактов и международных обязательств Российской Федерации».*

Заметим, что приоритеты, показанные в этом понятии, для условий РФ в целом, находящейся в суровых климатических условиях, и в ее экономике, тесно связанной с энергетическими отраслями, определены логично.

Реализация положений программных документов в области энергетики проходит при существовании определенных вызовов и угроз энергетической безопасности. Широко известны факты реализации т.н. стратегии «санкционных войн», направленных на затруднение, затягивание и срыв значимых для РФ энергетических проектов: отказ зарубежных инвесторов от финансирования проекта «Ямал-СПГ»; затягивание сроков сертификации по проекту «Северный поток-2».

Этот раздел статьи имеет цель определить контуры условий, в которых необходимо будет строить систему безопасности, направленную на снижение

экономической уязвимости энергетической отрасли.

При этом повышается значимость цифровизации энергетики, работа, которая развернута в рамках реализации программ Национальной технической инициативы (НТИ) «Энерджинет» что, в конечном счете, должно увенчаться построением к 2035 г. интеллектуальной энергетической системы России (ИЭСР).

В основе реализации НТИ «Энерджинет» (EnergyNet) лежит концепция так называемого «Интернета энергии», под которым понимают киберфизическую инфраструктуру для информационных систем децентрализованного интеллектуального управления энергосистемами, энергоузлами, системами электроснабжения и интеграции в них распределенных активных потребителей электрической энергии, распределенных источников энергии и энергетической гибкости.

Эффекты от реализации «Энерджинет» видятся в следующем:

- резкое снижение объемов или отсутствия необходимости ввода в действие новых объектов крупной генерации и магистральных сетей;
- снижение затрат на выполнение работ регламентного обслуживания и поддержания работоспособности цифровой энергетической инфраструктуры.

Однако, при этом нельзя забывать, что для условий цифровой энергетики становятся актуальными угрозы и уязвимости безопасности информации. В этом есть проявление тесной связи отраслевых особенностей и отраслевой направленности энергетики с подготовкой специалистов ИБ.

1.3. Безопасность и кибербезопасность объектов энергетики

В течение последних лет (с 2018 года) значимым трендом направленности в информационной и кибербезопасности является работа по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры РФ, в соответствии с требованиями [5]. К сфере этого закона (субъектам КИИ) относятся «... государственные органы, государственные учреждения, российские юридические лица и (или) индивидуальные предприниматели, которым на праве собственности, аренды или ином законном основании принадлежат информационные системы (ИС), информационно-телекоммуникационные сети (ИТС), автоматизированные системы управления (АСУ), функционирующие в сфере здравоохранения, науки, транспорта, связи, **энергетики** и др...».

Мы считаем, что в среднесрочной перспективе (7-10 лет) объем и интенсивность этой работы будет только нарастать. Эта уверенность является свидетельством аналогии с подобными процессами, связанными с обеспечением защиты персональных данных, официальный «старт» которым датируется 2007 годом, а в настоящий момент нет возможности констатировать что данная работа завершена. Следовательно, востребованность в специалистах, гото-

вых к выполнению подобных работ сохранится и будет повышаться.

Как уже было отмечено цифровизация экономики вообще и энергетической отрасли в частности порождает возникновение новых угроз безопасности в виде реализации киберугроз.

Сегодняшний день российской энергетики – это разработка и внедрение высокотехнологичных программно-аппаратных комплексов (ПАК) реализующих полный перечень технологической работы электрической подстанции.

Электрическая цифровая подстанция (ЦПС)

– это объект энергетического хозяйства, выполняющий основные технологические функции передачи, преобразования, распределения и снабжения электроэнергией потребителей, состоящий из интеллектуального первичного и вторичного оборудования, использующего унифицированный цифровой информационный обмен данными с целью поддержания его работоспособности и выполнения основных функций на основе открытого объектно-ориентированного стандарта МЭК 61850.

Уязвимости ПАК ЦПС, как и любого другого ПАК широко известны, исследованы и по принятой классификации (месту уязвимости в ИС) показаны на рис.1.

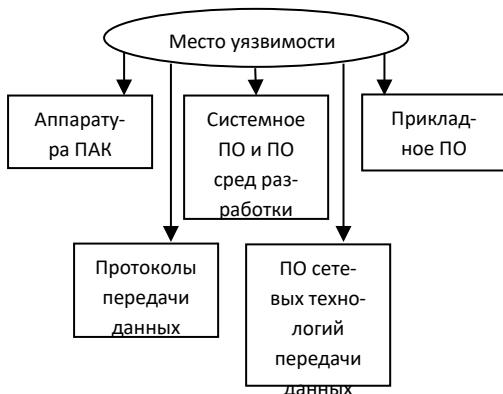


Рис.1. Уязвимости ПАК ЦПС

Каждая из категорий уязвимостей (рис.1) представлена, исследована, организована в соответствующие базы отечественные и зарубежные. Организованными кибер-сообществами и отдельными специалистами ведется постоянная работа по обнаружению новых уязвимостей.

Следовательно, по мере масштабного внедрения объектов типа ЦПС, в современной энергетике РФ создаются предпосылки образования дополнительных угроз энергетической безопасности, продиктованных возможностью нарушения штатных режимов функционирования энергетических объектов типа ЦПС.

Воздействия на объекты энергетики типа ПАК ЦПС, реализованные с организацией удаленного доступа к его ресурсам, становятся реальностью (рис.2).



Рис 2. Архитектура подстанции нового поколения (ЦПС) с ландшафтом кибератак (вариант)

Существует немало примеров, призванных продемонстрировать высокую вероятность реализации киберугроз, направленных на нарушение работы ЦПС. Начиная с 2015 года, проводятся регулярные киберсоревнования (в формате CTF – Capture The Flag, «захват флага») по данной тематике, направленные на реализацию угроз (взлом) ЦПС и на каждом из таких соревнований у победителей и призеров есть конкретные достижения, такие как:

- временное разрушение информационной инфраструктуры подстанции;
- перепрограммирование сервера времени;
- несанкционированное отключение электроэнергии от потребителей;
- обнаружение ранее неизвестных уязвимостей.

Из перечисленных возможность несанкционированного отключения электроэнергии особенно представляется "заманчивым" для реализации угроз по уровню опасности последствий, которые могут быть и уже были, например, авария на подстанции Чагино в Москве 25 мая 2005 года.

Особенно интересным представляется тот факт, что в данных соревнованиях успеха добиваются даже команды, члены которых не имеют специальной подготовки и знаний в областях релейной защиты и автоматики (РЗА) и автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Это свидетельствует о том, что:

- осуществление современных кибератак носит универсальный характер;
- кадровый потенциал реализации кибератак расширяется, т.к. компетенции современных специалистов из областей информационных технологий и кибербезопасности постоянно совершенствуются;
- имеет место трансграничность и высокая степень анонимности «авторов» кибератак;
- современные информационные технологии, внедряемые в энергетической отрасли РФ даже с учетом накопленного опыта обеспечения информационной безопасности, уязвимы;
- виды реагирования на признаки начала и развития кибератаки, которые могут применяться во многих случаях, в энергетике не применимы из-за наступления серьезных и даже катастрофических последствий, например, временное отключение систем энергоснабжения и их отдельных элементов.

Вместе с тем преимущества дальнейшего внедрения ЦПС представляются очевидными и заключаются в:

- снижении затрат на обслуживание за счет высокого уровня автоматизации управления подстанцией, механизмов самоконтроля и саморегулирования;
- сокращении длительности перерывов в электроснабжении потребителей за счет быстрой обработки информации об аварийных режимах и реакций систем;
- увеличении точности измерений учета электроэнергии, детектирования мест повреждения и др.;
- увеличении точности диагностики оборудования и снижение затрат на его ремонт за счет перехода к концепции ремонта по фактическому состоянию.

Этим можно объяснить, что стремительное сближение при масштабном внедрении в энергетику РФ ЦПС понятий «энергетическая безопасность» и «информационная безопасность» являются реалиями наших дней.

2. ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ ПО ИБ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Теперь перейдем непосредственно к освоению профессиональных компетенций бакалаврами, обучающимися по направлению «Информационная безопасность».

Необходимо отметить, что десятилетний опыт реализации образовательных программ по ИБ дает нам право сделать некоторый анализ и выводы.

За этот период наши программы были регламентированы четырьмя поколениями образовательных стандартов:

- ГОС ВПО по программе специалитета;
- ФГОС ВПО второго поколения (бакалавриат)
- ФГОС ВО третьего поколения версия 3+;
- ФГОС ВО третьего поколения версия 3++ [6].

На уровне ГОС ВПО по специальностям ИБ возможность поддержки отраслевой направленности отсутствовала практически полностью, так как был регламентирован полный перечень учебных дисциплин вместе с их детальным содержанием. Авторство этих стандартов принадлежит учебно-методическому совету, созданному при РГГУ, чем объяснялась гуманитарная направленность образования в области ИБ.

Переход на последующие версии стандартов был ознаменован появлением:

- базовой и вариативной части (компоненты);
- компетенций (общекультурных, общепрофессиональных, профессиональных);
- обязательной связи образовательных стандартов с профессиональными стандартами.

Очевидно, что переход на последующие версии стандартов позитивно повлиял на формирование отраслевой направленности в реализации программ подготовки по ИБ. Это обусловлено следующими факторами:

- во-первых, выделением вариативной, т.е. «вузовской», а, следовательно, и отраслевой компоненты программы с бюджетом до 60% общего объема времени;

- во-вторых, возможность или самостоятельного формирования профессионально - специализированных компетенций (ПСК в версии 3+), или формулирования их из трудовых функций и действий, описанных в профессиональных стандартах [7] (в версии 3++);

- в-третьих, предоставление образовательной организации, естественно, через т.н. выпускающую кафедру, полной свободы в определении названий и содержания учебных дисциплин, обеспечивающих освоение ПСК;

- в-четвертых, предоставление такой же «свободы» в части обеспечения практических форм обучения типа технологических практик

Необходимо отметить, что профессиональные стандарты, на основе положений которых в виде обобщенных и частных трудовых функций должны быть сформулированы профессиональные компетенции, в целом написаны в универсальной идеологии, которая определяет сферу деятельности специалистов в виде систем (автоматизированных, телекоммуникационных, компьютерных), т.е. без учета особенностей отраслевой принадлежности данных систем.

Приведем результаты конкретной работы кафедры БИТ по учету отраслевых особенностей энергетики и ее объектов в качестве объектов информационной безопасности.

В учебном плане подготовки бакалавриата по направлению 10.03.01 Информационная безопасность, профиль подготовки «Безопасность компьютерных систем», разработанном на основе ФГОС ВО 3+, кафедрой БИТ сформулированы следующие профессионально-специализированные компетенции (ПСК):

- ПСК-1 - способностью администрировать подсистемы информационной безопасности объектов, включая объекты энергетики КВО РФ, эксплуатирующие АСУ ТП;

- ПСК-2 - способностью применять программные средства системного, прикладного и специального назначения, в том числе для обеспечения безопасного функционирования объектов энергетики с элементами АСУ ТП;

- ПСК-3 - способностью применять комплексный подход к обеспечению информационной безопасности в различных сферах деятельности в том числе и на объектах энергетики, эксплуатирующих АСУ ТП.

Освоение перечисленных компетенций обеспечивается следующими, специально введенными в учебный план учебными дисциплинами профессионального блока:

1. Безопасность беспроводных сетей передачи информации;

2. Защита технологической информации в АСУ ТП;

3. Технологии защиты информационных систем от кибератак;

4. Технологии проактивной защиты информационных систем.

Дисциплины 2 и 4 представляют особый интерес в освоении бакалаврами ПСК для объектов энергетики в плане выстраивания стратегии и определения превентивных механизмов защиты информационных и автоматизированных систем типа ЦПС.

Преподавание дисциплин 2 – 4 программно и технически обеспечивается ресурсами базовой кафедры Кибербезопасности и информационных технологий (КИТ), созданной выпускающей кафедрой БИТ НИУ «МЭИ» на базе научно-технического центра «НТЦ ФСК ЕЭС» в 2019 году.

В лаборатории кафедры БИТ «Информационно-аналитические технологии безопасности» организован удаленный доступ к интерфейсу и ресурсам киберполигона ЦПС с SIEM-системой (Security Information and Event Management) или система управления событиями информационной безопасности. С использованием возможностей этого ресурса проводятся учебные занятия по мониторингу безопасности АСУ ТП ПАК ЦПС.

Для программы магистратуры по направлению ИБ кафедрой реализуются УИРС и формируются темы магистерских выпускных квалификационных работ по тематикам, связанным с интересами энергетики.

Мы считаем, что имеется насущная необходимость разработки отдельной части стандарта МЭК 61850 с названием: «Системы и сети связи на подстанциях. Требования по информационной безопасности». Подготовка такого стандарта позволит конкретизировать перечень мероприятий на цифровых энергетических объектах типа ЦПС по обеспечению безопасности технологической информации.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из всего изложенного очевидно, что отраслевые особенности обеспечения информационной безопасности объектов энергетики на кафедре БИТ есть, обеспечены методически, технически и программно, имеют положительную динамику развития и совершенствования.

Кафедра БИТ, кроме перечисленных, видит направления дальнейшего наращивания усилий по развитию отраслевой направленности образовательной деятельности по направлению подготовки ИБ и во внеаудиторной работе.

Понятно, что такой вид деятельности не может найти свое отражение в учебных программах и планах, однако польза для обучаемых от этого несомненна.

Речь здесь идет:

- во-первых, об участии в киберсоревнованиях по позитивному, или «белому» хакингу, где объектом воздействия являются цифровые энергетические системы. Примеры таких соревнований уже есть, однако, если устроителем их будет ведущий

энергетический вуз, пользу от такого мероприятия переоценить будет трудно;

- во-вторых, при проведении на кафедре БИТ ежегодной летней школы кибербезопасности обязательно присутствует энергетическая тематика в виде технологии и методов обеспечения безопасности объектов КИИ энергетики в виде проблемных лекций и соревновательных элементов СТФ;

- в-третьих, при углубленной подготовке группы бакалавров ИБ по программе «Эталон» компонента, связанная с отраслевой энергетической направленностью будет расширена за счет участия студентов в межвузовских «киберактивностях» таких как конференции, соревнования, образовательные курсы, практики и стажировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щеглов А.Ю.** Защита информации: основы теории: учебник для вузов. - Москва : Издательство Юрайт, 2021. - 309 с.
2. **Приказ ФСТЭК** 11 февраля 2013 г. N 17 Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в ГИС, <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702>.
3. **Приказ ФСТЭК** от 18 февраля 2013 г. N 21 Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных, <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/110-prikazy/691-prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21>
4. **Приказ ФСТЭК** 25 декабря 2017 г. N 239 Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры РФ, <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/obespechenie-bezopasnosti-kriticheskoy-informatsionnoj-infrastruktury/288-prikazy/1592-prikaz-fstek-rossii-ot-25-de-kabrya-2017-g-n-239>.
5. **Федеральный Закон** 26 июля 2017 г. N187 О безопасности критической информационной инфраструктуры РФ.
6. **ФГОС ВО (3++)** по направлению бакалавриата 10.03.01 Информационная безопасность, <http://fgosvo.ru/fgosvo/151/150/24/10>.
7. **Профессиональный стандарт** «Специалист по защите информации в автоматизированных системах», <https://docs.cntd.ru/document/420377328>.

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королёв

СЕРВИС ДЛЯ ОЦЕНКИ АКТУАЛЬНОСТИ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается понятие актуальности научной публикации и представлено описание сервиса, предназначенного для оценки величины актуальности с помощью анализа текста публикации. Подробно изложено внутреннее устройство сервиса и его отдельных блоков. Приведён алгоритм расчёта значения актуальности, использующий представление текста в виде набора ключевых фраз и рассматривающий их векторные представления и расстояния между ними в пространстве большой размерности.

Ключевые слова – извлечение информации из текста, векторные представления слов, рекомендательная система, определение актуальности

1. ВВЕДЕНИЕ

Рекомендательные системы [1] как инструмент искусственного интеллекта становятся всё более популярными и начинают применяться в областях, где ранее использовались только знания экспертов. Можно наблюдать, как с каждым днём появляется всё больше новых алгоритмов машинного обучения и систем, построенных с их применением. Также увеличивается количество готовых инструментов, которые можно использовать для решения отдельных подзадач в рамках более крупных и сложных систем и сервисов.

Одна из сфер, где машинное обучение в целом и рекомендательные системы в частности становятся всё более популярны, – это сфера образовательных услуг [2].

Одной из задач, которые в настоящее время решаются силами людей-экспертов, является определение актуальности научных текстов различного уровня (выпускные квалификационные работы, доклады на конференциях, статьи в научных журналах и т.п.). В данной работе рассматривается система, с помощью которой можно проанализировать текст на русском языке и определить его актуальность, которая после этого может быть использована как один из критериев качества текста [3].

2. ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ОПЫТ И ПРИМЕНЕНИЕ В СФЕРЕ ОБРАЗОВАНИЯ

Авторы рассматривают два основных сценария использования описанного в данной работе сервиса.

Первый сценарий – определение качества текста статьи для её автора. При этом полученное значение актуальности текста можно трактовать как некоторую внешнюю оценку и пытаться изменять текст для повышения этой оценки.

Второй сценарий – использование величины актуальности для построения фильтра при необходимости обработки большого количества текстов, например, при выборе статей для публикации или для участия в конференции.

В обоих приведённых сценариях взаимодействие с сервисом начинается с загрузки файла с текстом статьи и заканчивается получением результата после его обработки. Взаимодействие с сервисом может быть как синхронным, через пользовательский веб-интерфейс, так и асинхронным, через запуск обработки набора файлов в директории.

Также оба сценария могут быть использованы научными сотрудниками и студентами университетов для получения и использования информации по статьям, позволяющей им получать на выходе актуальный текст публикации. Такой механизм способен поднять университет в мировых рейтингах на несколько строчек выше – за счёт рейтинга цитируемости университетов QS [4].

Рассматриваемая система позволит увеличить индекс цитируемости и сможет способствовать продвижению университета в мировых строчках рейтингов, а также привлечёт новых специалистов и учёных, что позволит увеличить качество образовательного процесса. Преподаватели и студенты, использующие данную систему, смогут получать дополнительные возможности повышения своей квалификации, а также получать гранты и награды за свои научные работы.

3. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СЕРВИСА

Ядро системы («ЯДРО») содержит реализацию основных алгоритмов и базу данных MySQL. В том числе, в ядре хранится информация о заранее сформированном наборе тем и реализован функционал вычисления их актуальности.

В модуль обработки естественного языка («НЛП») собраны реализации отдельных инструментов для решения нескольких задач, таких как: фильтр непригодных для дальнейшей обработки ключевых слов, функционал для различных операций над векторными представлениями текстовой информации, например, для вычисления расстояний между ключевыми фразами и т.п.

Модуль для извлечения ключевых слов («Ключевые слова») используется для анализа текста статьи и выделения из него ключевых словосочетаний и слов. Этот функционал выделен в отдельный модуль, так как для решения данной задачи могут быть использованы существующие инструменты.

Модуль вычисления векторных представлений («Эмбединги») применяется для хранения и предоставления доступа к разным типам используемых векторных представлений.

Данная структура компонентов показана на рис. 1.

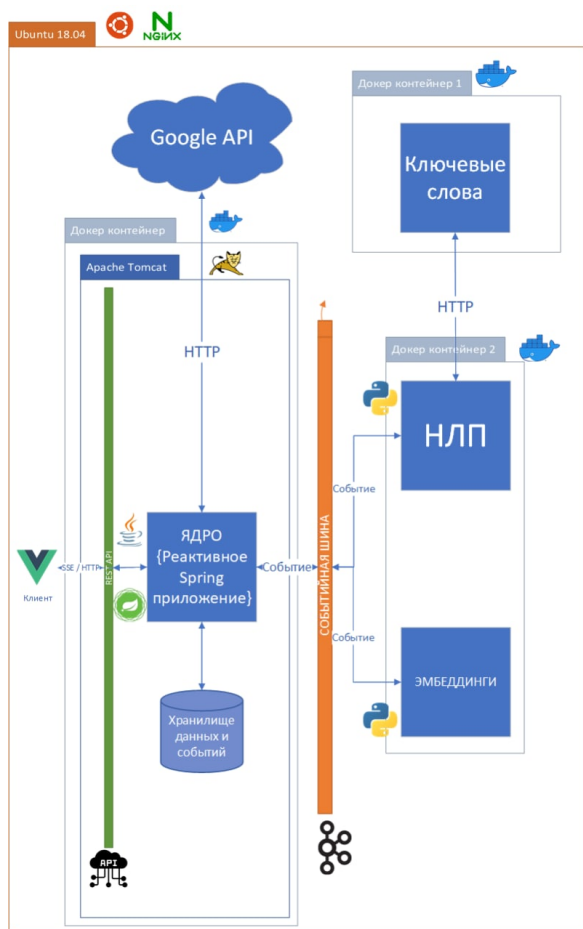


Рис. 1. Диаграмма компонентов сервиса.

При данном подходе взаимодействие клиентской и серверной частей системы реализуется за счёт использования серверных событий.

Функционал ядра реализован на языке программирования Java, модули реализованы на языке программирования Python.

Данная структура сервиса в ходе проведения оценок качества работы и тестирования проявила себя как наиболее подходящий вариант для реализации и развёртывания.

4. АЛГОРИТМЫ И ПРОЦЕССЫ СЕРВИСА

4.1. Основная идея

Работа сервиса построена на основе следующих гипотез:

1. Содержание статьи можно представить в виде набора ключевых фраз и слов, извлечённых из текста;
2. Актуальность отдельной ключевой фразы можно вычислить, исходя из расстояний до заранее выбранных классов (тем) в пространстве векторных представлений;

3. Актуальность классов может быть определена по частоте упоминания в сети Интернет.

Так, например, если текст статьи включает в себя множество слов или терминов, связанных с решением уравнений, то такую статью можно отнести к классам «Математика» и «Естественнонаучные дисциплины» и вычислить актуальность статьи на основании актуальностей этих классов.

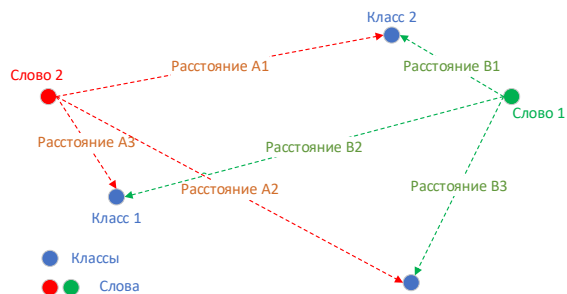


Рис. 2. Визуализация расстояний между классами и ключевыми словами.

Базовый алгоритм работы сервиса состоит из следующих этапов [5]:

1. На вход подаётся статья, после загрузки которой через веб-интерфейс происходит подготовка её текста к отправке в модуль извлечения ключевых слов. Данная обработка начинается с этапа фильтрации текста с помощью инструмента Apache POI [6]. Также, если на вход поступает текст в формате файла PDF, то используется IText [7].

2. После извлечения текста из файла он проходит несколько этапов обработки с целью удаления служебных символов и нерелевантных блоков.

3. Затем обработанный текст отправляется в модуль выделения ключевых слов, из которого возвращается список кандидатов в ключевые слова.

4. С помощью фильтра часть кандидатов в ключевые слова отсеивается.

5. На основании оставшихся ключевых слов определяется принадлежность статьи к классам. Актуальность статьи вычисляется как функция от расстояний до классов и их собственных актуальностей.

6. На основании полученных значений актуальностей формируются рекомендации по изменению обрабатываемого текста.

4.2. Вычисление векторных представлений

Существует большое количество моделей, которые предобучены для построения векторных представлений слов, фраз и предложений, например, Navex [8], Laser [9], ruBERT [10]. Также возможно использование случайных векторных представлений в качестве некоторого базового варианта для сравнения с другими.

Результаты, представленные в данной работе, получены при использовании векторных представлений слов из Navex. При этом для многосложных фраз векторные представления вычислялись как средние арифметические

векторных представлений начальных форм слов [11], составляющих фразы.

4.3. Алгоритм определения классов

Для построения фиксированного набора классов, которые используются как некоторые стабильные точки в пространстве векторных представлений, было проанализировано множество авторских ключевых слов из набора научных статей.

Общее количество рассмотренных статей – около 300, количество уникальных ключевых слов и фраз из них, для которых Navес возвращает векторные представления, – около 900.

Для полученных точек в пространстве векторных представлений была проведена кластеризация [12] и выбрано оптимальное количество кластеров – 13. Центроиды полученных кластеров показаны на рис. 3.

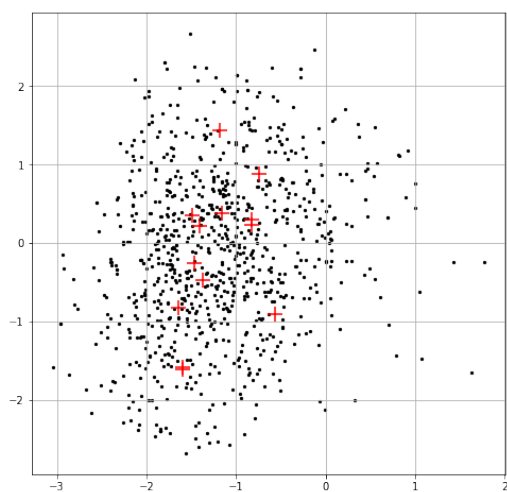


Рис. 3. Красные знаки «плюс» – центроиды кластеров, чёрные точки – авторские ключевые слова.

4.4. Актуальность классов

Как уже было отмечено выше, в данной работе предполагается, что величина актуальности для каждого класса может быть определена путём опроса поискового API и получения числа упоминаний в сети Интернет.

Поисковый запрос выполняется каждые 24 часа для каждого из классов и результат сохраняется.

На данный момент при работе сервиса всегда используются самые свежие данные по актуальности классов, однако в дальнейшем планируется моделировать динамику изменения актуальности и учитывать не только текущие значения, но и прогнозируемые будущие.

4.5. Алгоритм выделения ключевых фраз и слов

Возможны различные реализации данного алгоритма, из которых в рассматриваемом сервисе выбран подход, использующий статистические характеристики употребления отдельных слов в тексте. Это сделано в том числе для того, чтобы результат работы данного алгоритма не был связан с логикой работы алгоритмов, используемых в других модулях системы.

В качестве конкретной реализации выбран Yet Another Keyword Extractor (Y.A.K.E.) [13], который изначально доступен в поставке с Docker-образом и имеет REST API, что позволяет удобным образом использовать его как отдельный компонент.

В качестве одной из настроек можно указать количество возвращаемых ключевых фраз и слов, которое установлено равным 13, то есть равным количеству используемых классов.

На рис. 4 в качестве примера представлены центры стабильных классов и извлечённые из текста ключевые фразы.

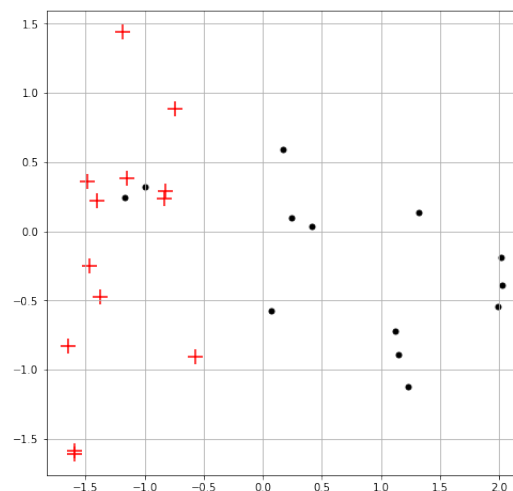


Рис. 4. Красные знаки «плюс» – центроиды кластеров, чёрные точки – извлечённые ключевые фразы и слова.

4.6. Алгоритм фильтрации

Цель алгоритма – проанализировать результат работы алгоритма выделения ключевых фраз и слов и отобрать из этого результата только те ключевые фразы, которые представляют ценность и интерес.

Данный алгоритм реализован с помощью искусственной нейронной сети архитектуры «Автокодировщик» [14], то есть такой сети, в которой размеры входного и выходного слоёв совпадают, а в скрытых слоях меньше нейронов, чем во входном или выходном слоях. Такая архитектура позволяет гарантировать, что сеть не «запоминает» данные из обучающей выборки, а извлекает из них некоторые зависимости и свойства.

В качестве входных данных используется набор ключевых фраз и слов, а в качестве выходных данных ожидаются значения, которые должны совпадать с входными. В качестве метрики производительности используется среднеквадратичная ошибка между ожидаемым и полученным в реальности результатом.

Количество нейронов входного и выходного слоёв соответствует размеру векторного представления Navес и равно 300.

Вследствие проведённых вычислительных экспериментов установлено [15], что для качественного обучения и функционирования модели оптимально использовать один скрытый слой.

Также, как показано на рис. 5, модель позволяет использовать различные значения для размера скрытого слоя. В данной работе, используя так называемое «правило локтя», было выбрано значение 100.

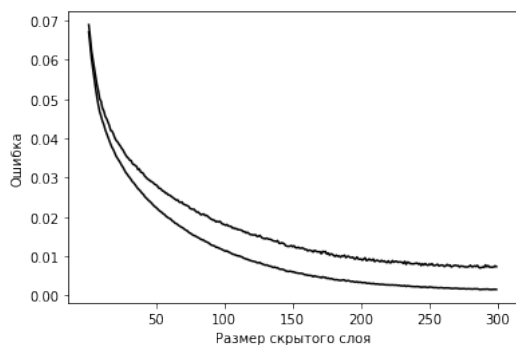


Рис. 5. Верхняя кривая – ошибка на тестовой выборке, нижняя кривая – ошибка на обучающей выборке.

Количество эпох на этапе обучения было выбрано равным 40, активационные функции для входного и скрытого слоя – ReLU, для выходного слоя – линейная.

Итого, алгоритм фильтрации, использующий данную модель, имеет вид:

1. Векторное представление извлечённой ключевой фразы или слова подаётся на вход нейронной сети, которая на выходе генерирует числовой вектор той же размерности, что и векторное представление.

2. Вычисляется среднеквадратичная ошибка, то есть евклидово расстояние между входным и выходным векторами. Полученное значение трактуется как величина, обратная степени уверенности: чем выше ошибка, тем меньше уверенность, что ключевую фразу нужно использовать.

3. Вычисленное значение ошибки сравнивается с пороговым значением, которое равно среднему арифметическому ошибок для всех ключевых фраз и слов, извлечённых из одного текста.

4. В итоговый список ключевых фраз и слов (результат работы данного алгоритма) добавляются только те, для которых ошибка работы нейронной сети ниже порогового значения.

4.7. Вычисление величины актуальности текста статьи

Так как величины актуальностей классов представляют собой большие числа, в том числе иногда отличающиеся на порядки, для удобства работы с ними выполняется нормировка с использованием функции softmax:

$$\hat{A}_i = \frac{e^{A_i}}{\sum_j e^{A_j}} \quad (1)$$

где A_i – актуальность i -го класса.

Далее, для определения актуальности какой-либо из ключевых фраз, извлечённых из текста статьи и прошедших фильтрацию, вычисляется

набор расстояний d_{ij} от этой ключевой фразы или слова до каждого класса.

Затем получившиеся расстояния нормируются:

$$\hat{d}_{ij} = \frac{e^{d_{ij}}}{\sum_k e^{d_{ik}}} \quad (2)$$

Итоговое выражение для актуальности выбранной ключевой фразы или слова выглядит следующим образом:

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{A}_j (1 - \hat{d}_{ij}) \quad (3)$$

где N – количество классов.

Таким образом, полученные значения актуальностей отдельных ключевых фраз и слов, так же как и нормированные значения актуальностей классов и расстояний, принимают значения в интервале от 0 до 1, что позволяет трактовать их как вероятности.

Актуальность статьи в целом определяется как сумма актуальностей отдельных ключевых фраз и слов, извлечённых из её текста и прошедших фильтр. Распределение рассчитанной величины актуальности для загруженных в сервис статей представлено на рис. 6.

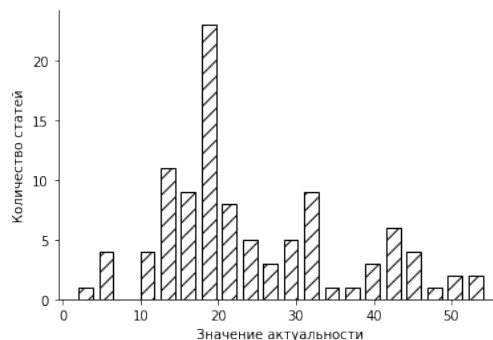


Рис. 6. Количество статей в зависимости от величины рассчитанной актуальности.

5. ВОЗМОЖНОСТИ ВЕБ-ИНТЕРФЕЙСА СЕРВИСА

В разработанном с помощью Quasar Framework веб-интерфейсе сервиса можно в реальном времени увидеть, на каком этапе обработки сейчас находится загруженная статья.

Всего реализовано отображение пяти этапов обработки:

1. «Сохранение публикации»;
2. «Подготовка публикации к анализу»;
3. «Анализ текста публикации»;
4. «Фильтрация результатов»;
5. «Формирование рекомендаций».

После окончания обработки, то есть после получения рекомендаций, пользователю с правами администратора доступен просмотр подробных результатов анализа. Они представляют собой таблицы со следующими данными:

1. Актуальности текущего набора классов;
2. Список выделенных ключевых фраз и слов;
3. Рассчитанные актуальности ключевых фраз и слов;

4. Результаты фильтрации.

Также для просмотра доступен дополнительный раздел со списком ранее проанализированных статей для текущего пользователя, а также со списком выданных сертификатов – документов с QR-кодами, в которых закодированы ссылки на страницы с результатами анализа загруженных текстов.

В этом разделе также можно выгрузить ранее загруженные статьи и соответствующие им сертификаты.

Возможен просмотр информации об изменениях актуальности по каждому классу, в том числе с визуализацией в виде графиков.

Разработан функционал гибкой настройки параметров работы сервиса, например, гиперпараметров У.А.К.Е. или коэффициентов, которые могут быть использованы в формулах для вычисления актуальностей.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время описанный в данной работе сервис проходит этап опытно-промышленной эксплуатации. Результаты проведенных вычислительных экспериментов и обратная связь, полученная от пользователей сервиса, показывают, что предложенный подход позволяет получить величину, которая может быть использована как одна из характеристик научного текста в различных прикладных задачах.

Дальнейшее развитие системы планируется в двух основных направлениях: первое – оптимизация и, при необходимости, замена отдельных модулей и алгоритмов системы, которые покажут себя наименее эффективными. Второе – использование получаемых значений актуальности для прогнозирования будущей цитируемости научных статей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рекомендательные системы: как помочь пользователю найти то, что ему нужно?** // [Электронный ресурс]. – <https://vc.ru/marketing/152926-rekomendatelnysistemy-kak-pomoch-polzovatelyu-nayti-to-cto-emu-nuzhno> (дата обращения 21.11.2020).
2. **Статистика российского образования** // [Электронный ресурс]. – <http://stat.edu.ru/stat/vis.shtml> (дата обращения 12.06.2020).
3. **Мосалов О.П.** Определение актуальности публикаций с использованием методов машинного обучения // Большие данные в образовании: анализ данных как основание принятия управленческих решений. Сборник научных статей I Международной конференции. 15 октября 2020 г., Москва: Издательский дом «Дело» РАНХиГС. 2020. С. 172–182.
4. **QS rankings** // [Электронный ресурс] – <https://www.topuniversities.com/university-rankings> (дата обращения 01.12.2021).
5. **Мосалов О.П., Иванов И.А., Першин М.А.** Применение методов кластеризации и машинного обучения для построения рекомендательной системы для определения актуальности научных публикаций // Информационно-технологический вестник – 2021 – N 4(30) (в печати).
6. **Apache Software Foundation, Apache POI – the Java API for Microsoft Documents** // [Электронный ресурс]. – <https://poi.apache.org> (дата обращения 09.07.2020).
7. **iText, iText 7 core** // [Электронный ресурс]. – <https://itextpdf.com/ru/products/itext-7/itext-7-core> (дата обращения 21.07.2020).
8. **Compact high quality word embeddings for Russian language** // [Электронный ресурс]. – <https://github.com/natasha/navec> (дата обращения 20.04.2021).
9. **LASER Language-Agnostic SEntence Representations** // [Электронный ресурс]. – <https://github.com/facebookresearch/LASER> (дата обращения 14.11.2021).
10. **Pre-trained embeddings. DeepPavlov** // [Электронный ресурс]. – http://docs.deeppavlov.ai/en/master/features/pretrained_vectors.html (дата обращения 04.03.2020).
11. **Korobov M.** Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages // Analysis of Images, Social Networks and Texts, 2015, P. 320–332.
12. **Воронцов К.В.** Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования. Курс лекций // МГУ, 2007.
13. **Yet Another Keyword Extractor (Yake). Unsupervised Approach for Automatic Keyword Extraction using Text Features** // [Электронный ресурс] – <https://github.com/LIAAD/yake> (дата обращения 27.08.2020).
14. **Goodfellow I., Bengio Y. and Courville A.** Deep Learning // MIT Press. 2016.
15. **Мосалов О.П., Иванов И.А.** Использование автокодировщика для фильтрации в задаче извлечения ключевых слов из текста // XXIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2021» – М.: МИФИ – 2021. С. 253–262.

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ В СОСТАВЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АННОТАЦИЯ

В работе описывается внедрение современных технологий роботизации процессов и технологий искусственного интеллекта в образовательный процесс. Рассматривается пример построения цифрового ассистента для преподавателя и пример его использования на кафедре прикладной математики и искусственного интеллекта (ПМИИ) НИУ «МЭИ» в учебном процессе по курсам «Методы контроля программ», «CASE-технологии разработки программных средств», «Распределенные системы и параллельные вычисления».

Ключевые слова – роботизация процессов, рассуждения на основе прецедентов, искусственный интеллект, поддержка принятия решений, электронное образование, дистанционные образовательные технологии

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время бурное развитие получили технологии цифровизации многих сфер человеческой деятельности. В связи с масштабными противоэпидемиологическими мероприятиями, направленными на сдерживание распространения новой коронавирусной инфекции, мощный импульс в развитии получили электронное образование (ЭО) и дистанционные образовательные технологии (ДОТ). Помимо традиционно применяемых в ЭО инструментов (электронных учебных ресурсах, средств тестирования, средств организации видеоконференций и т.п.) начала формироваться потребность в специализированных средствах, облегчающих работу преподавателям, снимая часть нагрузки, сформировавшейся из-за перевода общения со студентами в электронную форму (например рассылку индивидуальных заданий по электронной почте, первичную проверку предоставляемых студентами работ и отчетов на соответствие требованиям, отсутствие списывания и др.). Помочь в построении и оперативном внедрении таких средств могут интеграция современных достижений в области роботизации процессов (RPA, от англ. robotic process automation) [1-4] и наработок, полученных в результате исследований по разработке моделей, методов и базовых инструментальных программных средств для конструирования перспективных интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР), проводимых начиная с 1990-х годов по инициативе Д.А. Пospelova на кафедре прикладной математики (в настоящее время кафедре ПМИИ) НИУ «МЭИ» [5-8]. В данной работе рассматривается пример такой интеграции для построения цифрового сотрудника – ассистента преподавателя, помогающего выполнять первичную проверку лабораторных работ и коммуникацию со студентами.

2. ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОГО АССИСТЕНТА ПРЕПОДАВАТЕЛЯ

2.1. Технология роботизации процессов

Согласно определениям в мировой литературе, цифровые сотрудники – это программные средства роботизации процессов, использующие для решения задач не только низкоуровневые интерфейсы (API, от англ. application programming interface) для взаимодействия с корпоративными системами, но и их графический пользовательский интерфейс (GUI, от англ. graphic user interface) [1]. RPA предполагает автоматизацию технических, сервисных и вспомогательных задач, которые ранее выполнялись людьми. В настоящее время бурно развиваются платформы, позволяющие создавать цифровых сотрудников (см. например [9, 10]). Эти платформы изначально многое заимствовали у систем автоматизации функционального тестирования приложений через GUI [11], однако в настоящее время активно расширяются технологиями искусственного интеллекта (ИИ), для расширения числа возможных автоматизируемых сценариев. Например, если ранее цифровые сотрудники имели в своем арсенале в основном средства манипулирования данными на базе заданного паттерна поведения или скрипта (например, такой робот мог собирать данные из различных текстовых источников (электронных писем, документов, таблиц, заметок) в ERP- или CRM-системы (от англ. ERP, enterprise resource planning – система управления ресурсами предприятия, и CRM, customer relationship management – система управления взаимоотношениями с клиентами) [12]), то в настоящее время активно прорабатываются и внедряются методы RPA на основе применения продукционных систем [13], систем рассуждений на основе прецедентов [14], методов обработки естественного языка. Цифровые сотрудники получили и возможность обучения (как с учителем, так и без) [15]. Благодаря этому значительно расширилась область возможного применения цифровых сотрудников, что в совокупности с относительно простыми реализацией и внедрением таких роботов привело к их активному внедрению в коммерческий и государственный сектора экономики [16].

Выделяются следующие преимущества цифровых сотрудников [17, 18]:

- 1) работает круглосуточно, не устает и не ошибается (особенно полезно в моменты пиковых нагрузок перед контрольными мероприятиями);
- 2) способен увеличить производительность работы и сократить количество ошибок;

3) не требует доработки используемых корпоративных систем;

4) настраивается и адаптируется под конкретный процесс.

Взрывной рост электронного документооборота в образовательном процессе в результате вынужденного широкомасштабного перехода к ЭО и ДОТ сформировал пространство для внедрения цифровых сотрудников и в этом секторе деятельности.

Рассмотрим пример такого цифрового сотрудника, играющего роль ассистента преподавателя.

2.2. Решаемая задача

Система цифровой ассистент преподавателя (СЦАП) предназначена для решения следующих задач:

1) рассылки студентам посредством электронной почты домашних заданий и заданий на лабораторные работы и методических материалов в даты согласно рабочей программе соответствующей дисциплины;

2) приема и первичной проверки выполненных работ.

Для решения первой задачи не требуется применения каких-то сложных методов. Достаточно сформировать базу студентов, включающую их личные адреса электронной почты (e-mail), и график выдачи заданий с шаблоном задания и методическими материалами, которые далее будут использоваться планировщиком.

Вторая задача более интересна, так как она выходит за рамки обычной автоматизации и для решения на должном уровне качества требует применения технологий ИИ. Для ее решения СЦАП требуется:

- 1) получить от студента выполненную работу;
- 2) выполнить проверку полученных материалов;
- 3) принять решение и:
 - a) выслать студенту замечания и вопросы при их наличии;
 - b) передать работу и результаты автоматической проверки для финальной проверки и оценки преподавателем по курсу.

Передача работ на проверку в условиях ЭО и ДОТ может выполняться по-разному: это может быть загрузка архива с выполненной работой на какой-то специализированный ресурс, размещение архива на сетевом диске или в сетевой папке, отправка материалов вложением в электронном письме на адрес преподавателя. СЦАП должна поддерживать любой из этих источников. При этом получение выполненных работ из электронной почты является наиболее сложным в связи с сильным влиянием человеческого фактора:

1) студент может прислать письмо с неизвестного системе электронного адреса (на практике это случается довольно часто, т.к. у обучаемых помимо электронных адресов, предоставленных образовательной организацией, есть личные адреса. В этом случае СЦАП должна попробовать выполнить

идентификацию студента по имеющейся в теле письма и во вложенных материалах информации, а затем расширить базу данных (БД) о студентах в случае успеха);

2) студент может не указать в заголовке или теле письма какой-либо информации, идентифицирующей передаваемую на проверку работу (ее следует по возможности извлечь из приложенных материалов, в том числе применяя метод исключения. В случае ошибки идентификации работы посредством электронной почты может быть направлен уточняющий вопрос студенту или же письмо студента может быть направлено на ручной разбор преподавателю);

3) студент может прислать уточняющие вопросы (тут могут применяться как технология виртуального собеседника, предоставляющего ответы на типовые вопросы (для реализации этого режима могут использоваться методы классификации текста совместно с методами рассуждений на основе прецедентов [19, 20]), так и направление на ручной разбор преподавателю).

Проверка работы и принятие решений – более сложные задачи. Глубина и качество анализа, который может на этом этапе выполнять СЦАП, зависят от сути предоставляемой на проверку работы. Обычно проверка предполагает:

- 1) контроль формальных требований (наличие отчета, наличие требуемых рабочих материалов, иных артефактов);
- 2) контроль заимствований (списываний);
- 3) выполнение запланированного преподавателем плана контролей рабочих материалов и отчетов.

В случае, если работа прошла контроль СЦАП, она выгружает полученные материалы и протокол проверки в базу проверенных работ и направляет оповещение преподавателю для выполнения итоговой проверки и оценки.

Важной функцией СЦАП является возможность конфигурирования собственного плана контролей для каждого типа проверяемого задания. Например, для многих курсов, читаемых студентам кафедры ПМИИ НИУ «МЭИ», характерно то, что лабораторные работы предполагают разработку учебных программ на разных языках программирования, которые могут быть подвергнуты следующим обязательным проверкам:

- 1) контролю компилируемости (присланное студентом решение должно собираться);
- 2) контролю с помощью статических анализаторов [21] (например, с помощью `roslyn analyzers`, `srccheck` и др. в зависимости от языка программирования);
- 3) контроль по спецификации (если преподаватель создал модульные или автоматические тесты, они могут быть использованы для автоматической проверки выполненного обучаемым решения).

Далее рассмотрим предлагаемую архитектуру СЦАП, решающей вышеперечисленные задачи, ис-

пользуемые при ее реализации методы и общую схему ее работы.

2.3. Используемые методы, архитектура цифрового ассистента преподавателя и общая схема его функционирования

Данная работа является продолжением в серии работ [8, 14, 22], в которых был раскрыт ряд техник и методов, предлагаемых для построения систем типа «цифровой сотрудник». В частности, для общего управления рабочим циклом используется система продукций, а при реализации механизма автоматического ответа на вопросы, полученные посредством электронной почты, используются методы классификации текстов на естественном языке (ЕЯ) и методы вывода на основе прецедентов, рассмотренные в работе [22].

Для реализации СЦАП потребовалось сформировать специализированные структуры данных, которые содержат информацию о дисциплинах, данные студентов и материалы принятых от студентов работ. Структура данных о дисциплинах показана на рис. 1.

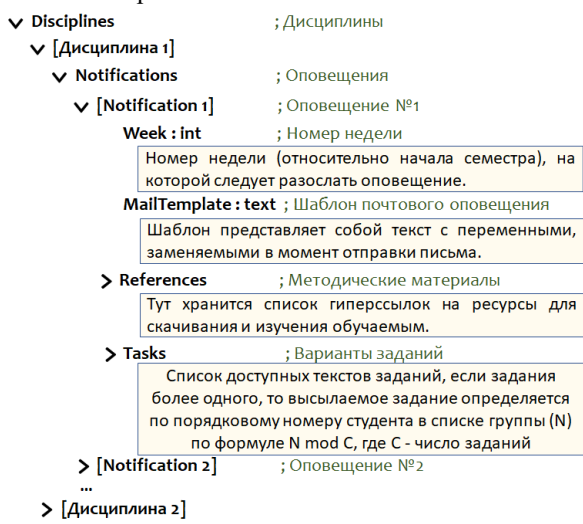


Рис.1. Упрощенная структура базы дисциплин

Для каждой дисциплины хранится информация об оповещениях. Каждое оповещение содержит имя, шаблон электронного письма, ссылки на методические материалы и (опционально) задания. Эта структура используется СЦАП для отправки напоминаний и рассылки заданий на практические и лабораторные занятия посредством электронной почты. Шаблон письма представляет из себя текст, в котором внедрены переменные вида %Переменная% (например, %Фамилия И.О. студента%), вычисляемые в момент отправки. Секция вариантов заданий (Tasks) используется не только для выбора и отсылки вариантов заданий. Данные в этой секции также используются при проверке полученных от студентов работ, так как для каждого задания прописывается набор контрольных мероприятий (КМ).

На рис. 2 показана упрощенная архитектура СЦАП.

База студентов хранит список студентов: для каждого студента хранится идентифицирующая информация, список дисциплин, по каждой дисциплине хранится информация о принятых работах.

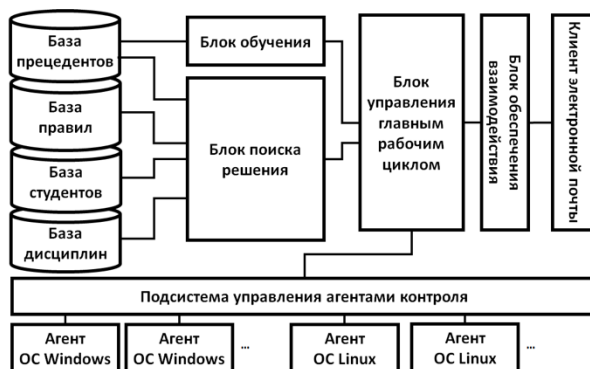


Рис.2. Упрощенная архитектура СЦАП

Блок управления осуществляет общую координацию работы системы. Он реализован на основе продукционной системы. Этот блок содержит планировщик, который в необходимые моменты времени ставит задачи на отсылку оповещений и также по расписанию проверяет почтовый ящик на наличие писем с работами на проверку и вопросами. На первом этапе производится опознание студента. Если письмо получено от неизвестного студента и в теле письма и вложениях нет информации, которая позволит идентифицировать студента – письмо направляется на разбор вручную. На втором этапе письмо передается в блок поиска решения. Блок поиска решения используется в процессе обработки полученного письма от студента. На первом шаге выполняется классификация письма (вопрос по заданию или сдаваемая на проверку работа) для этого используются методы рассуждений на основе прецедентов и методы классификации текстов на ЕЯ, в простейшем случае письма с работами на проверку могут отличаться по формату заголовков и наличию вложений. Если это работа на проверку, то сначала выполняется поиск задания в структуре данных о дисциплинах и загружается список КМ. Далее выполняется проверка работы на заимствования из других работ (при этом как источник информации используется база принятых работ). Используемый алгоритм проверки учитывает не только текст отчета о выполненной работе, но и присылаемые файлы исходного кода и иные материалы (при наличии). Далее проверка выполняется подсистемой управления агентами контроля. Агенты контроля исполняют скрытые проверки, заданные для соответствующей работы преподавателем, и формируют протокол контроля.

2.4. Программная реализация

В рамках работы реализован и апробирован на практике прототип цифрового сотрудника ассистента преподавателя. Прототип реализован на платформе .NET 5 с применением языка C# в среде раз-

работки Microsoft Visual Studio 2019. В прототипе была использована СУБД MySQL.

Практическое использование разработанного прототипа дало следующие положительные эффекты:

- 1) ускорилась обратная связь, так как СЦАП обрабатывала электронную почту в режиме «24/7» (особенно процессы ускоряются в случае наличия замечаний к оформлению и содержанию работы);
- 2) увеличилось число выявленных замечаний;
- 3) за счёт использования средств по выявлению некорректных заимствований и тиражирования работ значительно снизился процент списанных работ.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен пример внедрения технологий RPA в образовательный процесс на примере конструирования цифрового сотрудника – ассистента преподавателя. Практическое использование разработанного прототипа показало перспективность внедрения технологий RPA в образовательный процесс, в связи с чем планируется расширить возможности созданной системы, упростить ее конфигурирование и адаптируемость к другим курсам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 20-07-00498, 20-57-00015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Clint Boulton**. What is RPA? A revolution in business process automation, [Электронный ресурс]. – <https://www.cio.com/article/3236451/business-process-management/what-is-rpa-robotic-process-automation-explained.html> (дата обращения 22.11.2018).
2. **Aguirre, S., Rodriguez, A.**: Automation of a Business Process Using Robotic Process Automation (RPA): A Case Study. In: J.C. Figueroa-García et al. (eds.): WEA 2017, Communications in Computer and Information Science, vol. 742, pp. 65–71. Springer, Heidelberg.
3. **Anagnoste, S.**: Robotic Automation Process-The next major revolution in terms of back-office operations improvement. In: Proc. of the Intern. Conf. on Business Excellence, vol. 11, no. 1, pp. 676-686. De Gruyter Open (2017)
4. **Asatiani, A., Penttinen, E.**: Turning robotic process automation into commercial success – case. OpusCapita. J. Inf. Technol. Teach. Cases. 6, 67–74 (2016)
5. **Вагин В.Н., Еремеев А.П., Кутепов В.П., Фальк В.Н., Фоминых И.Б.** К 40-летию кафедры прикладной математики: исследования и разработки в области обучения, программирования, информационных технологий и искусственного интеллекта // Вестник МЭИ, № 4, 2017, с.117-128. ISSN: 1993-6982.
6. **Вагин В.Н., Еремеев А.П.** Некоторые базовые принципы построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени // Изв. РАН. Теория и системы управления - 2001. - № 6. - С. 114-123.
7. **Башлыков А.А., Еремеев А.П.** Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 351 с.
8. **Kurilenko I.E., Nikonov I.E.** Virtual Employee Implementation Using Temporal Case-based Reasoning // CEUR Workshop proc., 2019, № Vol-2413, с. 77-85.
9. **Cewe, C., Koch, D., Mertens, R.**: Minimal Effort Requirements Engineering for Robotic Process Automation with Test Driven Development and Screen Recording. In: E. Teniente and M. Weidlich (eds.) BPM 2017 Workshops, LNBIP 308, pp. 642–648. Springer (2018)
10. **Платформа UiPath** // [Электронный ресурс]. – <https://www.uipath.com/> (дата обращения 22.11.2021).
11. **Платформа TruBot** // [Электронный ресурс]. – <https://www.datamatics.com/intelligent-automation/rpa-trubot/> (дата обращения 22.11.2021).
12. **Lacity, M., Willcocks, L. P., & Craig, A.** (2015). Robotic process automation at Telefonica O2. 15., [Электронный ресурс]. – http://eprints.lse.ac.uk/64516/1/OUWRPS_15_02_published.pdf (дата обращения 22.11.2021).
13. **Rajesh, K.V.N. Ramesh and Hanumantha Rao** (2018). Robotic Process Automation: A Death knell to dead-end jobs. CSI Communications-Knowledge Digest for IT Community, Volume No.42, Issue No.3, 10-14.
14. **Kurilenko I.E.** Case-based reasoning application to maintenance department virtual employee implementation // XVI Int. AI conf. RCAI 2018, vol. 2, pp. 238 – 244.
15. **Del Fiol G, Michelson M, Iorio A, Cotoi C, Haynes RB.** A Deep Learning Method to Automatically Identify Reports of Scientifically Rigorous Clinical Research from the Biomedical Literature: Comparative Analytic Study. J Med Internet Res 2018;20(6):e10281
16. **Косоруков А. А.** Роботизация в сфере государственного управления // Социодинамика. 2019. №11.
17. **Madakam, Somayya, Holmukhe, Rajesh M., & Jaiswal, Durgesh Kumar.** The Future Digital Work Force: Robotic Process Automation (RPA). JISTEM - Journal of Information Systems and Technology Management, 16, e201916001. Epub January 10, 2019.
18. **Institute for Robotic Process Automation: Introduction to Robotic Process Automation.** // [Электронный ресурс]. – <https://irpaai.com/wp-content/uploads/2015/05/Robotic-Process-Automation-June2015.pdf> (дата обращения 22.11.2021).
19. **Еремеев А.П., Варшавский П.Р.** Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 45—57.
20. **Еремеев А.П., Варшавский П.Р., Куриленко И.Е.** Моделирование временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов // Information Technol. and Knowledge. 2012. V. 6. No. 3. Pp. 227—239.
21. **D. Binkley**, “Source code analysis: A road map,” in 2007 Future of Software Engineering. IEEE Computer Society, 2007, pp. 104–119
22. **Куриленко И.Е., Никонов И.Е.** Решение задачи классификации сообщений в системах голосового взаимодействия // Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 132—139. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-132-139.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ПОДДЕРЖКИ ДИСЦИПЛИНЫ «ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ»

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены принципы использования средств инструментальных систем разработки программного обеспечения для поддержки выполнения этапов жизненного цикла в рамках дисциплины «Программная инженерия». Программная инженерия охватывает все этапы жизненного цикла программного обеспечения, поэтому необходимо рассматривать и различные инструментальные средства для их выполнения.

Ключевые слова – программная инженерия, инструментальные системы, среды анализа и проектирования, среды реализации, качество программного обеспечения

1. ВВЕДЕНИЕ

Программная инженерия - это комплексный подход построения программного обеспечения для самых разнообразных задач. Она охватывает весь процесс от возникновения необходимости в новой программе до завершения ее эксплуатации. В данной работе рассмотрены применение средств различных инструментальных систем для выполнения этапов жизненного цикла программного обеспечения применительно к разделам дисциплины «Программная инженерия».

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Рассмотрим в данной работе этапы жизненного цикла немного упрощенно по сравнению с утвержденным стандартом [1]. Считаем, что уже выявлена необходимость разработки нового программного обеспечения: найти подходящую программу невозможно или ее приобретение невозможно (нецелесообразно). Будем выделять следующие этапы:

- анализ,
- проектирование архитектуры,
- детальное проектирование,
- реализация,
- комплексное тестирование и отладка,
- внедрение (выпуск),
- сопровождение.

Ограничимся этапами, без которых невозможна разработка программного обеспечения. Последние два этапа исключим из подробного рассмотрения на практических и лабораторных занятиях, потому что в аудиторных условиях их выполнение невозможно. Задачи этих этапов и их роль в жизненном цикле на лекциях будут доложены.

Задачей этапа анализа, говоря немного упрощенно, является превращение прикладной задачи в задачу разработки программ. Выделяем две стадии

анализа: определение требований и уточнение и структурирование требований.

Проектирование архитектуры это разработка базовых принципов организации создаваемого программного обеспечения, его компонентов, их взаимодействия между собой и окружением. Реализация - это написание текстов программ, их автономное тестирование и отладка. Комплексное тестирование и отладка - это проверка разработанного программного обеспечения в целом и проверка, выполнены ли определенные на стадии анализа требования.

Кроме того, ограничимся рассмотрением разработки программного обеспечения такого объема, который под силу одному разработчику.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭТАПА АНАЛИЗА

3.1. Стадия определения требований

На этой стадии должны быть определены функциональные и нефункциональные требования. Источником информации являются специалисты по предметной области, от которых системный аналитик должен получить все необходимые для разработки данные. Для документирования функциональных требований студентам рекомендуем использовать диаграммы вариантов использования UML, которые позволяют описать состав будущих пользователей создаваемого программного обеспечения и перечень задач, которые оно должно для них решить. Студенты при этом должны понять, что диаграмма вариантов использования должна дать ответ только на вопрос «Что создаваемая программа должна делать?», а не как это будет реализовано, недопустимо превращать диаграмму вариантов использования в диаграмму функциональной декомпозиции. Кроме того, студенты должны освоить базовые принципы составления диаграммы вариантов использования.

При создании словесного описания выделенных вариантов использования внимание студентов обращаем на необходимость на этой стадии выявить:

- условия применимости всех вариантов использования, исключительные ситуации, которые могут возникнуть в ходе выполнения (можно их распознать уже на основе исходных данных или только в процессе решения),
- основной и альтернативные пути выполнения,
- возможный(е) результат(ы) выполнения,
- что в ходе выполнения делает компьютер и что должен делать человек.

Для отражения полученных результатов в процессе обучения используем CASE-средства извест-

ных инструментальных систем Microsoft Visual Studio, Embarcadero RAD Studio, реже Microsoft Visio. В условиях дистанционного обучения студентам было рекомендовано самостоятельно найти в Интернете онлайн-средство создания UML-диаграмм или установить на своем компьютере свободно распространяемую среду. Как показала практика, все с этим успешно справились.

На этой стадии должны быть определены и основные нефункциональные требования и эскизы интерфейсов пользователей, но для их документирования специальные средства не требуются, и мы их здесь рассматривать не будем.

3.2. Стадия уточнение и структурирования требований

Студенты должны освоить составление диаграмм классов анализа, деятельности и взаимодействия.

Диаграмма классов анализа описывает статическую структуру предметной области. Класс – это ведь какое-то понятие (объект), предметной области. Студенты осваивают принципы составления таких диаграмм: структуру класса и отношения между классами: особенно отношения обобщения и ассоциативности. Большое внимание уделяем семантике названных отношений: что они показывают по существу и какие у них характеристики.

Диаграмма деятельности является средством документирования динамики выполнения вариантов использования, она должна показывать все возможные пути их выполнения, возможности распараллеливания и возможные конечные состояния. Обращаем внимание студентов на то, что следует различать процессы выполнения вариантов использования «как есть» и «как будет», т.е. как эти действия выполняются вручную (или с помощью существующей программы, которую надо заменить на новую) и как они будут выполняться после внедрения разрабатываемой программы. Решение этого вопроса, конечно, выходит за рамки проектирования программного обеспечения, но забыть об этом нельзя.

Диаграмма кооперации (разновидность диаграмм взаимодействия) показывает, какие классы будут задействованы при выполнении вариантов использования. На этой стадии студенты должны уже думать о реализации создаваемого программного обеспечения и дать ответ на поставленный выше вопрос. Это является и первой проверкой сделанного до сих пор: с одной стороны, все ли выделенные классы задействованы и, с другой стороны, достаточно ли их для реализации всех вариантов использования.

Для реализации описанного используем названные выше средства Embarcadero RAD Studio и Microsoft Visual Studio. Использование сред, в которых имеются и возможности будущей программной реализации способствует переходу к следующим этапам разработки, в отличие от чисто иллюстративной среды Microsoft Visio.

Рекомендуем студентам использовать и классические CRT (class – responsibilities – collaborators; класс – обязанности – участники) карточки. В условиях дистанционного обучения использовали онлайн UML-редакторы или свободно распространяемые среды. В простейших Community – версиях средства анализа и проектирования, как правило, отсутствуют.

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ

Как мы говорили выше, в рамках дисциплины «Программная инженерия» рассмотрим в основном индивидуальную работу над созданием программ. Ведению крупных программных продуктов посвящена отдельная дисциплина.

В рамках дисциплины «Программная инженерия» будут рассмотрены средства проектирования только в самом первом приближении на уровне составления диаграммы компонентов, показывающих общую структуру. Также обратим внимание на то, как разделить интерфейс пользователя и логику решения задач, как организовать взаимодействие с простейшей базой данных. Курс «Базы данных» студенты изучают позже, поэтому полноценно изучать взаимодействие со сложными базами данных невозможно.

5. ДЕТАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

На этом этапе рассмотрим создание диаграмм классов проектирования и взаимодействия. Подробно будут рассмотрены отличия диаграмм классов анализа и проектирования. Целью детального проектирования является создание диаграммы классов с такой степенью подробности, чтобы на ее основе можно было генерировать заготовки программ.

Перед началом детального проектирования должна быть выбрана среда реализации и диаграммы классов проектирования будут созданы с учетом типов и структур данных, а также разновидностей реализации методов классов. Кроме собственных можно и целесообразно использовать и стандартные классы среды, в первую очередь для представления структур данных.

Большое внимание уделяется правильному выбору отношений между классами: допускаются только обобщение (будущее отношение наследования) и ассоциации в случае, когда один класс представляет структуры данных для другого. Другие разновидности отношения ассоциации должны быть преобразованы.

Особого внимания требует правильный выбор между представлениями наследования и ассоциативным для представления структур данных.

Параллельно с диаграммой классов проектирования создаются диаграммы последовательности, которые подробно показывают процесс выполнения каждого варианта использования из соответствующей диаграммы. Как известно, при разработке простых программ диаграммы последовательности не обязательны.

В ходе занятий студенты осваивают параллельную разработку названных диаграмм. Конечной целью является разработка корректных и взаимно согласованных диаграмм классов и последовательностей.

Наиболее подходящими инструментальными средствами являются упомянутые выше.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ

В ходе прохождения дисциплины ставим цель ознакомить студентов с несколькими средами разработки. Для С++ применяем среду Embarcadero RAD Studio, потому что там имеется мощный и удобный набор средств для создания интерфейса пользователя. Для освоения средств разработки законченных приложений в среде Microsoft Visual Studio используем язык С#. Также предусмотрено краткое знакомство с языком Java в средах NetBeans или Eclipse. В последнем случае выбор среды останется за студентом, потому что к концу второго семестра курса они имеют достаточный опыт освоения сред самостоятельно.

В наибольшей степени взаимодействие этапов детального проектирования и реализации отработаем на С#. Рассматриваем прямое и обратное проектирование, совместное использование диаграммы классов проектирования и самих классов на С#.

7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ

7.1. Средства тестирования

Для обеспечения высокого качества разработанного программного обеспечения оно должно быть всесторонне проверено. Поэтому большое внимание уделяем освоению имеющихся в средах программирования средств проверки программ. Подробно рассматриваются возможности тестирования отдельных функций и целого комплекса, в том числе и возможности создания классических драйверов и заглушек.

Современная модель целенаправленной проверки представлена на рис. 1. Проверка моделей в аудиторных условиях затруднено, поэтому ограничимся только их изучением.

Тестирование классов в отдельности принципиально не отличается от традиционных функционального и структурного тестирования. Тестирования. При проектировании тестов для тестирования взаимодействия классов используем созданные раньше диаграммы. При тестировании интеграции существенную помощь оказывает диаграмма последовательностей. Все пути реализации вариантов использования должны быть протестированы, а эти пути приведены на этой диаграмме.



Рис.1. Модель целенаправленной проверки

При комплексном тестировании всей разработки основываемся на диаграмму вариантов использования: на заключительном тестировании следует проверять, решает ли программа все те задачи, для решения которых она была задумана.

Диаграмма вариантов использования служит основой и для проведения заключительных испытаний, для проверки выполнения нефункциональных требований. В аудиторных условиях ограничимся проверкой объемно-временных ограничений. Проверка характеристик по надежности и защите данных более сложная и ее выполнение затруднительно, тем более, что студентам предстоит пройти специальные курсы по этой тематике.

Создание тестов, которые могут запускаться автоматически имеет большое значение при разработке по модели жизненного цикла «спираль» - они позволяют с минимальными затратами проводить регрессионное тестирование. Кроме того они незаменимы при проведении рефакторинга для проверки сохранения работоспособности программы после него.

7.2. Рефакторинг

Важным средством повышения качества программного обеспечения является рефакторинг, поэтому изучению методов рефакторинга и их реализации в средах программирования уделяем большое внимание. Надо сказать, что с появлением новых версий инструментальных систем, как правило, эти средства получают и дальнейшее развитие.

При этом обращаем внимание студентов на важность рефакторинга и на основные правила проведения: не выполнять одновременно с изменением функционала программы, проводить регулярно и совмещать с автоматическим тестированием.

7.3. Характеристики качества программного обеспечения

Характеристики качества программного обеспечения можно условно разделить на две категории:

- показатели, регламентированные стандартом [2],
- числовые показатели, рекомендуемые литературой по программной инженерии.

Среди первой группы характеристик имеются чисто качественные (например, удобство использования, простота освоения), легко измеряемые (например, эффективность). Студенты должны

знать о них и о способах повышения качества программ по этим показателям.

Практически все инструментальные среды разработки позволяют вычислить многочисленные числовые характеристики в первую очередь объектно-ориентированных программ. Начиная с самого распространенного показателя «цикломатическая сложность» и заканчивая целым набором характеристик объектно-ориентированных программ с рекомендуемыми значениями. Самый большой набор таких характеристик в среде Embarcadero RAD Studio. Особенно ценно то, что там приведены достаточно подробные разъяснения. Набор характеристик Visual Studio скромнее, но и там можно кое-что найти.

Знание количественных характеристик объектно-ориентированных программ студентами важно по нескольким причинам:

- они подтверждены программистской практикой,
- как правило, в книгах по проектированию объектно-ориентированных программ имеются рекомендации по их числовым значениям, таким образом студенты могут их учесть в своей работе,
- по правилам их вычисления достаточно легко определить пути повышения качества программ.

8. ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОЙ РАЗРАБОТКИ

Во всех предыдущих разделах речь шла о «тяжелых технологиях», когда выполняются последовательно все этапы жизненного цикла до внедрения результатов разработанной версии, а затем повторяется все для разработки следующей версии с расширенным функционалом (модель жизненного цикла «спираль»).

В настоящее время широко используются гибкие методики, в которых весь процесс разработки

программного обеспечения заключается в тесном взаимодействии заказчика и разработчика. Будут разработаны версия за версией (на разработку новой версии от нескольких дней до нескольких недель), каждая версия тут же тестируется с участием заказчика и намечаются пути усовершенствования. Также некоторые специалисты рекомендуют сначала разработать тесты, а под эти тесты программы. Разработку тестов до составления программы можно также рассматривать как разновидность анализа: тесты должны охватывать все случаи применения программы, это по сути то же самое, как определение путей реализации вариантов использования.

Выбор конкретной технологии разработки определяется многими факторами, какие средства для выполнения этапов жизненного цикла в данной ситуации целесообразно применить – определить программисту. Но чем большим набором средств он владеет, чем легче реализовать самые различные задачи. Поэтому в ходе обучения считаем необходимым освоение многих средств, чтобы в будущем было из чего выбирать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010.** Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств.
2. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93.** Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению.
3. **Маран М.М.** Программная инженерия. 2-е издание, СПб.: Лань, 2021. 196 с.
4. **Object Management Group.** // [Электронный ресурс] - <http://www.omg.org/spec/UML/2.5> (Дата обращения 24.12.2021)

Т.В. Богатырева¹, А.А. Солодков²

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва (1)

ОАО «ВНИПНефть», Москва (2)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКТНОЙ ЗАДАЧИ ИНСТРУМЕНТАМИ СОВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

АННОТАЦИЯ

Прикладная задача из области проектирования строительных конструкций рассматривается с точки зрения современной науки о данных. Решение задачи представлено в виде визуализированного набора данных, допускающих дальнейшую передачу в библиотеки машинного обучения. На основе продемонстрированного подхода могут быть разработаны специальные курсы, направленные на освоение компетенций и повышение культуры инженеров в области современных компьютерных наук.

Ключевые слова – стальные конструкции, строительная механика, расчет сооружений, инженерный анализ, анализ данных, визуализация, машинное обучение

1. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей частью подготовки инженера является изучение цикла расчетных дисциплин, составляющих фундаментальную основу обоснования и принятия проектных решений. Для будущего инженера-конструктора по специальности «Промышленное и гражданское строительство» в этот цикл входит изучение развернутых курсов теоретической механики, сопротивления материалов, строительной механики, механики грунтов, общие и специальные курсы конструкций. Освоение этих предметов позволяет развить инженерную интуицию и добиться глубокого понимания механической работы расчетной схемы сооружения. В сфере строительства объектов большой энергетики это позволяет на всех стадиях принимать участие в проектировании и строительстве главных корпусов и всего остального комплекса зданий и сооружений тепловых и атомных электростанций.

Существенная роль в структуре курсов, посвященных инженерным расчетам, отводится задачам в проектной постановке. По заданным внешним условиям и ограничениям требуется сделать обоснованный расчетом выбор проектных параметров задачи (высота сечения, номер профиля по сорту, конфигурация фундамента в плане и т.п.), удовлетворяющих стандартным для любой строительной конструкции требованиям прочности, жесткости и устойчивости. Отметим также, что решение задач в такой постановке наиболее широко востребовано и практикой. Информационное обеспечение выбора подходящего решения, при этом, играет далеко не последнюю роль.

До широкого распространения ЭВМ в помощь инженерам составлялись всевозможные справочники проектировщика, содержавшие таблицы с

наиболее часто встречающимися расчетными ситуациями и готовыми формулами к ним, графиками расчетных функций нескольких величин (номограммами) и теоретическими сведениями. К своего рода справочникам можно отнести и огромный объем готовой документации конструкций серийного изготовления. Хотя единый индустриальный строительный комплекс в масштабах целой страны остался в прошлом, эта документация, содержащая, по сути, конкретные типы конструкций, тщательно разработанные под самые разные расчетные ситуации, до сегодняшнего дня широко применяется в качестве банка готовых решений.

Применение ЭВМ существенно расширило возможности инженеров по расчету конструкций. Прочно вошел в оборот термин CAE – Computer-aided engineering – компьютерный инженерный анализ. Фактически, на современном этапе речь идет о проведении вычислительного эксперимента над детально проработанной расчетной моделью сооружения и её взаимодействием с внешней средой. Тем не менее, роль базовых проектных задач в понимании работы сооружения осталась прежней. Кроме того, с компьютеризацией расчетов особую важность стала приобретать проблема верной интерпретации результатов работы вычислительного комплекса и отход от его восприятия как некоего «черного ящика».

В настоящей работе, на выбранном примере, мы рассмотрим проектную задачу с позиций современного анализа данных. Анализ данных – неотъемлемая составляющая современных информационных технологий, один из краеугольных камней возрастающей интеллектуализации компьютерных программ. Со своей стороны, инженерные решения с достоинствами, недостатками, областями применения, множеством входных и выходных параметров и представляют собой подходящие массивы данных для проведения такого рода анализа. Мы продемонстрируем как удобство применения к проектной задаче программного инструментария, ставшего стандартом в этой области, так и открывающиеся благодаря этому возможности перед инженером для более широкого исследования конкретной расчетной ситуации.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ И ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ

2.1. Инструменты современного исследовательского анализа данных

Наука о данных – новая область знания, появившаяся в результате стремительного развития глобальных телекоммуникационных сетей и многократно возросших возможностей по сбору и обработке информации. Её фундаментальная основа была заложена комплексом взаимосвязанных достижений в области аппаратной составляющей вычислительной техники и математической разработки алгоритмов, а также появлением действительно больших наборов данных. Отличительной чертой «больших» данных является возможность проанализировать вообще все имеющиеся данные, не прибегая к выборочному подходу [1]. Основная задача, при этом, – нахождение скрытых зависимостей между данными, что открывает новые неочевидные знания. С практической точки зрения продуктом науки о данных являются конкретные технологии в предметной области, основанные, на постоянном сборе, обработке данных и применении к ним методов машинного обучения (обучения моделей) для решения задач прогнозирования, классификации, кластеризации и т.д. В конечном итоге такие технологии ложатся в основу имитации разумного поведения компьютерной программы, что и составляет основное содержание современного искусственного интеллекта.

Для задачи исследовательского анализа данных, не связанной напрямую с промышленной разработкой информационных систем, де-факто стандартом является использование языка программирования Python и основанных на нем готовых библиотек. Python – высокоуровневый мультипарадигмальный интерпретируемый язык программирования с динамической типизацией и автоматическим управлением памятью [2], отличающийся простотой освоения, удобством использования и огромным количеством готовых инструментов под любые задачи. Интерактивная среда разработки Jupyter Notebook объединяет работу над программным кодом, данными и оформлением с помощью встроенного языка разметки Markdown [3]. Это делает Jupyter Notebook мощным и удобным средством проведения исследований, подготовки и обмена результатами.

Вычислительным ядром, а так же основой и, фактически, общим интерфейсом многих других библиотек является библиотека матричных вычислений NumPy [4]. Библиотека поддерживает работу с многомерными массивами и высокоуровневыми математическими функциями над ними и может рассматриваться как свободная альтернатива известной системе матричных вычислений и компьютерной алгебры MATLAB. Применение NumPy позволяет векторизовать вычисления, полностью отказавшись от написания циклов в программном коде, что значительно повышает его качество и

удобство работы. Библиотека научных вычислений SciPy предоставляет доступ к готовым функциям для решения задач линейной алгебры, интегрирования и дифференцирования, интерполирования, оптимизации, статистики и других задач, часто возникающих на практике. Библиотеки NumPy и SciPy являются проверенным инструментом для проведения любых научных и инженерных расчетов.

Работа с данными в табличной форме организуется средствами библиотеки Pandas. Функции этой библиотеки схожи с функциями других программных пакетов для работы с электронными таблицами. Pandas позволяет структурировать, очищать, статистически обрабатывать данные и подготавливать их для передачи в пакеты машинного обучения.

Важную роль в анализе данных играет их представление в наглядной форме. Для визуализации служат библиотеки Matplotlib [5] и Seaborn. Библиотеки поддерживают многие виды графиков и диаграмм и позволяют, как работать с их тонкой низкоуровневой настройкой, так и использовать высокоуровневые функции для получения быстрого и качественного результата.

Непосредственное обучение моделей машинного обучения может выполняться с использованием библиотеки scikit-learn. Данная библиотека предоставляет готовые коллекции различных моделей машинного обучения и интерфейс работы с ними, фактически ставший стандартом в этой области. На современном этапе одной из наиболее мощных парадигм в машинном обучении оказалось использование искусственных нейронных сетей. Библиотека PyTorch является одним из основных инструментов в этой области.

В заключение отметим библиотеку, не являющуюся необходимой для анализа данных и машинного обучения, но незаменимой в привычных инженерных расчетах – библиотеку символьных вычислений SymPy [6]. При программировании на Python библиотека является полноценной заменой систем компьютерной алгебры, таких как Mathcad, Maple или Wolfram Mathematica.

Все вышеописанные инструменты в совокупности с универсальным языком программирования представляют собой чрезвычайно мощную среду для исследовательских задач.

2.2 Этапы решения задачи анализа данных

Межотраслевой стандарт интеллектуального анализа данных CRISP-DM [7] описывает единую методологию ведения проектов в этой области. Процесс анализа данных разбивается на шесть этапов от понимания проблем бизнеса до развертывания готовой модели машинного обучения. С практической точки зрения, центральным пунктом является этап сбора и подготовки данных, занимающий по влиянию на результат и трудоемкости наибольшую долю. Непосредственное обучение и настройка моделей идут лишь следом.

Отметим также, что под сбором данных не обязательно понимать в буквальном смысле сбор из внешнего мира, хотя именно такой подход наиболее интересен с практической точки зрения. По различным причинам данных во внешнем мире может не доставать, их сбор может быть сопряжен со значительными трудностями и затратами. В таком случае прибегают к полученным искусственно или, так называемым, синтетическим данным.

2.3 Описание проектной задачи

В качестве основы конкретного примера применения анализа данных возьмем типичную для практики ситуацию проектирования площадки обслуживания оборудования. В области проектирования объектов энергетики к данному классу сооружений можно отнести, например, площадку обслуживания турбоагрегата. Площадка возводится вокруг фундамента турбины и представляет собой полноценную многоэтажную каркасную систему. Главные балки площадки собирают нагрузку с приходящих на них второстепенных балок, с последующей передачей на колонны и фундаменты. Схематично площадка обслуживания изображена на рис. 1.



Рис.1. Площадка обслуживания

При проектировании главной балки стоит задача выбора сечения возможной конфигурации (двутавр, швеллер) и величины (номер). Выбор производится из условия удовлетворения требованиям прочности и устойчивости (первая группа предельных состояний) и ограничения прогиба (вторая группа). Для требований прочности определяющей является величина пролета. Устойчивость зависит от ширины верхнего сжатого пояса сечения и наличия его раскрепления, то есть определяется в основном конструктивным решением. При разных величинах пролетов и нагрузок и в зависимости от принятых решений по раскреплению сжатого пояса конкурентоспособными становятся разные варианты сечения. Применение инструментов анализа данных позволит визуализировать картину возможных конструктивных решений для данной задачи.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКТНОЙ ЗАДАЧИ

3.1 Расчетная схема

Главная балка площадки обслуживания представляет собой двухпролетную статически неопределимую систему, нагруженную линейной равномерно распределенной нагрузкой. Основные внутренние усилия, возникающие в балке – изгибаю-

щие моменты в пролете и на опоре. Расчетная схема и эпюра изгибающих моментов в балке представлены на рис. 2.

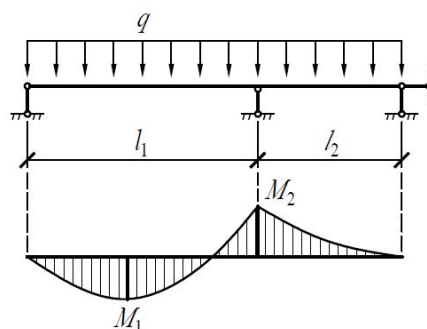


Рис.2. Расчетная схема балки и эпюра изгибающих моментов: l_1 , l_2 – пролеты, м; q – равномерная нагрузка, кН/м; M_1 , M_2 – изгибающие моменты, кНм, в пролете и на опоре соответственно.

Аналитическое решение системы можно найти классическим методом строительной механики – методом сил. Для вывода формул пролетного и опорного моментов достаточно использовать стандартные средства решения уравнений в символьном виде библиотеки SymPy. В результате получим:

$$M_1 = \frac{1}{128}(k^2 - k - 3)^2 q l_1^2, \quad (1)$$

$$M_2 = \frac{1}{8}(k^2 - k + 1) q l_1^2 \quad (2)$$

где k – коэффициент, равный отношению пролетов l_2 к l_1 .

Можно отметить характер полученных зависимостей внутренних усилий от внешних параметров: квадратичный по величине пролета и линейный по величине нагрузки.

Расчет по выведенным соотношениям, а также определение коэффициента устойчивости при изгибе ϕ_b , может быть реализован в виде компьютерной программы на языке Python. Программа позволит определять несущую способность сечения по условиям прочности (3) и устойчивости (4) в зависимости от величин пролетов и нагрузки, тем самым подготавливая сырые данные для анализа.

Условие прочности:

$$\frac{M}{W} \leq R \quad (3)$$

где W – момент сопротивления сечения, см^3 ; R – расчетное сопротивление материала (стали), кН/см^2 .

Условие устойчивости плоской формы изгиба:

$$\frac{M}{\phi_b W} \leq R \quad (4)$$

где ϕ_b – коэффициент устойчивости при изгибе, определяемый согласно [8].

Программная реализация расчета задачи по выражениям и условиям (1) – (4) позволяет подготавливать данные для дальнейшего анализа и визуализации.

3.2 Результаты анализа

Проанализируем изменение несущей способности отдельного профиля при увеличении величины пролета l_1 и различной нагрузке. Для анализа вы-

бран двутавровый профиль 20Б1 по СТО АСЧМ 20-93.

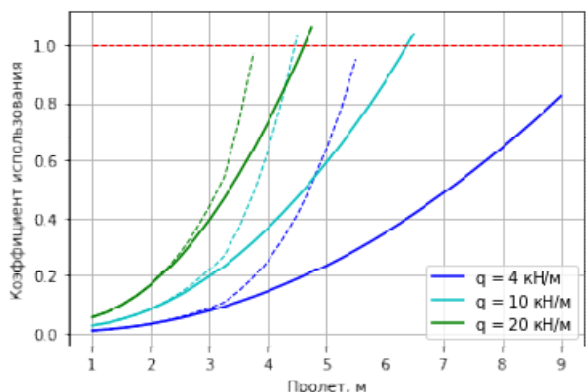


Рис.3. График изменения несущей способности двутавра 20Б1 при различных параметрах пролета и нагрузки. Основная линия – условие прочности (3); тонкая пунктирная – условие устойчивости (4).

Коэффициент использования, отображаемый на графике, представляет собой отношение левой и правой частей условий (3, 4), то есть характеризует запас по ним несущей способности сечения. Значения коэффициента использования выше единицы говорят о нарушении условия.

Из приведенного графика видно как с увеличением нагрузки уменьшается различие между конструктивными решениями с раскреплением сжатого пояса (условие прочности на графике) и без него. При небольшой нагрузке (4,0 кН/м) раскрепленная балка может перекрывать пролет до 8 – 9 м; без раскрепления – только до 5 м. При больших значениях нагрузки этот диапазон уже значительно уже, что связано с гораздо более быстрым исчерпанием запаса прочности сечения.

Приведем примеры сравнения профилей.

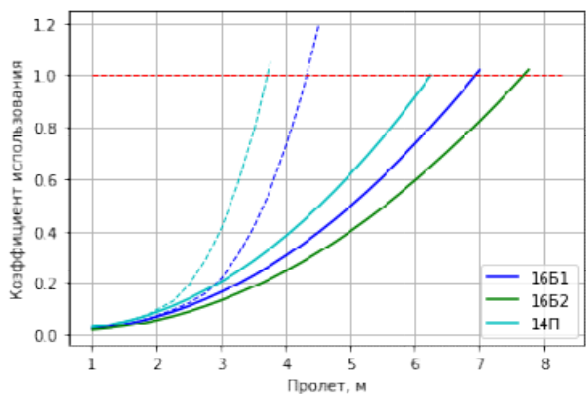


Рис.4 Сравнение профилей при небольшой нагрузке ($q = 4,0$ кН/м)

График показывает, что при пролетах 4 – 6 м и небольших нагрузках, конструктивное решение с раскрепленной балкой из швеллера 14П может быть предпочтительнее альтернативных двутавровых сечений ввиду меньшей металлоемкости швеллера.

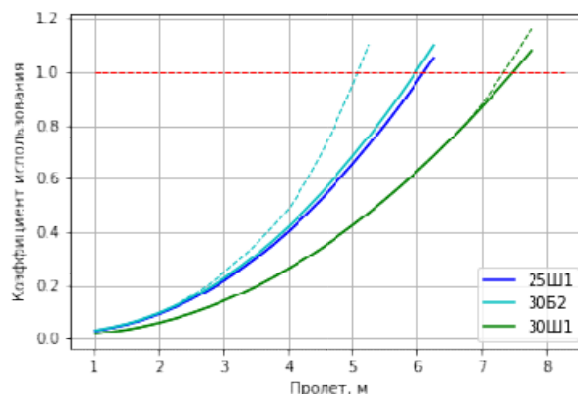


Рис.5. Сравнение профилей при больших значениях нагрузок ($q = 30,0$ кН/м).

При высоких значениях нагрузки становится оправданным применение широкополочных двутавров с развитыми поясами. Такие сечения гораздо менее подвержены потере устойчивости плоской формы изгиба, что на графике отражается в совпадении линий по соответствующим критериям. Однако, во всем диапазоне пролетов конкурентоспособным оказывается решение с более высоким, но менее металлоемким балочным сечением с раскрепленным верхним поясом.

Приведем гистограмму распределения массы профилей.

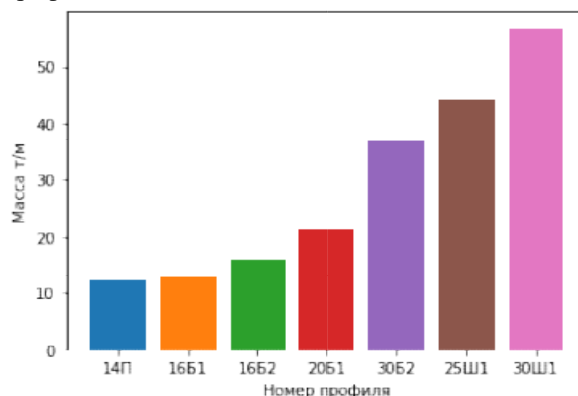


Рис.6 Гистограмма распределения масс профилей

В целом, меньшие, но раскрепленные от потери устойчивости профили являются возможной альтернативой более развитым сечениям, однако, выигрыш в экономии металла возрастает, в основном, на больших номерах сечений, с увеличением нагрузки на площадку. Устройство раскрепления сжатого пояса само по себе может быть затратным, связанным с организацией системы горизонтальных связей, что делает более целесообразным применение развитых широкополочных профилей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный пример р проектной задачи не был направлен на получение новых практических результатов. Интуитивно понятно, что различные сечения профилей балок обладают своими практическими преимуществами и изначально разрабатывались под свои области применения. Однако, инструменты анализа данных позволили быстро и точно

но исследовать и в наглядной форме представить догадки инженерной интуиции. Следует отметить, что потенциально мы не были ограничены только лишь приведенными на графиках сечениями. Задействованные компьютерные средства позволяют подвергнуть анализу весь массив возможных входных данных и визуализировать любую заинтересовавшую ситуацию. От постановки задачи с исследованием и визуализацией данных можно перейти к следующему этапу: обучить линейную модель машинного обучения, которая для данных диапазонов сил и пролетов предсказывала бы предпочтительный вариант сечения из двух возможных вариантов. Задача в такой постановке называется задачей бинарной классификации.

Предложенный подход может быть положен в основу специальных курсов и факультативов, направленных на расширение кругозора, освоение новых практически полезных компетенций и повышение культуры инженеров в области современных компьютерных наук.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

l_1, l_2 – величины пролетов, м;
 q – линейная равномерно распределенная нагрузка, кН/м;
 M_1, M_2 – изгибающие моменты в балке, в пролете и на опоре соответственно, кНм;
 W – момент сопротивления сечения для наиболее сжатого (растянутого) волокна, см³;
 R – расчетное сопротивление материала, кН/см².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Майер-Шенбергер, В.** Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. 221 с.
2. **Python** // [Электронный ресурс]. – <https://www.python.org/> (дата обращения: 07.12.2021).
3. **Jupyter** // [Электронный ресурс]. – <https://jupyter.org/> (дата обращения: 07.12.2021).
4. **NumPy** // [Электронный ресурс]. – <https://numpy.org/> (дата обращения: 07.12.2021).
5. **Matplotlib** // [Электронный ресурс]. – <https://matplotlib.org/> (дата обращения: 07.12.2021).
6. **SymPy** // [Электронный ресурс]. – www.sympy.org/en/index.html (дата обращения: 07.12.2021).
7. **Data Science Process Alliance** // [Электронный ресурс]. – <https://www.datascience-pm.com/> (дата обращения: 07.12.2021).
8. **Свод правил.** Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. СП 16.13330.2017.

А.Д. Рожков^{1,2}, В.Г. Грибин¹

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва (1)

ОАО «Всероссийский теплотехнический институт», Москва (2)

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГТУ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ

АННОТАЦИЯ

В данной статье предлагается к рассмотрению методика определения значений некоторых тепловых характеристик: подвода тепла в камеру сгорания, температуры газов на выходе из газотурбинной установки, коэффициент полезного действия компрессора, содержание оксида азота в уходящих газах газотурбинной установки с помощью корреляционных уравнений. Корреляционные коэффициенты получены с помощью методов наименьших квадратов. Используемый алгоритм Левенберга-Марквардта предназначен для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. Предполагается, что в качестве критерия оптимизации используется среднеквадратичная ошибка модели на обучающей выборке. Для получения коэффициентов были привлечены опытные данные эксплуатации рассматриваемых ГТУ. По полученным уравнениям были проведены сравнения с результатами испытаний, которые свидетельствуют о минимальной погрешности расчёта.

Ключевые слова – тепловые испытания, газотурбинная установка, компрессор, газовая турбина, камера сгорания, показатели, теплотехнические характеристики, КПД, перепуск воздуха

1. ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинные установки (ГТУ) являются основным элементом нового, современного поколения тепловых электростанций, отличающихся высокой маневренностью, экономичностью и единичной мощностью. После 2000-ых годов в России было построено большое количество ТЭС, оснащенных парогазовыми установками, в которых использовались различные ГТУ всех ведущих мировых производителей. Освоение и эксплуатация этих ГТУ в течение нескольких десятков лет позволили более подробно ознакомиться с технической философией разных газотурбинных фирм, характеристиками и эксплуатационными качествами их оборудования [1].

Вопрос исследования статьи посвящен упрощению контроля теплотехнических характеристик на примере двух ГТУ, работающих в составе тепловых электрических станций на территории Российской Федерации (номинальной мощности 80 МВт и 160 МВт) с помощью корреляционных уравнений, полученных с помощью метода наименьших квадратов. Уравнения связывают между собой измеряемые параметры ГТУ и позволяют проводить оценочные расчёты величин при различных исходных данных. Среди них представлены такие параметры как: подвод тепла в камеру сгорания (КС) ГТУ, температуру

газов на выходе из ГТУ (температура на входе в котёл-утилизатор (КУ), коэффициент полезного действия (КПД) компрессора и содержание оксидов азота NO_x в уходящих газах ГТУ. Представленные параметры не являются исключительными и присутствует возможность описания подобным образом и других характеристик ГТУ (например, КПД газовой турбины, содержание оксидов углерода CO и др).

2. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА, ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ РАСЧЕТЕ

Уравнения кроме параметров, измеряемых штатными автоматическими системами управления тепловыми процессами, имеют коэффициенты корреляции $a_{(0-10)}$, рассчитанные с помощью метода наименьших квадратов, а именно с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта. Упомянутый алгоритм используется для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. Предполагается, что в роли критерия оптимизации используется среднеквадратичная ошибка модели на некой выборке. Суть алгоритма в том, чтобы добиться последовательного приближения заданных начальных значений параметров к некоему искомому локальному оптимуму.

Алгоритм отличается от метода сопряженных градиентов тем, что использует матрицу Якоби модели, а не градиент вектора параметров. От алгоритма Гаусса-Ньютона этот алгоритм отличается тем, что использует параметр регуляризации. Рассмотрим отличие двух методов подробнее [2].

Основополагающим в методе Левенберга-Марквардта является направление поиска, находящееся при верном решении нескольких линейных уравнений (система линейных уравнений)[3]:

$$(J(x_k)^T J(x_k) + \lambda_k I) d_k = -J(x_k) F(x_k) \quad (1),$$

где $J(x_k)^T$ – транспонированная явная матрица, $J(x_k)$ – явная матрица (число обусловленности), λ_k – скаляр, d_k – направление поиска, $F(x_k)$ – вектор.

Необходимо отметить, что скаляр λ_k задает и величину, и направление d_k . При условии, что упоминаемый скаляр λ_k равняется 0, то направление параметра будет совпадать величине параметра из метода Ньютона-Гаусса. Если λ_k будет стремиться к бесконечности, то рассматриваемый параметр d_k будет стремиться к нулевому вектору и направлению скорейшего спуска. Член λ_k является

контролируемым для обеспечения спуска, при необходимости учёта членов второго порядка. Упомянутые члены второго порядка значительно ограничивают применение метода Ньютона-Гаусса. Отличительной чертой метода Левенберга-Марквардта является повышенная устойчивость, компенсирующая слабую эффективность, присутствующую при условии, что невязка равна нулю [4].

Каждый корреляционный коэффициент является коэффициентом на которой умножается величина параметра, соотношенного к своему максимальному значению. Набор параметров для каждого уравнения (2-5) является уникальным и подбирался исходя из влияния на определяемую величину.

Подвод тепла в камеру сгорания:

$$\Delta Q_{КС} = \left(a_0 + a_1 \cdot \frac{N_{ГТУ}}{170} + a_2 \cdot \frac{t_{нв} + 273,15}{288,15} + a_3 \cdot \frac{\alpha_{ВНА}}{86} + a_4 \cdot \left(\frac{\alpha_{ВНА}}{86} \right)^2 + a_5 \cdot \frac{\alpha_{IBH}}{60} + a_6 \cdot \left(\frac{\alpha_{IBH}}{60} \right)^2 + a_7 \cdot \left(\frac{\alpha_{IBH}}{60} \right)^3 + a_8 \cdot \frac{B_{атм}}{102} + a_9 \cdot \frac{P_{2К}}{2} \right) \cdot 500, \quad (2)$$

где $\Delta Q_{КС}$ – подвод тепла с топливом в КС ГТУ [МВт], $N_{ГТУ}$ – электрическая мощность ГТУ [МВт], $t_{нв}$ – температура наружного (атмосферного воздуха) [°C], $\alpha_{ВНА}$ – положение входного направляющего аппарата [%], α_{IBH} – положение клапана перепуска воздуха [%], $B_{атм}$ – барометрическое давление [кПа], $P_{2К}$ – абсолютное давление за компрессором [МПа].

Температура газов на входе в котёл-утилизатор (выходе из ГТУ):

$$t_{1KV(2T)} = \left(a_0 + a_1 \cdot \frac{N_{ГТУ}}{170} + a_2 \cdot \frac{t_{нв} + 273,15}{288,15} + a_3 \cdot \frac{\alpha_{ВНА}}{86} + a_4 \cdot \left(\frac{\alpha_{ВНА}}{86} \right)^2 + a_5 \cdot \frac{\alpha_{IBH}}{60} + a_6 \cdot \left(\frac{\alpha_{IBH}}{60} \right)^2 + a_7 \cdot \left(\frac{\alpha_{IBH}}{60} \right)^3 + a_8 \cdot \frac{B_{атм}}{102} + a_9 \cdot \frac{P_{2К}}{2} \right) \cdot 650, \quad (3)$$

где t_{1KV} – температура газов перед котлом-утилизатором (за ГТУ) [°C], $N_{ГТУ}$ – электрическая мощность ГТУ [МВт], $t_{нв}$ – температура наружного (атмосферного воздуха) [°C], $\alpha_{ВНА}$ – положение входного направляющего аппарата [%], α_{IBH} – положение клапана перепуска воздуха [%], $B_{атм}$ – барометрическое давление [кПа], $P_{2К}$ – абсолютное давление за компрессором [МПа].

КПД компрессора:

$$\eta_K = \left(a_0 + a_1 \cdot \frac{\alpha_{ВНА}}{86} + a_2 \cdot \left(\frac{\alpha_{ВНА}}{86} \right)^2 + a_3 \cdot \frac{\alpha_{IBH}}{60} + a_4 \cdot \left(\frac{\alpha_{IBH}}{60} \right)^2 + a_5 \cdot \left(\frac{\alpha_{IBH}}{60} \right)^3 + a_6 \cdot \left(\frac{G_{1К}}{240} \right)^2 + a_7 \cdot \frac{\pi_K}{20} + a_8 \cdot \left(\frac{t_{1К} + 273,15}{288,15} + a_9 \cdot \left(\frac{t_{нв} + 273,15}{288,15} + \frac{t_{2К} + 273,15}{288,15} \right) \right) \cdot 95, \quad (4)$$

где η_K – изоэнтропический КПД компрессора [%], $\alpha_{ВНА}$ – положение входного направляющего аппарата [%], α_{IBH} – положение клапана перепуска воздуха [%], $B_{атм}$ – барометрическое давление [кПа], $P_{2К}$ – абсолютное давление за компрессором [МПа], $G_{1К}$ – расход воздуха через компрессор [кг/с], π_K – степень повышения давления воздуха в компрессоре, $t_{1К}$ – температура воздуха перед первой ступенью компрессора [°C], $t_{2К}$ – температура воздуха за последней ступенью компрессора [°C].

Содержание оксидов азота (NO+NO₂):

$$NO_x = \left(a_0 + a_1 \cdot \frac{N_{ГТУ}}{170} + a_2 \cdot \frac{t_{нв} + 273,15}{288,15} + a_3 \cdot \frac{\alpha_{ВНА}}{86} + a_4 \cdot \left(\frac{\alpha_{ВНА}}{86} \right)^2 + a_5 \cdot \frac{\alpha_{IBH}}{60} + a_6 \cdot \left(\frac{\alpha_{IBH}}{60} \right)^2 + a_7 \cdot \left(\frac{\alpha_{IBH}}{60} \right)^3 + a_8 \cdot \frac{B_{атм}}{102} + a_9 \cdot \frac{t_{1KV} + 273}{905} \right) \cdot 10, \quad (5)$$

где NO_x – содержание оксидов азота (NO+NO₂) [млн⁻¹], $N_{ГТУ}$ – электрическая мощность ГТУ [МВт], $t_{нв}$ – температура наружного (атмосферного воздуха) [°C], $\alpha_{ВНА}$ – положение входного направляющего аппарата [%], α_{IBH} – положение клапана перепуска воздуха [%], $B_{атм}$ – барометрическое давление [кПа], t_{1KV} – температура газов перед КС (за ГТУ) [°C].

Важным условием для подбора параметров, входящих в состав уравнения (2-5) было их прямое определение и отсутствие необходимости проводить расчёт для определения их значений. К примеру, электрическая мощность ГТУ измеряется напрямую на клеммах генератора, температуры воздуха с помощью термпар, барометрическое давление с помощью датчика давления и т.д., что значительно упрощает использование данных уравнений и не требует никаких дополнительных расчётов.

В качестве представляющих интерес для подробного изучения были составлены корреляционные уравнения для следующих четырех характеристик ГТУ:

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Исходными данными для проведения расчёта по данному алгоритму являлись данные эксплуатации и результаты тепловых испытаний, проведенных в первом квартале 2020 г., двух ГТУ, работающих в составе ПГУ. Одна ГТУ номинальной мощностью 80 МВт, вторая – 160 МВт. Данные эксплуатации были выбраны на различных режимах, включая холостой ход, промежуточные и номинальные нагрузки. Тепловые испытания были нацелены на получения основных характеристик работы ГТУ на большом диапазоне температуры воздуха перед компрессором. В общей сложности было отобрано около 50 режимов для более точного описания уравнений и уменьшения погрешности. Часть режимов набиралась из баз данных, фиксирующих сигналы датчиков АСУ ТП ГТУ, при эксплуатации ГТУ на номинальных нагрузках, а также при разгрузках до минимальных значений мощностей, предусмотренные графиком электрических нагрузок ПГУ. Все отобранные режимы отвечают требованиям устойчивой работы ГТУ [5]. Среди критериев устойчивой работы ГТУ

можно выделить стабильность значений следующих параметров: температура воздуха перед компрессором, атмосферное давление, температура газов за газовой турбиной, давление топлива, частота вращения вала ГТУ.

В общей сложности среди отобранных режимов были охвачены электрические нагрузки ГТУ в диапазоне от 10 МВт до 170 МВт и температуры наружного воздуха от -10 до +30°C.

При составлении уравнений в качестве исходных данных использовалась температура газов перед котлом утилизатором, так как рассматриваемая температура имела меньшую неравномерность по сравнению с температурой газов, измеряемой в диффузоре газовой турбины. Большие значения неравномерности, достигающие 70°C (более 10% от величины температуры газов за турбиной) могли внести большую погрешность, тем самым ухудшить качество полученных результатов.

Важным обстоятельством при использовании уравнений является наличие/отсутствие системы перепуска воздуха в тепловой схеме ГТУ. При отсутствии в тепловой схеме данной системы, соответствующие коэффициенты в уравнения (1-4) принимают значение 0.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции

–	№ ур-я	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀
$\Delta Q_{КС}$	2	0,542	0,617	-0,096	0,025	0,025	-0,533	0,812	-0,492	0,049	-0,493	–
$t_{КВ}$	3	0,761	2,268	0,354	-1,209	0,772	-0,050	0,357	-0,343	0,870	-2,087	–
η_K	4	0,100	0,820	-0,554	0,020	0,012	-0,020	0,049	0,331	0,628	0,002	-0,159
NO_x	5	-32,19	-4,521	-8,181	35,82	-17,40	-1,343	-1,341	3,112	3,361	24,75	–

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения коэффициентов корреляции с помощью метода наименьших квадратов был использован лицензионный программный пакет Statistica, предназначенный для анализа данных с привлечением различных статистических методов. Программный пакет отличается простотой использования, интуитивным интерфейсом и возможностью выбора алгоритма Левенберга-Марквардта, являющимся основополагающим в описываемом исследовании.

Полученные коэффициенты корреляции $a_{(0-10)}$ для уравнений (2-5) представлены в таблице 1. При подстановке данных коэффициентов в уравнения и произвольных (либо же определенных для режима эксплуатации ГТУ) исходных данных будет получено определённое значение рассматриваемой величины. Погрешность расчёта величин по корреляционным уравнениям сравнивались, в первую очередь, с значениями этих же величин, полученных путём трудоёмкого расчёта тепловых схем ГТУ. Результаты сравнения, а именно, максимальная и средняя относительные погрешности определения, полученная при расчёте уравнений, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Погрешности корреляционных уравнений для испытаний, которые являлись исходными данными для получения коэффициентов.

–	№ ур-я	Максимальная относительная погрешность $\delta, \% (макс.)$	Средняя относительная погрешность $\delta, \% (ср.)$
$\Delta Q_{КС}$	2	1,5	0,4
$t_{КВ}$	3	1,3	0,5
η_K	4	0,7	0,5
NO_x	5	1,8	0,25

Как следует из табл. 2, максимальные относительные погрешности для рассматриваемых уравнений не превышают 2%, что свидетельствует о достаточно высокой точности и сходимости корреляционных уравнений с результатами расчётов тепловой схемы ГТУ. Значение средней относительной погрешности не превышает 0,5%.

Для получения достоверных данных о погрешности уравнений также был проведён расчёт по уравнениям для тепловых испытаний и данных эксплуатации ГТУ других типов, с номинальной мощностью 110 МВт и 150 МВт, соответственно. Данные ГТУ также эксплуатируются в составе тепловых электрических станций на территории Российской Федерации. Основной задачей тепловых испытаний было получение тепловых характеристик и

подробного изучения работы ГТУ при различных наружных температурах.

Подобное сравнение результатов расчёта для нескольких «независимых» ГТУ позволяет наглядно оценить применимость уравнений для ГТУ других типов, эксплуатируемых при отличных от исходных внешних (температура наружного воздуха, барометрическое давление) условиях.

Таблица 3. Погрешности корреляционных уравнений при расчете по уравнениям для ГТУ другого типа.

–	№ ур-я	Максимальная относительная погрешность $\delta, \%$ (макс.)	Средняя относительная погрешность $\delta, \%$ (ср.)
$\Delta Q_{КС}$	1	1,6	0,5
$t_{КВ}$	2	1,5	0,6
η_K	3	0,9	0,3
NO_x	4	2,1	1,0

Проведенный анализ результатов расчёта погрешностей, отраженных в табл. 3, позволяет судить о том, что значения максимальных относительных и средних погрешностей получились незначительно больше, чем приведенные в табл. 2, что свидетельствует о хорошем математическом описании характеристик. Данное наблюдение свидетельствует о том, что уравнения (2-5) с большой точностью описывают характеристики не только тех ГТУ, на экспериментальных данных которых получены коэффициенты корреляции, но и ГТУ другого типа и номинальной мощности. Сделанные выводы позволяют утверждать, что корреляционные уравнения возможно использовать для любых ГТУ диапазон номинальной мощности которых находится в диапазоне от 80 и 160 МВт.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные по результатам исследования корреляционные уравнения и коэффициенты корреляции позволяют оценивать изменение теплотехнических характеристик ГТУ простой подстановкой исходных данных в эти уравнения. Ценная особенность представленных уравнений заключается в том, что они являются универсальными для указанного диапазона электрических нагрузок ГТУ. Несмотря на составление уравнений и получение коэффициентов по результатам всего одних тепловых испытаний, уравнения проявили свою пригодность для других независимых испытаний, проведенных на аналогичных ГТУ. Кроме того, не исключена возможность использования данных уравнений на практике при моделировании работы различных типов ГТУ.

Уравнения нашли своё применение при обработке результатов тепловых испытаний, проводимых ОАО «ВТИ» и НИУ МЭИ на ТЭС РФ. Применение данных уравнений значительно сокращает время обработки и проведения расчётов, позволяя с высокой точностью описать характеристики ГТУ по

величинам, измеряемых штатными системами энергетического оборудования. При использовании в работе отмечены интуитивность и универсальность уравнений, а также возможность описания характеристик ГТУ, начиная от общих параметров, характеризующих экономичность цикла Брайтона-Джоуля, заканчивая оценкой эффективности проточной части компрессора, газовой турбины, или даже элементов камеры сгорания. Применимость корреляционных уравнений не ограничивается характеристиками ГТУ, приведенными в статье. С их помощью возможно описание характеристик узлов другого: энергетического оборудования, например, как паровых турбин, элементов тепловых схем паросилового и газотурбинного цикла и др. Методика составления уравнений и получения коэффициентов являются универсальными, что говорит о возможности составления их для различных целей в других научных областях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы данной статьи хотят выразить отдельную благодарность сотрудникам лаборатории газотурбинных установок и всего отделения турбинных установок ОАО «ВТИ» за помощь в проведении тепловых испытаний на энергетическом оборудовании, упомянутом в данной статье.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\Delta Q_{КС}$ – подвод тепла с топливом в КС ГТУ [МВт];
 $t_{КВ}$ – температура газов перед котлом-утилизатором [%];
 η_K – изэнтропический КПД компрессора [%];
 NO_x – содержание оксидов азота ($NO+NO_2$) [млн⁻¹].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ольховский Г.Г.** Тепловые испытания мощных энергетических ГТУ, Издательский дом «Фолиум», 2015, с 25-30.
2. **Химмельблау Х.** Нелинейное программирование.-М.: Мир, 1969.
3. **Levenberg K.** A method for the solution of certain problems in least squares// Quart. Appl. Math – 1944. – Vol. 2. – p.164-168.
4. **Marquardt D.** An algorithm for least-squares estimation for non-linear parameters// SIAM J. Appl. Math. – 1963. – Vol. 11. – p.431-441.
5. **ГОСТ Р52782-2007** Национальный стандарт Российской Федерации Установки Газотурбинные, методы испытаний. Приемочные испытания. Gas Turbines

С.С. Горбунов¹, А.В. Костандян², А.Ф. Егоров³, В.В. Сидоров⁴, В.А. Костандян¹

ООО «МЦЭ-Инжиниринг», Москва (1)

ООО «Ксиматик», Москва (2)

РХТУ имени Д.И. Менделеева, Москва (3)

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (4)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СМЕШЕНИЕМ БЕНЗИНОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

АННОТАЦИЯ

Технологические издержки компаундирования бензинов определяются эффективностью поддержания гидродинамического режима смешением компонентов бензина, контроля, оптимизации рецептур, оптимального управления и регулирования. Разработка математической модели, постановка задачи оптимизации и управления смешением бензинов в режиме реального времени (онлайн-режим) являются одним из важных этапов создания распределенной системы управления. В статье рассмотрена математическая модель онлайн-оптимизации смешения бензинов с учетом условий неопределенности параметров технологического режима. В представленной математической модели учитывается параметрическая неопределенность процесса смешения бензинов в режиме реального времени при разработке алгоритмов управления процессом смешения бензинов. Сформулирована задача оптимизации смешения бензинов.

Ключевые слова – смешение бензинов, программный комплекс, оптимизация, критерий, неопределенность, алгоритм

1. ВВЕДЕНИЕ

В технологической цепочке производств на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) процесс смешения бензинов является одной из важных и завершающих стадий, определяющих качество товарных бензинов, и, как следствие, эффективность производства НПЗ в целом.

Эффективность процесса смешения бензинов, удовлетворяющих технико-экономическим требованиям, обеспечивается системой усовершенствованного управления (АРС - Advanced Process Control), оптимизирующей технологический процесс на основе математических моделей и формируемой базы знаний об объекте управления.

Разработан и протестирован программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов (ПК ОПОР) для использования в режимах офф-/онлайн управления и интегрирования в существующие информационные подсистемы управления [1, 2].

В математической модели процесса смешения компонентов бензина и мазута используются как

линейные зависимости свойств бензинов и мазутов от состава смеси, так и нелинейные эффекты от состава рецептуры по отдельным свойствам бензинов и мазутов [2, 3, 4].

2. АКТУАЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Основные критерии оптимальности формирования рецептур бензинов, в зависимости от постановки задач:

- стоимость бензиновой смеси с учётом требований к спецификации и технологическим ограничениям по пределам смешиваемости компонентов смешения (рецептура, обеспечивающая минимальную стоимость тонны товарного продукта);
- выход (производство) товарного топлива по остаткам компонентов смешения (минимизация остатков бензиновых компонентов смешения) с учётом выполнения требований к спецификации (рецептура, обеспечивающая максимальное количество товарного продукта или, что, то же самое, минимум остатков компонентов смешения).

Известны различные системы оптимизации процессов смешения бензинов, ориентированные на минимизацию отклонений от заданной спецификации бензинов [1, 6] или к изменяющимся на рынке спросу в топливе [2, 4] и другие, что повышает гибкость и эффективность современных НПЗ.

Основной проблемой системы управления смешением бензинов, приводящая к потерям, является повторное смешение из-за несоответствия техническим требованиям товарного продукта по качеству [5]. Несовершенство технологической схемы компаундирования бензинов, системы контроля и управления приводит к снижению эффективности НПЗ из-за увеличения издержек, нарушению плана производства товарных бензинов и т.п.

Одной из основных причин является также неопределенность параметров технологического режима смешения бензинов - состав компонентов смешения бензинов из-за нарушения режимов работы установок, изменения режимных

параметров по температуре, давлению, расходу, погрешности измерительной системы.

3. ОНЛАЙН ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СМЕШЕНИЕМ БЕНЗИНОВ

Построение и реализация онлайн-оптимизационных моделей и алгоритмов управления в условиях неопределенности является эффективным инструментом решения проблемы оптимизации процесса смешения бензинов [7, 8].

3.1. Структура оптимизационной модели смешения бензинов

Большинство систем смешения бензинов основываются на концепции периодического смешения по партиям. В целом технология смешения и выпуск бензинов определенной марки разделена на множество партий по времени. Рецептуры смешения бензинов рассчитываются для каждой партии.

Функциональная структура системы онлайн-оптимизационного смешения бензинов представлена на рис. 1.

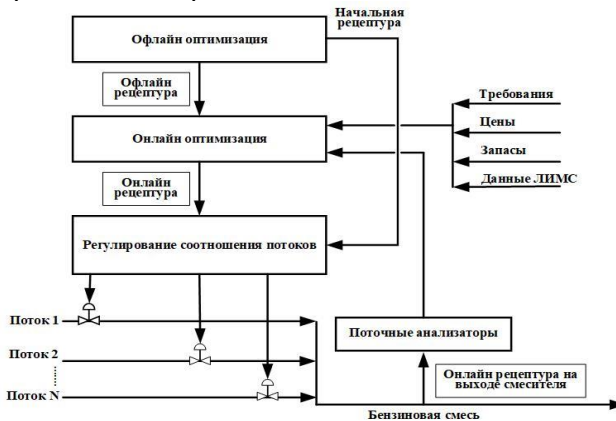


Рис. 1. Функциональная структура системы управления смешением бензинов.

Задание на планирование и смешение бензинов состоит:

- из требований к плану производства бензинов, сроков, критериев оптимизации;
- цен на компоненты смешения;
- запасов компонентов смешения и остатков товарной продукции в резервуарах;
- данных анализа состава и показателей качества компонентов смешения и бензинов с лабораторной информационно-менеджмент системы (ЛИМС).

В модели офлайн оптимизации рассчитываются начальные оптимальные рецептуры и пересылаются в распределенную систему управления (РСУ) для начала процесса смешения и поддержания оптимального во времени соотношения потоков. В дальнейшем, онлайн модель оптимизации корректирует онлайн рецептуру с учетом данных от поточных

анализаторов и информации от производственно-диспетчерской службы до завершения партии.

Математическое описание зависимости показателей качества бензинов от состава рецептур смешения бензинов в общем случае имеет вид:

$$f_i(q_{i,j}, X_j) \approx \sum_{j=1}^N X_{i,j} q_{i,j} = q_{i,cm} * \sum_{j=1}^N X_j \quad (1)$$

где: $f_i(q_{i,j}, X_j)$ – функция зависимости i -го показателя качества бензиновой смеси от компонентного состава X_j и их показателей качества $q_{i,cm}$, с эффектом нелинейности в общем случае, $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, M$.

В выражении (1) приближенное равенство показателя качества смеси, как суммы произведений долей компонентов смеси на соответствующий показатель качества справедливо, кроме показателей качества, имеющих нелинейную зависимость от состава рецептуры: ОЧИМ), ОЧММ и ДНП по Рейду.

Результатом решения задачи оптимизации рецептур смешения по математической модели (1) является вектор компонентов массовых (объемных) долей компонентов смешения X .

3.2. Постановка задачи оптимизации управления смешением бензинов

Критерий оптимальности

$$R = C^T * X \quad (2)$$

Ограничения

$$F(Q, X) \leq (E^T * X) * S + \Delta Q \quad (3)$$

где

$$\Delta Q = [Q_{cm} - Q_{cm}^p] * (E^T * X) \quad (4)$$

$$H * X \leq d \quad (5)$$

$$X^* = \text{Arg min}_{X \in \bar{X}} R(X) \quad (6)$$

C – вектор цен компонентов смешения;

S – вектор спецификаций показателей качества бензина;

X – вектор массовых (объемных) долей компонентов смешения, $x_j, j = 1, \dots, M$;

Q – матрица показателей качества компонентов смешения;

Q_{cm}, Q_{cm}^p – векторы показателей качества смеси измеренных и прогнозируемых по математической модели, соответственно;

E – единичная матрица;

H – матрица ограничений вовлекаемых компонентов смешения по рецептуре;

d – вектор ограничений на количество доступных ресурсов (запасы) смешения бензинов при расчете рецептур;

ΔQ – вектор произведения «невязки» между измеренными и расчетными показателями качества смеси бензина на долю (объемную/массовую) компонента в смеси, обновляемый на каждом интервале оптимизации и управления процессом смешения;

X^* – оптимальное значение вектора X ;

\tilde{X} – область допустимых значений вектора X .

В постановке задачи (2) – (5), $F(Q, X)$ - в общем случае нелинейная функция по ряду показателей качества смеси бензинов.

Для линейной функции в условии (3) $F(Q, X) = QX$.

Процесс смешения бензинов осуществляется по партиям в указанное время и в определенной последовательности в зависимости от состояния резервуарных парков как по компонентам смешения, так и товарного бензина.

Массив предшествующих показателей качества компонентов смешения используются для прогнозирования показателей качества и расчета рецептур на всем временном горизонте смешения.

Критерий оптимальности по партиям

$$R_p = \sum_{t_r}^{t_k} C^T * X_t \quad (7)$$

Ограничения

$$\sum_{t_h}^{t_r - \Delta t} F(Q_t, X_t) + \sum_{t_r}^{t_k} F(Q_{cm,t}^p, X_t) \leq \left[\sum_{t_h}^{t_k} E^T * X_t \right] * S \quad (8)$$

$$F(Q_{cm,t}^p, X_t) \leq [E^T * X_t] * S \quad (9)$$

$$[H * X_t]_{t_h \rightarrow t_k} \leq D \quad (10)$$

$$X_t^* = \underset{X_t \in \tilde{X}_t}{\text{Arg min}} R(X_t) \quad (11)$$

где t_h, t_r, t_k – время начала, текущего и окончания партии смешения, соответственно; t – время смешения; $Q_{cm,t}^p$ – матрица прогнозируемых показателей качества; D – вектор ограничений на компоненты смешения; X_t^* - оптимальное значение вектора X на интервале времени t ; \tilde{X}_t – область допустимых значений вектора X на интервале t .

Выбор шага дискретизации по времени Δt определяется динамикой изменения показателей качества, обеспечивающий требуемую точность. Ограничение (9) обеспечивает выполнение требований по спецификации в каждой партии.

3.3. Оптимизация рецептур смешения бензинов в условиях параметрической неопределенности

В формулировках задачи оптимальности (2) - (6) и (7) - (11) не учитываются влияние параметрической неопределенности измеряемых показателей качества компонентов смешения. В постановке задачи (7) - (11) показатели качества компонентов смешения для каждой партии различны. Неучтенная неопределенность измеряемых величин приводит к высокой вероятности получения некондиционного продукта и, как следствие, - повторному смешению и снижению производительности системы смешения бензинов.

Для решения задачи учета неопределенности по качеству компонентов смешения бензинов в интервале периода смешения бензинов вводится случайная функция в математическое описание постановки задачи.

Пусть X - вектор компонентов рецептур смешения, ξ – стохастический (случайный) вектор.

$F(X, \xi)$ - целевая функция и $h_j(x, \xi)$ ($j = 1, 2, \dots, m$) - стохастическая функция ограничений;

Математическая формулировка задачи стохастической оптимизации с вероятностным ограничением имеет следующий вид:

$$R(x, \xi) = F(CX, \xi) \quad (12)$$

Ограничения по вероятности P_r в общем виде означает, что при формировании рецептур и смешении бензинов, количество вовлекаемых в смесь каждого компонента не будет превышать запасы компонентов в резервуарах с достоверностью a_j

$$Pr_j(h_j(x, \xi) \leq 0) \geq a_j, \quad j = \overline{1, m} \quad (13)$$

где a_j - уровень достоверности ограничения, другими словами, после получения оптимальных значений, вероятность реализации решения должна быть не ниже, чем a_j для каждого $h_j(x, \xi) \leq 0$, что означает, относительно ОЧИМ, минимизацию вовлечения высокооктановых дорогих компонентов в смесь бензина. Результатом является экономия «октанового фонда» и снижение стоимости товарного бензина.

Постановка задачи в виде (12) определяет решение с учетом параметрической неопределенности, который применим и для онлайн оптимального управления смешением бензинов.

Онлайн модель управления ориентирована не просто на смешение бензинов по партиям и достижения максимума прибыли, но одним из показателей эффективности является время партии смешения, включая вероятность отклонения от спецификации бензина в конце каждой партии смешения и стоимость перехода от офлайн рецептур к текущим рецептурам в режиме реального времени.

Принятие решений по максимизации прибыли при планировании рецептур смешения бензинов является функцией офлайн оптимизации.

Параметрическая неопределенность по качеству компонентов смешения обозначается как вектор ξ . Неопределенность в целевой функции исключается, потому что целевая функция сводит к минимуму разницу между рецептурами верхнего уровня (офлайн оптимизация) и текущими в режиме реального времени для максимизации прибыли от смешения бензинов по каждой партии в срок

$$R_{t, t-1} = \Delta(X, \xi) = \|X_{t_r} - X_{t_r-1}\| \quad (14)$$

Ограничение

$$Pr_j \left\{ \left(\sum_{t_h}^{t_{T-1}} X_t \right) * Q_b + F(Q_{t_{T-1}}, \xi, X_{t_T}) \leq \right. \\ \left. \leq \left[\sum_{t_0}^{t_f} E^T * X_t \right] * S_j \right\} \geq a_j, \quad j = \overline{1, m} \quad (15)$$

$$\sum_{t_h}^{t_T} H * X_t \leq d \quad (16)$$

В соотношении (15) слева от неравенства первое слагаемое в вероятности Pr - произведение вектора измерений показателей качества смеси поточного анализатора Q_b на долю компонентов смешения в смеси, реализует функцию обратной связи в блоке онлайн оптимизации, рис. 1.

Вектор неопределенности ξ представлен в ограничениях. Качество сырья в текущих условиях определяется слагаемым со случайным вектором возмущений ξ .

$$Q_{t_T}^{\Pi} = Q_{t_{T-1}} + \lambda * \xi \quad (17)$$

где ξ - определенные функции распределения, полученные статистическими методами;

λ - вектор поправочных коэффициентов.

Учет вектора случайных возмущений ξ , влияющего на неопределенность изменения параметров компонентов смешения учитывается в каждой партии, и решает проблему несоответствия («невязки») результатов, полученных по модели, и данными онлайн-оптимизации в режиме реального времени.

В то же время следует отметить, что смесь полученного бензина перед последующей партией смешения ($\sum_{t_h}^{t_{T-1}} X_t$) является товарным продуктом. Для последующих партий в целом сохраняется постановка задачи эффективности смешения.

Представленная онлайн-модель оптимизации не прогнозирует показатели качества компонентов смешения для оставшегося интервала времени смешения бензинов как в (7), и рассчитывается рецептура для текущей партии с точным прогнозом длительности смешения. Для сложных процессов производства, крупномасштабный прогноз может привести к снижению производительности системы из-за использования неточной прогнозной информации.

Выполнение условия (15) обеспечивает высокую вероятность производства бензиновой смеси в соответствии с требованиями к спецификации, равной производству достоверностей a_j в целом по партиям, снижающими риск повторного смешения, вызванного некондиционностью показателей качества товарного бензина.

3.4. Структура информационных связей автоматизированной станции смешения бензинов

Интеграция и функциональное разделение подсистем ПК ОПОР, SAP APO (Advanced Planner and Optimizer), АСУ ТП и ЛИМС (лабораторная информационная менеджмент система).

SAP APO позволяет обеспечить четкое синхронное взаимодействие всех участников технологических цепочек начиная с поставщиков сырья, специалистов по планированию производства и заканчивая потребителями готовой продукции.

SAP APO обладает полным набором программных приложений для планирования логистических цепочек в режиме реального времени и поддержки принятия решений.

В SAP APO входят, в частности программные средства:

- Demand Planning (планирование спроса);
- Production Planning (планирование производства);
- Detailed Scheduling (точное календарное планирование – составление расписания).

Исходными данными для ПК ОПОР являются:

Из SAP APO:

- объемы товарной продукции (бензинов) для интервалов планирования (сутки, месяц, квартал);
- запасы компонентов смешения с учетом остатков;
- цены компонентов смешения;
- постановка задачи (критерии оптимальности смешения бензинов).

Из ЛИМС:

- показатели качества компонентов смешения и реализованных рецептур бензинов;
- ограничения по «октановому».

Из АСУ ТП:

- режимные параметры процесса смешения – температура, давление на линиях подачи компонентов и бензина на выходе смесителя;
- данные с поточных анализаторов.

Выходными данными ПК ОПОР являются:

В АСУ ТП:

- оптимальная рецептура офлайн режима на исполнение в качестве «уставок» регуляторам поддержки соотношения потоков смешения;
- скорректированная по данным поточных анализаторов в онлайн режиме регулирования рецептура для изменения «уставок» регуляторам соотношения смешиваемых потоков с коррекцией («уставок») по показателям качества бензиновой смеси на выходе смесителя.

В SAP APO:

- оптимальные рецептуры, полученные в офлайн режиме планирования и рецептуры,

полученные в онлайн режиме регулирования процесса компаундирования бензинов;

- результаты планирования рецептур бензинов по балансу, полученные в модуле ПК ОПОР, BalancePlus;
- значения критериев оптимальности полученных рецептур в ПК ОПОР.

Связь систем SAP APO и ПК ОПОР осуществляется через общую папку файловым обменом.

Укрупненная блочная структура информационных связей ПК ОПОР в автоматизированной станции смешения бензинов (информационного обмена ПК ОПОР, SAP APO, АСУ ТП и ЛИМС) представлена на рис. 2.

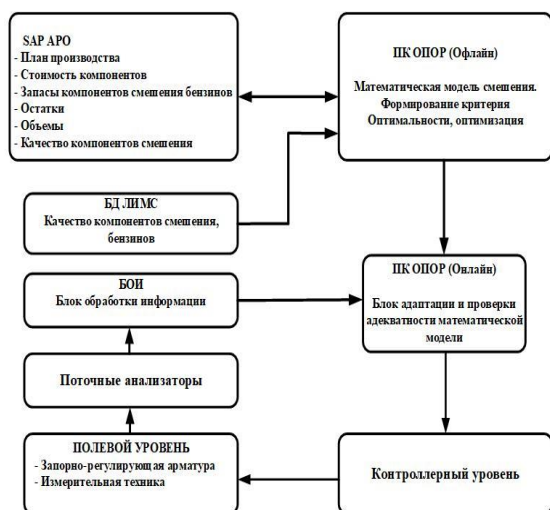


Рис. 2. Укрупненная блочная структура информационных связей ПК ОПОР.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПК ОПОР решает задачи на уровне технологического процесса смешения бензинов, с учетом физико-химических закономерностей изменения показателей качества смеси бензинов и мазутов от состава и показателе качества смешиваемых компонентов, где учитываются и нелинейность процесса по отдельным показателям качества.

В этом случае оптимизация режимных параметров обеспечивает экстремум выбранных критериев оптимальности - технико-экономических показателей.

Данные, использованные при моделировании и расчетах оптимальных рецептур смешения бензинов, взяты из режимов работы установки на Сызранском НПЗ при тестировании ПК ОПОР смешения бензинов и мазутов [1, 2].

Программный комплекс ПК ОПОР, являющийся инструментом оптимизации и управления процессами смешения топлив (бензины, мазуты), может применяться при подготовке специалистов-технологов для предприятий нефте-газопереработки. В настоящее

время рассматривается возможность использования ПК ОПОР в учебном процессе подготовки бакалавров в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина и других родственных университетах.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- q_i – i -й показатель качества;
- x_j – доля j -го компонента в рецептуре;
- R – критерий оптимальности;
- Pr – вероятность;
- C – вектор цен компонентов смешения;
- ОЧИМ – октановое число по исследовательскому методу;
- ОЧММ – октановое число по моторному методу;
- ДНП – давление насыщенных паров по Рейду.

Индексы:

- i – номер компонента смешения;
- j – номер показателя качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов С.С., Алексанян А.А., Костандян В.А., Егоров А.Ф. Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов. //Нефтепереработка и нефтехимия. – 2019. № 1.с. 13 – 19.
2. Горбунов С.С., Алексанян А.А., Костандян В.А., Егоров А.Ф. Учет нелинейности рецептур смешения топлив в программном комплексе оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения топлив. //Нефтепереработка и нефтехимия. 2019. № 2. с. 9 – 11.
3. Никитин В.А., Мусаев А.А. Оптимизация компаундирования углеводородных смесей в потоке с нелинейным взаимодействием компонентов. Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН СПИИРАН. Вып. 4. Наука, 2007, стр. 327 – 336.
4. Wen Yu, América Morales. Gasoline Blending System Modelling via Static and Dynamic Neural Networks, International Journal of modelling and simulation, vol. 24, No. 3, 2004, p. 151 – 160.
5. White J., Hall F. Gasoline blending optimization cuts use of expensive components // Oil & Gas J. – 1992. – Vol. 90, Issue 44. – P. 81–84.
6. Michalek T.F., Nordeen K., Rys R. Using a relational database for blend optimization // Hydrocarbon Processing. – 1994. – Vol. 73, Issue 9. – P. 47–49.
7. Diaz A., Barsamian J.A. Meet changing fuel requirements with online blend optimization //.
8. Горбунов С.С., Костандян А.В., Егоров А.Ф., Сидоров В.В., Алексанян А.А. Интеллектуальная система управления смешением бензинов в режиме реального времени с учетом параметрической неопределенности. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 7(576),2021, с. 28 – 36.

*А.В. Костандян*¹, *С.С. Горбунов*², *А.Ф. Егоров*³, *В.В. Сидоров*⁴, *В.А. Костандян*²

ООО «Ксиматик», Москва (1)

ООО «МЦЭ-Инжиниринг», Москва (2)

РХТУ имени Д.И. Менделеева, Москва (3)

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (4)

МОНИТОРИНГ ИЗМЕРЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

АННОТАЦИЯ

Для обеспечения оперативности принятия решений и качественного управления технологическими процессами требуется стратегия онлайн-мониторинга и корректировки данных от измерительной системы в режиме реального времени. В статье представлен подход анализа данных измерительных систем на достоверность и методы решения этих проблем, основывающиеся на построении обучающихся моделей на основе нейронных сетей. Для идентификации и автокоррекции недостоверных измерений в режиме онлайн-мониторинга и управления предлагается использовать авто-ассоциативную нейронную сеть обучающаяся модифицированным робастным методом.

Ключевые слова – калибровка, измерительная система, неисправность, нейронная сеть, диагностика, управление

1. ВВЕДЕНИЕ

Периодическая калибровка приборов обеспечивает корректность показаний измерительной системы (ИС) в течение определенного периода времени, но нет гарантии, что неисправный прибор будет откалиброван в течение других периодов. Следовательно, для достоверности данных и корректного функционирования системы управления, требуется стратегия онлайн-мониторинга и коррекции измерений ИС.

Традиционные системы мониторинга и диагностики неисправностей используют аппаратное резервирование ИС, обеспечивающие надежные результаты, но имеет ряд недостатков, таких как высокая стоимость большого количества требуемых датчиков и издержки размещения, необходимого для их установки [1].

Целью этой работы является разработка системы онлайн-мониторинга и автокоррекция измерений датчиков, чтобы снизить затраты на обслуживание, минимизировать риск использования некалиброванных или неисправных датчиков, повысить надежность приборов и снизить время некорректной работы оборудования.

2. АКТУАЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

На промышленных предприятиях анализ сигналов, поступающих от датчиков ИС мониторинга процесса, представляет собой сложную задачу из-за большого объема данных.

Обеспечение достоверности данных от ИС в режиме реального времени является одним из основных факторов качественной системы управления технологическими процессами.

Стратегия онлайн-мониторинга, диагностики неисправных датчиков и коррекции показаний ИС с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) представлены в работах [3, 4].

В статье рассматривается возможность решения этой проблемы использованием авто-ассоциативной нейронной сети (ААНС), обучающаяся модифицированным робастным методом в системе онлайн-мониторинга и управления технологическим процессом, обнаружения неисправностей ИС и автокоррекции измерений.

Решение этой проблемы основано на построении интеллектуальной обучающейся системы в режиме реального времени на базе архитектуры авто-ассоциативной нейронной сети, фильтрующей шум измерений, осуществляющей самокоррекцию ошибочных сигналов из-за сбоев и дрейфа показаний ИС с течением времени, осуществляющей обработку данных, относящихся к грубым ошибкам [2].

3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Интеллектуальная система диагностики ИС является программным комплексом, на вход которого непрерывно поступает массив измерений и, в соответствии с реализованным алгоритмом определяет недостоверность измерений, корректирует и локализует позицию неисправного измерителя.

В настоящее время, учитывая сложность и неоднозначность режимов технологических процессов, большое развитие получают новые

информационные технологии построения эффективных систем мониторинга и управления, основанные на анализе данных и формировании базы знаний по управлению производственными процессами в режиме реального времени.

Наблюдается тенденция перехода от периодического технического обслуживания к стратегии непрерывного технического обслуживания в режиме реального времени, основанная на анализе состояния оборудования, являющимся потенциально более эффективным онлайн-методом.

На рисунке 1 и 2 представлены укрупненные блок-схемы функционирования системы диагностики ИС и построение нейро-сетевой прогнозной модели, соответственно.

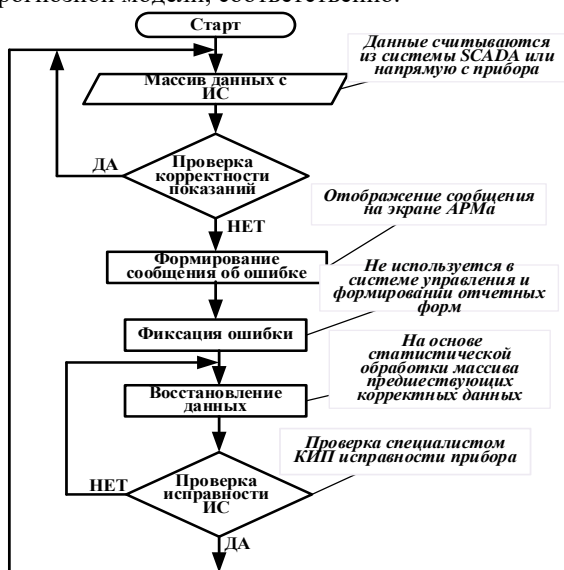


Рис.1. Укрупненная блок-схема функционирования системы диагностики ИС

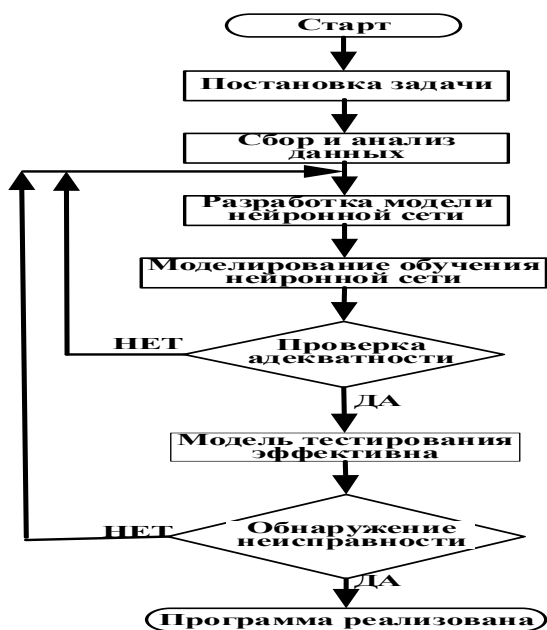


Рис. 2. Укрупненная блок-схема построения нейро-сетевой прогнозной модели

На основе представленного обобщенного подхода к выбору структуры и параметров ИНС, объема обучающей выборки от непрерывно поступающих данных с ИС, нейронная сеть обучается адекватно аппроксимировать динамику объекта для диагностики неисправности ИС, оценки и восстановления некорректных измерений.

3.1. Архитектура авто-ассоциативной нейронной сети

Подсистема контроля калибровки приборов на основе ИНС состоит из следующих основных компонентов:

- блока обучения оценки измерений, использующий архитектуру ААНС Хопфилда;
- модуля статистического анализа и принятия решений, основанный на последовательном тестировании и оценки взаимной корреляции (ковариации) измеренных и оценочных значений ИНС;
- модуля коррекции показаний неисправной ИС;
- модуля настройки нейронной сети.

Обучение ААНС заключается в непрерывной коррекции весовых коэффициентов связей (синапсов) в модуле настройки нейронной сети до тех пор, пока не будет устойчивое решение, являющееся признаком обученности сети. Выходной вектор рекуррентно формируется в результате процесса обучения ААНС и репродуцирования входного вектора на выходе в соответствующем динамическом диапазоне.

Укрупненная блок-схема подсистемы калибровки и верификации показана на рисунке 3.

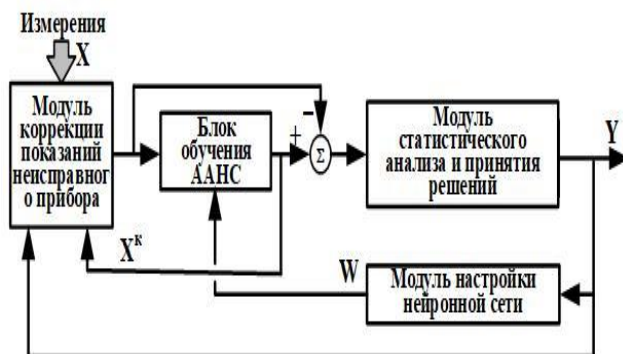


Рис. 3. Укрупненная блок-схема подсистемы калибровки и верификации

Архитектура авто-ассоциативной нейронной сети (ААНС), основанная на нелинейной методологии главных компонент [2, 7], позволяет фильтровать шумы измерений и осуществлять самокоррекцию недостоверных сигналов ИС - дрейфа показаний во времени, грубых ошибок из-за отказов датчиков. В этом методе входные данные системы отображаются в выходные данные с помощью нелинейной функции G.

Коррекция и восстановление исходных данных выполняется функцией «обратного отображения», выраженной нелинейной функцией в выходном слое.

Функции преобразования входного \mathbf{G} и выходного \mathbf{H} слоев выбираются таким образом, чтобы минимизировать потерю информации во время процесса преобразования (отображения) [2, 7].

Данные от резервированных (избыточных) измерительных элементов на входе в ААНС усредняются по выбранным измерениям (два из трех).

При не избыточности ИС оценка выходного обученного вектора основана на статистическом анализе взаимной корреляции измерений [3], обеспечивающий устойчивые результаты по сравнению с измерениями с меньшей взаимной корреляцией во входных векторах [4].

3.2. Алгоритм работы ААНС

Динамика состояния во времени i -ого нейрона в сети из N нейронов описывается дискретной динамической системой:

$$y_i(t+1) = F\left(\sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i\right) \quad (1)$$

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y(t), & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i = T, \\ +1, & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i > T, \\ -1, & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i < T, \end{cases} \quad (2)$$

ААНС с обратными связями устойчива в соответствии с условиями симметричности матрицы весовых коэффициентов W [1] $w_{ij} = w_{ji}$ и равенства весовых коэффициентов главной диагонали матрицы $w_{ii} = 0$.

На начальном этапе в сети Хопфилда веса задаются и вычисление весов осуществляется по соотношению:

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^M x_j^k * x_i^k, & i \neq j, \\ \mathbf{0}, & i = j, \end{cases} \quad (3)$$

где x_j^k - j -я компонента запоминаемого k -го вектора; M – общее число запоминаемых образов.

Вектор состояния ААНС характеризуется двоичным кодом длиной массива N .

Матрица весовых коэффициентов W формируется следующим образом:

$$W = \sum_{k=1}^m X_k^T * X_k - E \quad (4)$$

где E – единичная матрица.

Укрупненный алгоритм работы ААНС состоит из двух стадий: обучения и практического использования.

I. Стадия обучения:

1. Формирование матрицы эталонных образов $X_{ij}(0), Y_i(0)$;

2. Расчет матрицы весовых коэффициентов, уравнение (3).

II. Стадия практического использования:

1. На вход ААНС подается зашумленный вектор-столбец измерений \bar{X} , $i = \overline{1, N}$. Выходам нейронов присваиваются соответствующие значения входного вектора $Y(0) = X(0)$;

2. Пересчет состояния нейронов и расчет выходного вектора ААНС

$$Y_i(t+1) = \text{sign} \left| \sum_{j=1}^N w_{ij} Y_j(t) \right| \quad (5)$$

Каждый нейрон может быть в одном из двух состояний $Y_i(t) \in \{-1; +1\}$.

3. Сравнение на каждом этапе итерации t и $t+1$ сходимости и устойчивости образов на выходе ААНС и оценка «невязки» с допустимым порогом ошибки. Если «невязка» в пределах порога ошибки, ААНС обучена, эталонный образ близок входному вектору, если нет, то переход в пункт 2. Может быть и ситуация чередования выходного вектора, являющаяся признаком завершения обучения.

4. После стабилизации ААНС выходной вектор соответствует одному из эталонных образов.

Устойчивые точки (аттракторы) образуют зоны притяжения в пространстве поиска эталона. Наряду реальных аттракторов в сети могут быть и ложные аттракторы, которым не соответствует никакой образ.

При подаче на вход сети частично неправильного входного вектора сеть стабилизируется в состоянии, ближайшем к желаемому. Для этого веса сети следует выбирать так, чтобы образовывать состояния устойчивого равновесия для каждого входного образа.

Вектор измерений X ИС является входом в блок самокоррекции (рис. 3) показаний неисправных приборов в котором корректируется оценка входного вектора.

Целью самокоррекции является восстановление измерений от ИС, формирование вектора «невязок» исходных и скорректированных измерений и статистическая оценки взаимной корреляции измерений.

3.3. Онлайн мониторинг

По структуре ИС технологической схемы приняты две основные категории моделей мониторинга: избыточные и неизбыточные. В моделях с резервированием (избыточные) набора датчиков проверяется один и тот же параметр процесса с выбором среднего значения достоверных измерений, напротив, в методе неизбыточной модели проверка основана на оценках коррелированных измерений [3]. Датчики с высококоррелированными измерениями генерируют меньше ошибок в прогнозируемых измерениях по сравнению с низкокоррелированными [2, 4].

На рисунке 4 представлена упрощенная блок-схема системы мониторинга в режиме реального времени. Входной вектор прямых измерений X

преобразуется и восстанавливается в блоке самокоррекции до наилучшей оценки.

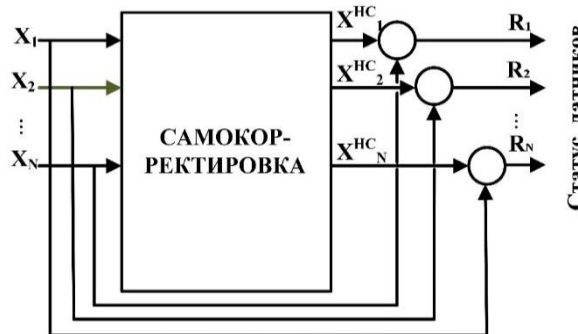


Рис. 4. Блок-схема модели системы онлайн мониторинга

Сравнением результирующих векторов $X^{НС}$ и X формируется вектор невязок R (Рисунок 4), который используется для оценки состояния каждого датчика.

Основным элементом модели автокоррекции является модуль ААНС, который используется для восстановления сигналов. ААНС играет роль единичной матрицы, когда измерения проводятся без сбоев и нелинейной функции, которая способна восстанавливать недостоверные сигналы.

3.4. Основные этапы автокоррекции

Построение модели самокоррекции включает следующие этапы:

3.4.1. Оценка взаимной корреляции измерений

На этом этапе выполняется корреляционный анализ массива измерений ИС. Степень взаимной корреляции между переменными является важным параметром ААНС. В ситуациях, когда корреляция высока, дрейф, смещение или шум в одном из датчиков ИС не оказывает значительного влияния на реакцию ААНС, потому что его выходные данные связаны со всеми входами посредством большого количества весов и шаблонов.

Степень взаимной корреляции (ковариации) K_{ij} между параметрами i и j определяется корреляционной функцией [6]

$$K_{ij} = \frac{COV_{ij}}{\sqrt{COV_{ii} * COV_{jj}}} \quad (6)$$

Коэффициент корреляции двоичных векторов X_j и X_k

$$K_{ik} = \left| \sum_{i=1}^N x_i^j * x_i^k \right| \quad (7)$$

Для всех M запоминаемых образов обобщенная корреляция имеет вид

$$K = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M K_{jk} \quad (8)$$

Известно, что не всегда, при измерениях одного и того же параметра коэффициент взаимной корреляции имеет высокую степень из-за неоднородности массива данных, относящихся к

различным режимам работы, поэтому возникает проблема классификации массива измерений по их принадлежности к технологическим режимам.

Распознавание и автоматическая классификация измерений по режимам обеспечивает лучшую аппроксимацию измерений и величину K_{ij} . Таким образом группы измерений формируются по признаку принадлежности к технологическим режимам.

Достаточно высокая степень взаимной корреляции измерений во входном векторе нейронной сети, как избыточная информация, является фактором надежности процедуры обучения. В результате любой конкретный сетевой выход практически не показывает изменений, если соответствующий вход был искажен шумом, ошибочными или отсутствующими данными, что является свойством робастности ААНС. Это свойство позволяет обнаруживать отклонения или отказы датчиков, сравнивая измерения (сетевые входы) с соответствующими сетевыми оценками значений датчиков (сетевые выходы).

Из опыта известны пороговые значения коэффициента корреляции: низкая корреляция - ниже 0,4, средняя корреляция - между 0,4 и 0,8 и высокая корреляция - выше 0,8.

3.4.2. Предварительная обработка данных

После определения подгрупп измерений ИС перед обучением нейронной сети в базе данных необходима фильтрация грубых измерений, восстановление и нормирование.

3.4.3. Оценка количества нейронов

Сложность ААНС определяется количеством нейронов в слое узких мест [3]. Хотя количество нейронов в слоях отображения и обратного отображения влияет на производительность нейронной сети, количество нейронов в слое узкого места оказывает более значительное влияние на качество обучения ИНС.

Различные топологии обучаются и тестируются, чтобы собрать информацию, которая будет использоваться для оценки количества нейронов, необходимых для качественной работы ААНС при коррективке измерений ИС. Сеть обучается с помощью базы данных, содержащей также неполные (искаженные) данные.

В процессе обучения используется критерий среднеквадратичной ошибки. Решение о лучшей модели принимается путем перекрестной проверки на основе значения средней процентной ошибки.

На этапе тестирования используется среднеквадратическая ошибка (СКО) для оценки эффективности модели.

3.4.4. Модифицированный робастный метод

На этом этапе решается задача восстановления измерений, имеющие скачкообразные ошибки, систематическое смещение измерений, шумы.

Решение этой проблемы возможно использованием робастного метода обучения,

предложенный Крамером, в котором используется одна или несколько модифицированных автоассоциативных нейронных сетей (М-ААНС) для коррекции и восстановления некорректных измерений, полученных в результате неисправности датчиков, при условии, что неисправности не являются одновременными [4,5].

Робастная модель ААНС может восстанавливать измерения датчиков, когда один датчик в группе вышел из строя, но при восстановлении ошибочного сигнала есть отклонения в выходных сигналах исправных датчиков.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование платформы информационных технологий построения систем управления, генерирующих знания об объекте управления постоянно расширяется, при этом существуют как приложения, в которых возможна работа в режиме оффлайн, так и приложения, требующие функционирования системы и ее адаптации в режиме реального времени к изменениям в объекте.

В статье рассматривается использование аппарата нейро-сетевых технологий построения интеллектуальной системы оценки измерений в режиме реального времени для решения проблемы диагностики измерительной системы и коррекции грубых измерений.

Представлена модель онлайн-мониторинга элементов ИС, основанная на использовании ААНС с использованием аппарата статистического анализа исходных данных для группировки по их принадлежности к режимам технологического процесса для корректной самокоррекции ошибочных измерений для каждой из этих групп.

Построение и реализация на промышленных объектах предложенной модели обеспечит качество существующих систем управления как с точки зрения достоверности, так и надежности.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

G, H – операции преобразования входного и выходного векторов ААНС;

N – количество нейронов;

t – дискретный промежуток времени;

W – матрица весовых коэффициентов;

E – единичная матрица;

X – вектор измерений на входе в ИНС;

Y – вектор на выходе ИНС;

K – коэффициент взаимной корреляции (ковариации);

M – количество запоминаемых образов.

Индексы:

i, j – связь нейронов с соответствующими номерами;

k – номер вектора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Theilliol D, Noura H, Ponsart J** (2002) Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system based on analytical redundancy. *ISA* 41(3):365–382
2. **Kramer MA** (1991) Nonlinear principal component analysis using autoassociative neural networks. *AIChE J* 37(2):233–243.
3. **Hines J, Garvey D** (2007) Process and equipment monitoring methodologies applied to sensor calibration monitoring. *Qual Reliab Eng Int* 23:123–135.
4. **Hines J, Grinok A, Attieh I, Urigh R** (2000) Improved methods for on-line sensor calibration verification. In: 8th International conference on nuclear engineering, Baltimore, USA.
5. **Kramer MA** (1992) Autoassociative neural networks. *Comput Chem Eng* 16(4):313–328.
6. **Бураков, М.В.** Нейронные сети и нейроконтроллер: учеб. пособие. – СПб.: ГУАБ, 2013. 284 с.: ил.
7. **Soares-Filho W, Seixas J, Caloba L** (2001) Principal component analysis for classifying passive sonar signals. *IEEE Int Symp Circuits Syst Syd Aust* 2:592–595.

Д.А. Сайкова., В.А. Шихин

Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ЦЕНЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВЫБОРКАХ

АННОТАЦИЯ

Исследуется метод совместной обработки различающихся массивов данных при решении задач повышения точности краткосрочного прогнозирования цены электроэнергии на свободном оптовом федеральном рынке. Показано, что при построении моделей прогноза (МП) точность прогнозируемой переменной может быть повышена за счет привлечения информации, полученной в ходе обработки дополнительных выборок с учетом корреляционной связи соответствующих массивов данных. Доказано, что использование корреляционных матриц для соответствующих массивов данных в расчетном выражении придает совместной оценке свойство нечувствительности к грубым отклонениям в данных.

Ключевые слова: модель прогноза; точность прогноза; цена электроэнергии; временной ряд; валидация; корреляционный анализ

1. ВВЕДЕНИЕ. ИСХОДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Если рассматривать задачу построения моделей прогноза цены электроэнергии комплексно [1,3,6,7,8], то возможны следующие сценарии при и которых возникает проблема сопоставления отдельных выборок данных для целей их совместной обработки.

В первом случае МП строится применительно к конкретному региону за определенный исторический период. По мере использования МП для предсказания точность прогноза может выйти за установленные пределы в некоторый фиксированный момент времени. Это вызывает необходимость запустить процедуру перенастройки используемой МП. Вопрос состоит в том, можно ли повысить точность МП за счет пересчета ее коэффициентов по исторической выборке с учетом добавления нового массива данных на новом дополнительном периоде времени. При этом допустимо предположить, что новый период времени мог характеризоваться специфическими процессами или факторами, характерными только для указанного периода. В электроэнергетике такие явления часто имеют место, например, из-за климатических факторов (засуха, морозный год, природные катаклизмы и др), провал или резкий подъем цен на топливо, скачки валютного курса, ввод дополнительных генерирующих мощностей или ввод в действие магистральных электропередач, системные аварии и т.д. В силу этого учет соответствующего дополнительного массива данных при перенастройке ранее полученной МП

может привести к снижению ее предсказательные свойства в дальнейшем.

Вторым возможным сценарием, при котором может понадобиться упомянутая процедура валидации МП может быть попытка обобщения имеющейся ранее построенной МП для прогноза по другому региону или в целом по ценовой зоне, или определение степени универсальности МП для работы на федеральном уровне.

Третьим возможным сценарием является решение проблемы увеличения размерности существенно ограниченной исходной выборки по конкретному региону за счет обоснованного привлечения данных по другим регионам для построения таким образом вынужденно обобщенной МП, но без потери в точности.

Как минимум при указанных трёх сценариях встает вопрос о получении искомым оценок прогнозируемой переменной с учетом различий в отдельных выборках данных.

Показано, что при построении моделей прогноза (МП) точность может быть повышена за счет привлечения информации, полученной в ходе наблюдений для нескольких регионов с учетом корреляционной связи массивов. Опираясь на публикации [2,4,5] доказано, что использование корреляционных матриц в расчетном выражении придает совместной оценке свойство нечувствительности к грубым отклонениям в данных.

Пусть y_t есть уровень временного ряда (ВР) в момент времени t ; $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$, – уровни ВР в соответствующие моменты времени $t-1, t-2, \dots, t-p$; p – глубина исторического ряда. Рассчитываемые оценки искомым зависимостей y_t могут быть представлены в виде вектора оценок вероятностных характеристик. Рассмотрим оценки математического ожидания:

$$\bar{Y} = \mu = [\mu_1, \dots, \mu_N]^T; \rightarrow \hat{Y} = m = [m_1, \dots, m_N]^T \quad (1)$$

Пусть μ есть N -размерный вектор оцениваемых вероятностных характеристик, μ_{ref} есть вектор значений рассчитанных по опорному (эталонному) массиву данных МДэ. Предполагается, что на основе априорной информации такой массив (выборка данных) всегда может быть определен. Обозначим через μ_1 и μ_2 , соответственно, векторы вероятностных характеристик возможно существенно различающихся массивов (полученных по различным регионам) МД1 и МД2:

$$\mu_I = Ex [F_I] = \mu \quad \mu_{II} = Ex [F_{II}] \quad (2)$$

где F_I , F_{II} есть матрицы, компоненты которых представляют собой элементы соответствующих массивов МД1 и МД2.

Предложена расчетная формула для оптимальной оценки m_{oi} :

$$m_{oi} = m_{Ii} - Cor\{F_{Ii}, F_{II}\} Cor^{-1}\{F_{II}, F_{II}\} (m_{II} - \mu_{ref}) \quad (3)$$

Результаты контрольных расчетов показали, что предложенная вычислительная процедура получения композитной оценки прогноза (КМП-модели) позволяет эффективно отфильтровать низкоточные массивы данных в процессе их

совместной обработки за счет привнесенного "гибкого регулирования" посредством участвующих в расчетах корреляционных матриц.

В табл.1 приведены массивы данных, на основе которых рассчитываются необходимые для реализации вычислительной процедуры оценки корреляционных функций по формулам:

$$Cor\{\widehat{F_I}, F_{II}\} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (F_{Ij} - m_I) (F_{IIj} - \mu_{ref})^T \quad (4)$$

$$Cor\{\widehat{F_{II}}, F_{II}\} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (F_{IIj} - \mu_{ref}) (F_{IIj} - \mu_{ref})^T \quad (5)$$

или в численном виде для конкретного случая:

$$Cor\{\widehat{F_I}, F_{II}\} = \frac{1}{32} \sum_{j=1}^{32} (F_{Ij} - m_I) (F_{IIj} - \mu_{ref})^T \quad (6)$$

Таблица 1. Файлы данных F_{ref} , F_I , F_{II} , и оценки μ_{ref} , m_I , m_{II}

F_{ref} Белгородская область	Отопительный период 2017г	Отопительный период 2018г	Мат.ожидание	Дисперсия
1	0,054795	0,056307	=(0,054795+0,056307)/2=0,055551	1,14307E-06
2	0,1007009	0,119593	=(0,1007009+0,119593)/2=0,11014695	0,000178456
3	0,027046	0,020333	=(0,027056+0,020333)/2=0,0236895	2,25322E-05
4	0,085844	0,075842	=(0,085844+0,075842)/2=0,080843	5,002E-05
5	0,086872	0,095901	=(0,086872+0,095901)/2=0,0913865	4,07614E-05
6	0,08222	0,088849	=(0,08222+0,088849)/2=0,0855345	2,19718E-05
7	0,028725	0,034124	=(0,028725+0,034124)/2=0,0314245	1,45746E-05
8	0,092059	0,085326	=(0,092059+0,085326)/2=0,0886925	2,26666E-05
9	0,075701	0,082289	=(0,075701+0,082289)/2=0,078995	2,17009E-05
10	0,06142	0,069992	=(0,06142+0,069992)/2=0,065706	3,67396E-05
11	0,058788	0,057603	=(0,058788+0,057603)/2=0,0581955	7,02113E-07
12	0,042809	0,045019	=(0,042809+0,045019)/2=0,043914	2,44205E-06
13	0,030633	0,041742	=(0,030633+0,041742)/2=0,0361875	6,17049E-05
14	0,083846	0,092483	=(0,083846+0,092483)/2=0,0881645	3,72989E-05
15	0,07503	0,078339	=(0,07503+0,078339)/2=0,0766845	5,47474E-06
16	0,069607	0,082694	=(0,069607+0,082694)/2=0,0761505	8,56348E-05
F_I Брянская область	Отопительный период 2017г	Отопительный период 2018г	Матожидание	Дисперсия
1	0,055429	0,057063	=(0,055429+0,057063)/2=0,056246	1,33498E-06
2	0,103406	0,119162	=(0,103406+0,119162)/2=0,111284	0,000124126
3	0,026727	0,019974	=(0,026727+0,019974)/2=0,0233505	2,28015E-05
4	0,084932	0,074954	=(0,084932+0,074954)/2=0,079943	4,97802E-05
5	0,087743	0,096616	=(0,087743+0,096616)/2=0,0921795	3,93651E-05
6	0,082138	0,089154	=(0,082138+0,089154)/2=0,085646	2,46121E-05
7	0,027286	0,032689	=(0,027286+0,032689)/2=0,0299875	1,45962E-05
8	0,092541	0,085925	=(0,092541+0,085925)/2=0,089233	2,18857E-05
9	0,07511	0,083845	=(0,07511+0,083845)/2=0,0794775	3,81501E-05
10	0,061406	0,070497	=(0,061406+0,070497)/2=0,0659515	4,13231E-05
11	0,058172	0,056867	=(0,058172+0,056867)/2=0,0575195	8,51513E-07
12	0,042056	0,044393	=(0,042056+0,044393)/2=0,0432245	2,73078E-06
13	0,029368	0,040346	=(0,029368+0,040346)/2=0,034857	6,02582E-05
14	0,081898	0,090963	=(0,081898+0,090963)/2=0,0864305	4,10871E-05
15	0,075152	0,078495	=(0,075152+0,078495)/2=0,0768235	5,58782E-06
16	0,068679	0,082147	=(0,068679+0,082147)/2=0,075413	9,06935E-05

Продолжение Таблицы 1.

№	Ф _{II} Иркутская область	Отопительный период 2017г	Отопительный период 2018г	Матожидание	Дисперсия
1		0,030678	0,031442	=(0,030678+0,031442)/2=0,03106	2,91848E-07
2		0,050855	0,057823	=(0,050855+0,057823)/2=0,054339	2,42765E-05
3		0,021617	0,015627	=(0,021617+0,015627)/2=0,018622	1,794E-05
4		0,049684	0,043927	=(0,049684+0,043927)/2=0,0468055	1,65715E-05
5		0,047903	0,052825	=(0,047903+0,052825)/2=0,050364	1,2113E-05
6		0,041551	0,043917	=(0,041551+0,043917)/2=0,042734	2,79898E-06
7		0,027616	0,033812	=(0,027616+0,033812)/2=0,030714	1,91952E-05
8		0,047903	0,044219	=(0,047903+0,044219)/2=0,046061	6,78593E-06
9		0,050855	0,057195	=(0,050855+0,057195)/2=0,054025	2,00978E-05
10		0,040663	0,04586	=(0,040663+0,04586)/2=0,0432615	1,35044E-05
11		0,040663	0,040073	=(0,040663+0,040073)/2=0,040368	1,7405E-07
12		0,030678	0,032185	=(0,030678+0,032185)/2=0,0314315	1,13552E-06
13		0,021617	0,030511	=(0,021617+0,030511)/2=0,026064	3,95516E-05
14		0,05007	0,05481	=(0,05007+0,05481)/2=0,05244	1,12338E-05
15		0,047903	0,049827	=(0,047903+0,049827)/2=0,048865	1,85089E-06
16		0,043988	0,052496	=(0,043988+0,052496)/2=0,048242	3,6193E-05

Из анализа выражения (3) следует важное и полезное для организации вычислительной процедуры замечание:

Из выражения (3) также видно, что в расчетную формулу (3) для оптимальной оценки m_{oi} входит компонента $(m_{II} - \mu_{ref})$, отражающая вклад от файла низкоточных данных МИД2 с весовым коэффициентом $Cor\{F_{Ii}, F_{II}\}Cor^{-1}\{F_{II}, F_{II}\}$.

Указанный весовой коэффициент численно отражает корреляционную связь соответствующих массивов данных и определяет "гибкость" зависимости искомой оценки m_o по отношению к низкоточным данным.

Рассчитываемые компоненты выражения (3) для искомой оптимальной оценки m_o представлены в табл.2.

Таблица 2. Компоненты выражения для оптимальной оценки m_o

N	$(m_{II} - \mu_{ref})$	$Cor\{F_{Ii}, F_{II}\}Cor^{-1}\{F_{II}, F_{II}\}(m_{II} - \mu_{ref})$	$-(m_{II} - m_{oi})\%$
1	-0,02449	-0,002537	0,2537
2	-0,05581	-0,014	1,4
3	-0,00507	0,01	-1
4	-0,03404	-0,009034	0,9034
5	-0,04102	-0,001664	0,1664
6	-0,0428	-0,003005	0,3005
7	-0,00071	-0,017	1,7
8	-0,04263	0,013	-1,3
9	-0,02497	0,004097	-0,4097
10	-0,02244	0,031	-3,1
11	-0,01783	0,0008469	-0,08469
12	-0,01248	-0,001652	0,1652
13	-0,01012	-0,0005015	0,05015
14	-0,03572	-0,003903	0,3903
15	-0,02782	-0,001153	0,1153
16	-0,02791	-0,025	2,5

Таким образом, установлено важное свойство формулы (3) для расчета искомой смешанной оценки m_o , а именно - использование корреляционных матриц по соответствующим массивом данных в расчетном выражении (3) придает оптимальной оценке свойство

нечувствительности к грубым отклонениям в массивах совместно обрабатываемых разноточных данных.

Как это видно из табл.2, различие между компонентами оптимальной (компонитной) оценки m_o и оценки m_i весьма незначительно (ошибка

МАРЕ=0,12%). Это свидетельствует о том, что участие в расчете, как это было ранее установлено, низкоточного по отношению к анализу процессов в Белгородской области массива данных F_{II} , полученного по Иркутской области, не смогло "испортить" оценку, рассчитанную по заведомо приемлемым по точностным характеристикам данным из массивов F_{ref} (Белгородская область), F_I (Брянская область). Данный эффект явился следствием привнесенного в вычислительную процедуру "гибкого регулирования" за счет

веса коэффициента $Cor\{F_{II}, F_{II}\}Cor^{-1}\{F_{II}, F_{II}\}$.

Таким образом, эффективность использования КМП-моделей и соответствующего разработанного алгоритма для обработки разноточных массивов данных проверена и подтверждена на примере расчета статистических оценок прогноза применительно к трем различающимся по условиям российским регионам (Белгородская, Брянская и Иркутская области). Результаты контрольных расчетов показали, что предложенная вычислительная процедура композитной оценки прогноза по КМП-модели позволяет эффективно отфильтровать низкоточные массивы данных в процессе совместной обработки.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных исследований показано, что точность искомым оценок прогнозных значений цены электроэнергии может быть повышена за счет привлечения дополнительной информации, получаемой в процессе тестирования модели на прогнозируемом периоде с учетом корреляционной связи соответствующих разноточных массивов данных. Определены условия расширения возможности использования ранее построенной модели прогноза по данным одного региона на применимость к другим регионам на основании результатов корреляционного анализа соответствующих временных рядов.

2. Разработанный метод обработки разноточных данных, названный Методом Совместных Оценок, основан на комбинированном использовании соответствующих расчетных оценок и позволяет определять оптимальную, в смысле точностных свойств, оценку. Предложенное использование корреляционных матриц для соответствующих

массивов данных в расчетном выражении придает оптимальной оценке свойство нечувствительности к грубым отклонениям в данных.

3. В случае применения в качестве меры точности оценки ее дисперсии показано, что выигрыш в точности при переходе к оптимальной смешанной оценке непосредственно связан со значением коэффициента множественной корреляции массивов данных.

4. Результаты контрольных расчетов показали, что предложенная вычислительная процедура получения композитной оценки прогноза по КМП-модели позволяет эффективно отфильтровать низкоточные массивы данных в процессе их совместной обработки за счет привнесенного "гибкого регулирования" посредством участвующих в расчетах корреляционных матриц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чэнь М., Цинь К., Ку Х.-М., Мишра П.** Валидация на системном уровне. Перевод с англ. под ред. А.Н. Ланцева. М: Техносфера, 2014. – 296 с.
2. **Пугачев В.Н.** Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. - М.: Сов.радио, 1973. - 256 с.
3. **Дробыш И.И.** Статистические модели прогнозирования цен на оптовых рынках электроэнергии: российский и зарубежный опыт // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2017. Т. 11, №3. С. 41–54.
4. **Горяинова Е. Р., Панков А. Р., Платонов Е. Н.** Прикладные методы анализа статистических данных // Издательский дом Высшей школы экономики. Москва, 2012. 310 с.
5. **Дуброва Т. А.** Статистические методы прогнозирования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 206 с.
6. **García-Martos C., Rodríguez J., Sánchez M.** Modelling and Forecasting Fossil Fuels, CO2 and Electricity Prices and their Volatilities // Applied Energy. 2013. Vol. 101. P. 363–375.
7. **Kim B., Zhang Y., Schaar M., Lee J.** Dynamic pricing and energy consumption scheduling with reinforcement learning // IEEE Transactions on smart grid. 2016. Vol. 7. No.5. P. 2187–2198.
8. **Anna Shikhina, Alexei Kochengin, George Chrysostomou, Vladimir Shikhin.** Investigation of autoregressive forecasting models for market electricity price // 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Page(s): 570 - 575

Л.В. Алексейчик, А.А. Курушин

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

РЕШЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ САПР СВЧ

АННОТАЦИЯ

Современный подход к овладению цифровыми технологиями автоматического проектирования при подготовке специалистов инженерной практики требует комплексное применение отдельных программных продуктов, совместимых между собой. Широкие возможности решения такой проблемы предоставляет пакет программ CST SUITE. В статье рассматривается решение электродинамических задач с мультифизическим содержанием, на основе численных методов расчета, способствующих овладению студентами (слушателями) современных средств САПР СВЧ. На примере нескольких задач моделирования высокочастотных диэлектрических резонаторов и устройств на их основе, демонстрируется решение мультифизических задач проектирования. Эффективность применения САПР приводит к достижению необходимого темпа разработки устройств СВЧ, предназначенных для радиоканалов систем 5G-6G.

Ключевые слова — САПР СВЧ, диэлектрические резонаторы, антенные системы, транзисторные усилители, фильтры СВЧ, программа CST SUITE

1. ЧИСЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Современное представление характеристик устройств СВЧ нацелено на то, чтобы с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) получать в требуемых формах результаты численных решений комплексных мультифизических задач, появляющиеся в области средств передачи информации и энергии, медицины, экологии, и в других областях.

В конце 20 века исследователь «увидел» электромагнитные поля «во всей красе». И этот факт внес значительное изменение и толчок в исследования открытых радиосистем и приборов. Теперь исследователь может «увидеть» и проанализировать процесс распространения электромагнитного поля и взаимодействия его со структурой и объектами.

В качестве объекта исследований были выбраны микроволновые диэлектрические резонаторы (ДР), применение которых в СВЧ технике получило широкое распространение в настоящее время.

Возможности применения ДР в качестве антенных элементов рассматривались ещё в первых работах при исследовании собственных типов электромагнитных колебаний диэлектрических объектов с высокой диэлектрической проницаемостью, обладающих внутренними и внешними электромагнитными полями, энергия которых способна накапливаться внутри и излучаться в окружающее свобод-

ное пространство [1-5]. Одни из первых реализаций волноводных и полосковых конструкций антенн на ДР приведены в работах [6-10].

В конструкциях СВЧ устройств на ДР требовались меры по устранению излучения с помощью экранов, которыми могли служить металлические стенки линий передачи или специальные экранирующие устройства [5]. Современные разработки антенн на ДР обладают достоинствами по малым размерам и высокой эффективности применения [9-12]. С развитием мобильной и космической связи антенны и антенные решетки на ДР получили приоритет в качестве антенн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн [11-13]. Создание излучающих объемных интегральных структур (ОИС) на ДР с внедренными активными элементами становится важным шагом при освоении диапазонов 5G-6G. Современные САПР позволяют моделировать и оптимизировать структуры таких ОИС. При этом в процессе обучения остается важным исследование физических процессов дифракции высокочастотных ДР при возбуждении их сторонними источниками, что открывает новые возможности для совершенствования СВЧ устройств на основе ДР. В качестве примера моделирования рассмотрим случай падения плоской волны на ДР [14].

Целью моделирования явилось получение характеристик процесса дифракции плоской электромагнитной волны при возбуждении вынужденных колебаний ДР на низшем магнитном типе колебания, а также уточнение структуры электромагнитного поля внутри и в окрестности ДР и его характеристик как излучающего антенного элемента для использованием полученных данных при проектировании антенной решетки. Задача исследования характеристик ДР решается для использования полученных данных при проектировании антенной решетки, в которой ДР используются как излучающий элемент.

На рис. 1 представлено относительное положение дискового ДР и фронта (порта) плоской электромагнитной волны.

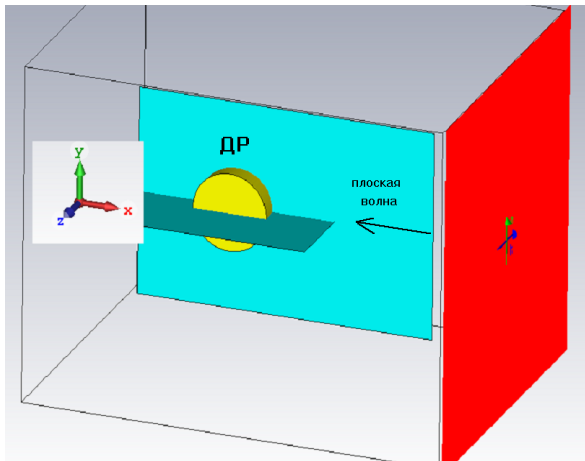


Рис. 1. Ориентация дискового ДР в системе координат относительно порта плоской падающей волны

В результате численного моделирования данной задачи с помощью программы CST Microwave Studio получены картины распределения модуля векторов результирующего поля дифракции плоской электромагнитной волны на ДР (рис. 2) и его частотные характеристики в L -диапазоне длин волн.

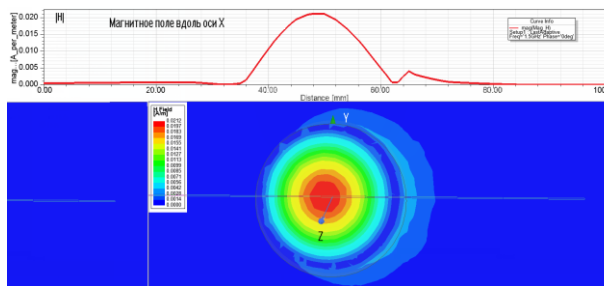


Рис. 2. Результирующее магнитное поле ДР и плоской волны

Имеет место возбуждение низшего магнитного типа колебаний ДР и излучение электромагнитной энергии ДР в свободное пространство. По кривой АЧХ ДР и скорости затухания процесса возбуждения ДР получены значения резонансной частоты рабочего типа колебаний (рис. 3) и нагруженной добротности, практически равной добротности связи ДР со свободным пространством (рис. 4).



Рис. 3. Зависимость резонансной частоты ДР от диэлектрической проницаемости

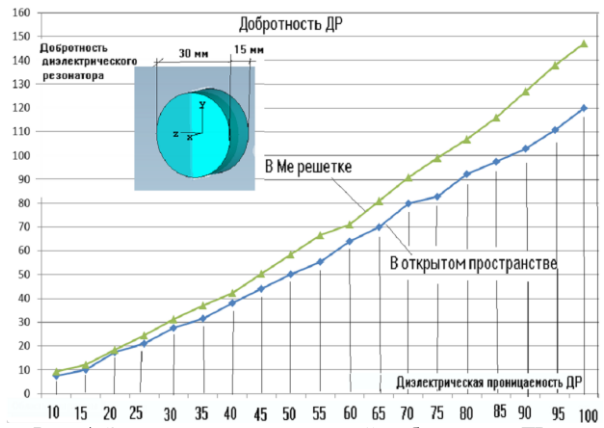


Рис. 4. Зависимость нагруженной добротности ДР от диэлектрической проницаемости

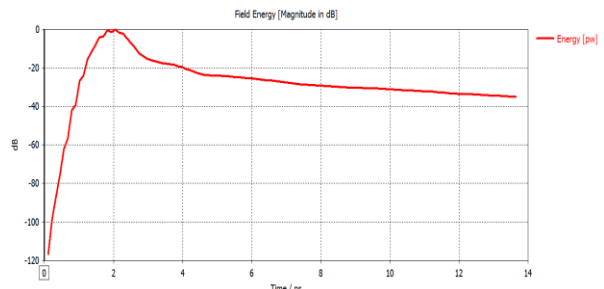


Рис. 5. Переходной процесс изменения энергии в ДР

Из данных кривой рис. 5. следует, что примерно от 4 до 12 нс (за $t = 8,0$ нс) энергия электромагнитного поля уменьшается на 14,17 дБ, что соответствует отношению запасенной мощности поля P_o в системе с ДР к мощности суммарных потерь P_m в 26,12 раз; т.е. $\exp(2t/\tau) = \ln(P_m) = 3,2627$, откуда следует, что постоянная времени переходного процесса τ равна 4,9 нс. Примем, что постоянная времени ДР на рабочем типе колебания аналогична постоянной времени резонансного контура и равна $\tau = Q_u/\pi f_0$, где f_0 - резонансная частота в ГГц. При резонансной частоте ДР $f_0 = 2,1155$ ГГц получим значение $Q_u = 32,6$. В результате численного моделирования задачи выявлены особенности распределения электрического и магнитного полей ДР в свободном пространстве при возбуждении в нём низшего магнитного типа колебаний подобному $H_{01\delta}$. Обнаружены эффекты "выпучивания" электрического поля ДР за его боковую цилиндрическую поверхность и "области минимума" магнитного поля внутри ДР, примыкающей к его цилиндрической поверхности. Результирующее электромагнитное поле ДР и падающей плоской волны в окрестности ДР преимущественно определяется структурой собственного типа колебания ДР. при этом оптимальные радиационные характеристики ДР обеспечиваются в пределах величин диэлектрической проницаемости материала от 5 до 25 при условии обеспечения требуемой интенсивности возбуждения ДР на рабочем типе колебаний. Расчетные значения резонансной частоты и добротности ДР со свободным пространством согласуются с известными данными, полученными из строгого

решения дисперсионных уравнений для диэлектрического шара.

2. ВНЕДРЕНИЕ ДР В УСТРОЙСТВАХ СВЧ

Современный комплекс CST SUITE включает программу CST Design Studio, которая объединяет решения отдельных задач, получаемые разными методами, например электродинамическими методами теории поля и методом теории цепей.

Комплекс CST SUITE позволяет решать как простейшие физические задачи, так и сложнейшие научные проблемы. Согласованно работая с MatLab, она внедряет и показывает мультифизические возможности при решении разнообразных задач, включая задачи медицины и задачи распространения поля в сложных анизотропных средах.

В конструкциях СВЧ устройств на ДР применяются меры по устранению излучения с помощью экранов, которыми могли служить металлические стенки линий передачи или специальные экранирующие устройства. Так для звена режекторного фильтра использована высокочастотная осесимметричная структура показанная на рис. 6.

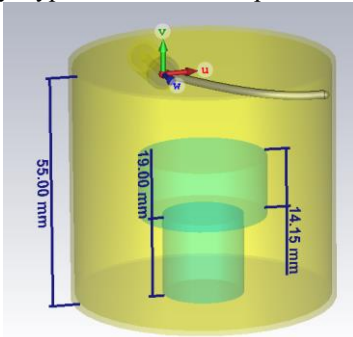


Рис. 6. Дисковый ДР на подставке, установленный в цилиндрическом экране и возбуждаемый полупетлей связи

Создание гибридных СВЧ интегральных схем подразумевает объединение в одной конструкции частей, которые рассчитываются разными методами. В рассматриваемом случае это – согласующая структура транзисторного СВЧ усилителя (ТУ), охваченная корпусом и дискретные активные элементы – транзисторы. На рис. 7 показан цикл проектирования, в котором учитывается электромагнитные поля, излучаемые в пространство ОИС.

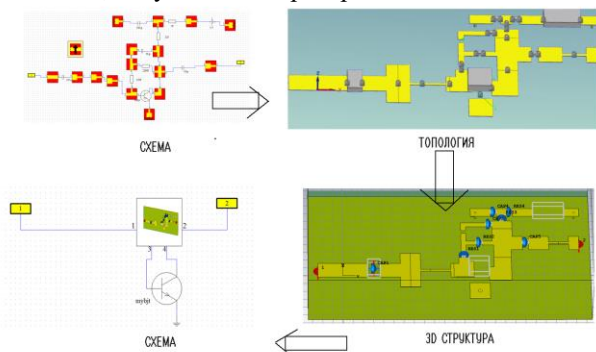


Рис.7. Цикл преобразование СВЧ структуры для включения в нее нелинейного элемента диапазонов 5G-6G

Отметим, что точность численного расчета совпадает с точностью эксперимента, а может даже «превосходить» их (имеется в виду, что в численном эксперименте можно строго учесть мультифизические характеристики, в условиях при которых выполняется реальная работа проектируемого прибора).

Из рис. 8 видим, что характеристики коэффициента передачи ТУ СВЧ, рассчитанные в виде схемы, отличаются от характеристики коэффициента пере-

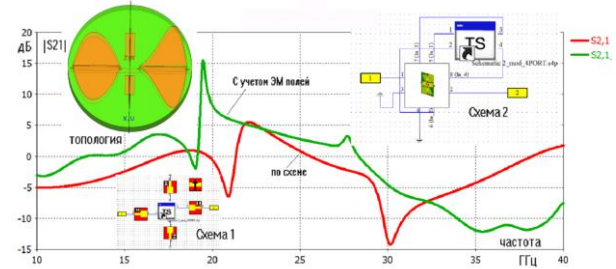


Рис. 8. Частотные характеристики коэффициента передачи $|S_{21}|$

Это объясняется тем, что учет ЭМ полей добавляет в точность расчета обратные связи, неизбежно существующие между выходными и входными согласующими структурами ТУ СВЧ. Комбинированный мультифизический расчет позволяет рассчитать шумовые и нелинейные характеристики ТУ СВЧ с учетом полей. Комбинационные результаты расчета, в виде диаграммы направленности усилителя, выполняющего функции излучателя, показывается на рис.9.

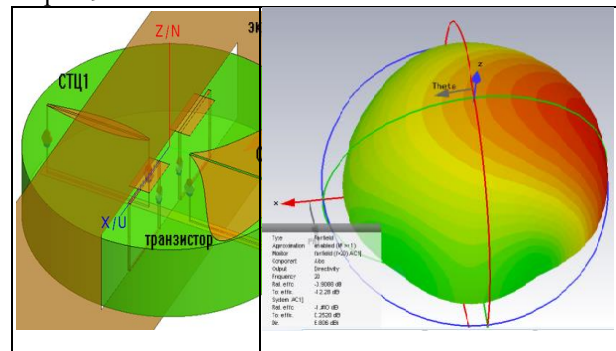


Рис. 9. Структура транзисторного СВЧ усилителя, внедренного в ДР и его диаграмма направленности

Диаграмма направленности (ДН), полученная на рис. 9, рассчитывается как интеграл от излучения всех токнесущих площадок, с учетом того, что токи на выходе транзистора больше. Поэтому ДН имеет искривление по оси x. Используя четырехпортовое представление транзистора, можно выполнить учет обратной связи, включенной в виде сложной согласующей структуры [16]. Расчеты и оптимизация ТУ СВЧ показывают, что включение СВЧ транзистора по схемам ОЭ, ОК, ОБ, которые имеют особенности в диапазоне низких и ВЧ частот – в СВЧ диапазоне теряет этот смысл. Нужно добавить, что сам СВЧ транзистор обычно представляет собой чип и является интегральной СВЧ структурой, состоящих из многих транзисторов.

Учет электромагнитного поля значительно изменяет ситуацию для получения точных характеристик транзисторного СВЧ усилителя, внедренного в ДР. Так ЭМ поля могут привести к генерации усилителя, если поля, излучаемые на выходе возбуждают вход активного прибора. Транзистор на рис. 9 включен в виде четырехпортовой схемы, причем если эмиттерные выводы накоротко присоединены к земле, обратная связь по цепи эмиттерных линий исчезает. Остается только обратная связь по «воздуху». Сравнение расчетных характеристик на рис. 8 показывает изменение частотной характеристики при учете электродинамических свойств структуры. Из рис. 8 видно, что влияние электродинамической связи между входной и выходной согласующей структуры проявляется не только уменьшением усиления, но и появлением точки запираания, объясняющегося резонансными свойствами электродинамической структуры. Электродинамический подход позволяет выполнить и оптимизировать СВЧ усилитель с произвольной формой согласующих структур. Каждый из элементов, включая формы, накладываемые друг на друга, а также с произвольной конфигурацией, можно параметризовать, что приводит к согласующей структуре сложной, непредсказуемой формы. Моделирование транзисторного СВЧ усилителя электродинамическим методом позволяет оценить также усилитель как активную антенну. Из рис. 9 очевидно, как все токонесущие согласующие структуры вносят свой вклад в излучение в дальнюю зону. КПД и потери также становятся характеристикой, влияющей на устойчивость ТУ СВЧ и величину усиление.

3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДР МЕТОДОМ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ

В технике СВЧ находят применение сверхвысокодобротные дисковые диэлектрические резонаторы (ДРшг) с азимутальными колебаниями (резонаторы с модами "шепчущей галереи"). В диапазоне миллиметровых и сантиметровых волн их используют в СВЧ генераторах с низким уровнем фазового шума, в частотных дискриминаторах, для высокоточных измерений диэлектрической проницаемости и угла потерь материалов. Более высокие добротности дисковых ДР удается получить при использовании для их изготовления одноосных кристаллов (лейкосапфир, кристаллический кварц). В предварительных исследованиях ДР с азимутальными колебаниями на основе двух соосно расположенных дисков отмечался эффект повышения добротности относительно добротности одиночных ДР. Оценка достижимых величин добротности пластинчатых ДР из кристаллических материалов является актуальной задачей.

Рассмотрим возможность повышения добротности резонатора с азимутальными колебаниями из лейкосапфира и кристаллического кварца в СВЧ диапазоне. Для этого проведено исследование основных мод $HE_{n,1,1}$ пластинчатых резонаторов из лейкосапфира и кристаллического кварца. Получе-

ны зависимости резонансных частот, концентрации электромагнитной энергии во внешней среде (отношение энергии, запасенной во внешней среде, к энергии, запасенной резонатором) от величины зазора между дисками. Показано, что повышение добротности пластинчатых ДР относительно добротности одиночных ДР может составлять 15-20 %.

Эти результаты можно использовать при разработке ряда устройств СВЧ диапазона на основе пластинчатых ДР с азимутальными колебаниями [15].

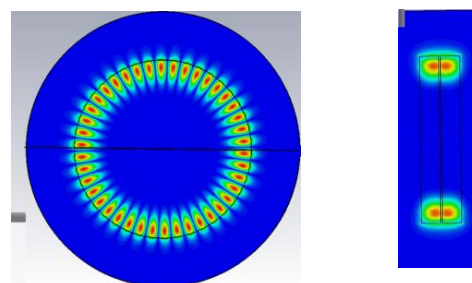


Рис. 10. Распределение полей $HE_{21,1,1}$ колебания ДР на частоте 33451 МГц при зазоре между ДР $\Delta = 0,3$ мм

Исследования проведены для пластинчатого ДР на основе двух соосно расположенных диэлектрических дисков из лейкосапфира и кристаллического кварца, рис. 10. Ось анизотропии ориентирована в направлении геометрической оси z ДР. В расчетах использованы следующие диэлектрические параметры: $\epsilon_{\parallel} = 11,577$; $\epsilon_{\perp} = 9,388$ (лейкосапфир); $\epsilon_{\parallel} = 4,636$; $\epsilon_{\perp} = 4,429$ (кристаллический кварц). В резонаторах из лейкосапфира рассмотрены типы колебаний $HE_{12,1,1}$; $HE_{13,1,1}$ (с четным распределением поля E_z относительно плоскости симметрии резонатора). Колебания $HE_{n,1,1}$ – гибридные, преобладающей компонентой поля вдоль оси z является E_z . Именно на этих колебаниях проявляется эффект повышения добротности [2]. В миллиметровом диапазоне добротность резонаторов из лейкосапфира составляет около $5 \cdot 10^4$. Степень относительной локализации энергии во внешней среде пластинчатых ДР из лейкосапфира, кристаллического кварца может значительно превосходить данный показатель для одиночных ДР.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЗВЕННОГО ФИЛЬТРА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ

Проектирование полосно-пропускающего фильтра X-диапазона длин волн на заданные частотные характеристики было проведено базовым методом конечных элементов – с разбиения задачи на дискретные пространственные элементы. Перспективным является создание программы из алгоритмов коммерческих программ на основе объективно-ориентированных подходов к созданию новых алгоритмов управления потоком данных.

На рис.11 показана конструкция 5-звенного ППФ, содержащего штыри возбуждения (порты) и

ДР, установленные в отрезке запредельного волновода.

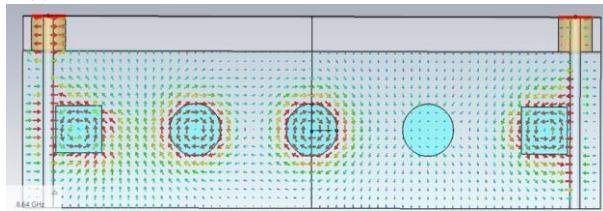


Рис. 11. Структура каскадного фильтра на ДР и распределение поля E в сечении фильтра

Алгоритм проектирования 5-звенного фильтра на ДР состоит из следующих этапов:

1. Установка требуемой величины связи ДР 1 с портом 1 (для увеличения связи уменьшить зазор между ними, рис. 12)

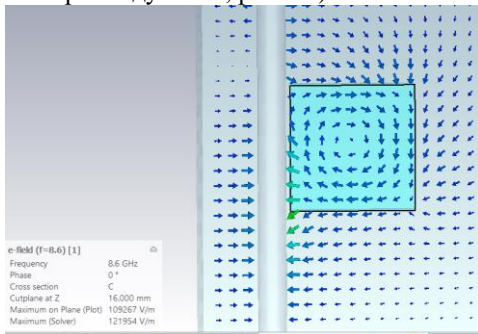


Рис. 12. Связь между портом и первым ДР1 фильтра

2. Ввод второго ДР2 при отсутствии ДР1 (вакуум) с настройкой резонансной частоты на частоту ДР1 изменением толщины ДР2.
3. Ввод третьего ДР3 при отсутствии ДР1 и ДР2 (вакуум) с настройкой резонансной частоты на частоту ДР1 изменением толщины ДР3, так чтобы собственные резонансные частоты ДР были равными.

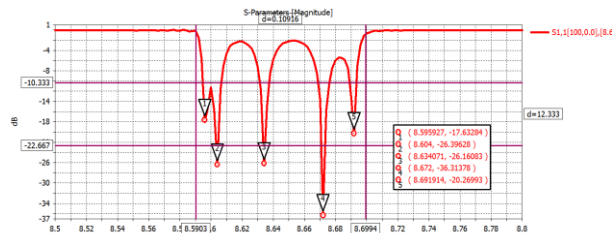


Рис. 12. Частотная характеристика 5-звенного фильтра на ДР

4. Создание симметричной структуры 5-звенного фильтра изотодом "зеркала" (разрезая ДР3 пополам, и используя зеркальное отражение половины фильтра)..
5. Оптимизируем окончательную структуру фильтра, изменяя расстояния между ДР1, ДР2 и ДР3.

Частотная характеристика 5-ти звенного фильтра на ДГ после оптимизации, показана на рис. 12.

5. КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ CST SUITE

В последние годы приобрели развитие программы, которые можно считать банком данных, хранящим информацию, полученную на протяжении большого количества расчетов, анализов, экспериментов. Типичной программой является Antenna Magus – часть комплекса CST SUITE, которую можно считать энциклопедией СВЧ структур. Она выполняет синтез (от характеристик к геометрии) нескольких сотен разнообразных антенных и СВЧ систем. Решение выполняется на основе банка данных научных и технических результатов и дальнейшей интерполяции и экстраполяции данных. Разработаны и апробированы на протяжении десятилетий программы типа «Электронная диаграмма Смита», многочисленные программы анализа систем, включая линейные, нелинейные характеристики, а также цифровые характеристики, использующие матричный аппарат расчета и методы теории цепей.

Применение приближенных, асимптотических методов, (геометрическая оптика, методы дифракции) а также управление точностью расчета (сеткой разбиения) важно для ускорения процесса решения задач во время обучения.

Такая синхронность решения задачи и работы персонального компьютера нужна и в научной работе. Пользователь видит результаты расчеты вне зависимости от мощности компьютера. Основным методом для решения сложных радиотехнических задач является метод декомпозиции общей задачи на отдельные.

При декомпозиции часть компонентов считаются, используя матричный анализ, метод гармонического баланса, а электродинамическая структура считается, используя методы теории поля (рис. 13).

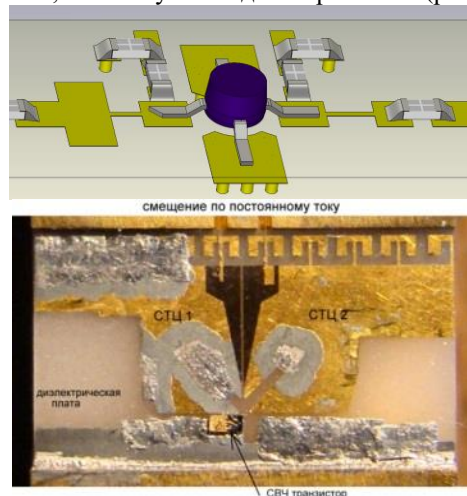


Рис. 13. Модель и конструкция транзисторного СВЧ усилителя

Поскольку методы теории цепей, которые используются в СВЧ технике, не дают необходимых по точности результатов, то применяются комбинированные методы мультифизического анализа. Последние версии систем САПР позволяют выполнить

моделирование и оптимизировать характеристики оптических усилителей, усилительных твердотельных и вакуумных приборов, ЛБВ и магнетронов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследований сложных СВЧ структур на ДР, с использованием современных САПР, связанных с информатизацией современного образования, можно прийти к таким выводам, что сложные открытые резонансные системы, как диэлектрические резонаторы и системы на них поддаются анализу и исследованию процессов на них, используя среду CST SUITE.

Предложенный цикл проектирования, включающий трансформацию схемы в топологию, и затем в 3D структуру, позволяет выполнить гибридное моделирование и косимуляцию ЭД структуры с включением активных элементов. Это дает возможность создания радиоканалов антенной решетки для систем 5G-6G.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Richtmyer, R. D.** Dielectric resonators, *J. App. Phy.*, Vol. 10, 391-398, Jun. 1939.
2. **Диэлектрические резонаторы.** Под ред. М.Е. Ильченко М., «Радио и связь», 1989, 328 с.
3. **Численные методы теории дифракции.** Под ред. В.А.Боровикова. М. . «МИР», 1982, 200 с.
4. **Загер О., Тиси Ф.** О собственных и вынужденных модах диэлектрической сферы. _ ТИИЭР, 1968, том 66, № 9, с. 203.
5. **Алексейчик Л.В., Бродуленко И.И., Гаврилюк Н.Г.** и др. Параметры и методы расчета диэлектрических резонаторов и генераторов и фильтров на их основе. М.: Центральный исследовательский институт «Электроника», Изд-во ЭТ. Серия 1. Электроника СВЧ, 1990. 64 с.
6. **Алексейчик Л.В., Геворкян В.М, Калугин Е.И.** Исследование миниатюрных диэлектрических СВЧ резонаторов в качестве антенных СВЧ элементов, - Труды МЭИ, 1981, выпуск 528, с. 31-40.
7. **Long, S. A., M. W. McAllister, L. C. Shen.** The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 31, No. 3, 406 - 412, May 1983
8. **Безбородов Ю.М., Массалитин С.Ф.** Антенные устройства на диэлектрических резонаторах. Радиотехника, 1986, № 8, с. 85-88.
9. **К. М. Luk, K. W. Leung.** *Dielectric Resonant Antenna*, Research Studies Press, 2003.
10. **Coulibaly, Y., T. A. Denidni, H. Boutayeb.** Broadband microstrip-fed dielectric resonator antenna for X-band applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 7, 341, 345, 2008.
11. **Dipali Soren, Rowdra Ghatak, Rabindra K. Mishra 3, Dipak R. Poddar.** Dielectric Resonator Antennas: Designs and Advances. Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 60, 195-213, 2014.
12. **K. W. Leung.** State Key Laboratory of Millimeter Waves & Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong Presented to the IEEE LI Section Antenna and Propagation Society on Monday October 8th 2012.
13. **L.Keyrouz, D. Caratelli.** Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2016, Article ID 6075680, 20 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6075680>
14. **Алексейчик Л.В., Курушин А.А.** Моделирование возбуждения диэлектрического резонатора полем плоской электромагнитной волны. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.1>
15. **Взятыхшев В.Ф., Добромислов В.С., Бере-за А.Е.** Диэлектрический резонатор для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов на СВЧ. А.с. № 1107072. Оpubл. Б.И. № 29, 1984.
16. **Алексейчик Л.В., Курушин А.А.** Комплексное моделирование в программе CST SUITE. 2022, Солон-Пресс, 276 стр.

Э.И. Манчев¹, Т.Н. Комиссарова¹, В.Е. Хроматов¹

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва (1)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОГИХ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

АННОТАЦИЯ

В работе составлено уравнение собственных колебаний пологой ортотропной оболочки в поперечном магнитном поле. Было получено выражение для нахождения собственных частот шарнирно опертой оболочки. Получены численные значения, и проведено сравнение собственных частот колебаний при наличии поперечного магнитного поля и его отсутствии.

Ключевые слова – пологая ортотропная оболочка, собственные частоты, поперечное магнитное поле, численные результаты

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное проектирование приборов и аппаратуры в области радиоэлектроники, электротехники и энергетического машиностроения включает в себя проектирование конструкций, элементами которых являются пластины и оболочки. На спектры колебаний пластин и оболочек существенное влияние может оказать поперечное магнитное поле.

Целью данной работы является расчет спектров частот колебаний ортотропных ферромагнитных оболочек, исследование влияния поперечного магнитного поля на собственные частоты и на их распределение. Для расчета применяется асимптотический метод В.В. Болотина, математическое обеспечение MATLAB и Mathcad. Полученные программы позволяют быстро получить численные решения трансцендентных уравнений благодаря своей простоте и универсальности.

2. СПЕКТР СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОГИХ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК

2.1. Применение асимптотического метода В.В. Болотина

Рассмотрим свободные колебания пологой прямоугольной в плане ортотропной оболочки в поперечном магнитном поле. Пусть оси упругости совпадают с главными линиями кривизны. Введем в срединной поверхности оболочки криволинейные координаты x_1, x_2 , совпадающие с линиями кривизны. Будем рассматривать такие формы колебаний, для которых тангенциальными силами инерции можно пренебречь, и для форм колебаний ортотропной оболочки имеют место уравнения типа В.З. Власова. Колебания будем рассматривать в поперечном магнитном поле.

$$\nabla_D^4 w - \nabla_K \Psi + 2\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + N \Delta w - C \frac{\partial \Delta w}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla_B^4 \Psi + \nabla_K w = 0$$

Операторы $\nabla_D^4, \nabla_B^4, \nabla_K$ имеют вид

$$\nabla_D^4 = D_{11} \frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2D_{12} \frac{\partial^4}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_{22} \frac{\partial^4}{\partial x_2^4}$$

$$\nabla_B^4 = B_{22} \frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2B_{12} \frac{\partial^4}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + B_{11} \frac{\partial^4}{\partial x_2^4}$$

$$\nabla_K = \frac{1}{R_2} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{1}{R_1} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}$$

Здесь w, Ψ – формы нормального прогиба и функции усилий в срединной поверхности оболочки, соответствующие собственной частоте ω , ρh есть поверхностная плотность оболочки, R_1, R_2 – главные радиусы кривизны, которые в среднем полагаем постоянными по всей срединной поверхности оболочки, B_3 – нормальная составляющая вектора магнитной индукции в вакууме, Δ – оператор Лапласа, h – толщина оболочки, D_{11}, D_{12}, D_{22} – элементы матрицы цилиндрических жесткостей:

$$D_{11} = \frac{E_1 h^3}{12(1 - \nu_1 \nu_2)}; D_{22} = \frac{E_2 h^3}{12(1 - \nu_1 \nu_2)};$$

$$D_{12} = 2 \frac{G h^3}{12} + \nu_1 D_{22};$$

B_{11}, B_{12}, B_{22} – элементы податливостей при безмоментной деформации:

$$B_{11} = \frac{1}{E_1 h}; B_{22} = \frac{1}{E_2 h};$$

$$B_{12} = \frac{1}{2Gh} - \frac{\nu_1}{E_1 h} = \frac{1}{2Gh} - \frac{\nu_2}{E_2 h};$$

N, C – величины, зависящие от параметров магнитного поля:

$$N = \frac{2\chi h B_3^2}{\mu_0 \mu_r} \left(1 + \frac{\chi(\chi+2) \operatorname{sh}(kh)}{\mu_r \delta_1 kh} - \frac{\chi \operatorname{ch}(kh)}{\mu_r \delta_1} \right) \quad (5)$$

$$C = \frac{2h^3 \sigma B_3^2}{3} \left(1 + \frac{\chi}{\mu_r} + \frac{\chi}{(1 + \mu_r kh)} \right)$$

Здесь $\delta_1 = \mu_r \operatorname{sh}(kh) + \operatorname{ch}(kh)$; $k^2 = (k_1^2 + k_2^2)$, где k_1, k_2 – волновые числа.

Решение ищем в виде:

$$w(x_1, x_2, t) = u(x_1, x_2) e^{i\omega t} \quad (6)$$

С помощью асимптотического метода В.В. Болотина получаем асимптотические выражения для форм колебаний во внутренней области:

$$\begin{aligned} u(x_1, x_2) &= \sin k_1(x_1 - \xi_1) \cdot \sin k_2(x_2 - \xi_2) \\ \varphi(x_1, x_2) &= \sin k_1(x_1 - \xi_1) \cdot \sin k_2(x_2 - \xi_2) \end{aligned} \quad (7)$$

После подстановки (6) и (7) в систему уравнений (1) исходная система (1) примет вид:

$$\begin{aligned} \nabla_D^4 u - \nabla_D \varphi + N \Delta u - C \omega i \Delta u - 2\rho h \omega^2 u &= 0 \\ \nabla_B^4 \varphi + \nabla_K u &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

После подстановки получаем соотношение для частот собственных колебаний:

$$\omega = C_1 k^2 i + \sqrt{D_k - N_1 k^2 + B_k - C_2 k^4}, \quad (10)$$

Здесь $C_1 = \frac{C}{4\rho h}$; $D_k = \frac{D_{11}k_1^4 + 2D_{12}k_1^2k_2^2 + D_{22}k_2^4}{2\rho h}$;

$$N_1 = \frac{N}{2\rho h}; \quad D_k = \frac{D_{11}k_1^4 + 2D_{12}k_1^2k_2^2 + D_{22}k_2^4}{2\rho h};$$

$$C_2 = \frac{C}{16\rho^2 h^2}; \quad B_k = \frac{(k_1^2 + \chi \cdot k_2^2)^2}{B_{22}k_1^4 + 2B_{12}k_1^2k_2^2 + B_{11}k_2^4};$$

Действительная часть выражения (10) – это собственная частота упругих колебаний

$$\operatorname{Re} \omega = \sqrt{D_k - N_1 k^2 + B_k - C_2 k^4} \quad (11)$$

Мнимая часть выражения (5) – это коэффициент затухания упругих колебаний

$$\operatorname{Im} \omega = C_1 k^2 i \quad (12)$$

Известные соотношения для волновых чисел k_1 , k_2 для шарнирного закрепления справедливы и для пологих оболочек прямоугольных в плане:

$$k_1 = \frac{m_1 \cdot \pi}{a_1}; \quad k_2 = \frac{m_2 \cdot \pi}{a_2}; \quad (13)$$

2.2. Вычисление значения собственных частот

Для разных типов закрепления можно получить соответствующие трансцендентные уравнения, вид которых обуславливается условием склеивания решений на краях. Подобные системы трансцендентных уравнений легко решаются в любом математическом пакете.

Найденные значения k_1 , k_2 будем подставлять в выражение (11) и вычислим значения собственных частот для шарнирно оперной ортотропной пологой оболочки в поперечном магнитном поле при $B_3=0$ Тл и $B_3=0,5$ Тли проведем их сравнение.

С увеличением значений волновых чисел разница между значениями ω при $B_3=0$ Тл и $B_3=0,5$ уменьшается. Влияние поперечного магнитного поля на собственные колебания пологой ортотропной оболочки из ферромагнитного материала оказывается существенным лишь при низких значениях волновых чисел k_1 , k_2 .

В приведенной далее таблице указаны значения для собственных частот колебаний ортотропной пологой оболочки при наличии и отсутствии поперечного магнитного поля.

Таблица 1. Сравнение численных результатов

m_1	m_2	ω при $B_3=0$ Тл	ω при $B_3=0.5$ Тл
1	1	539.904	–
1	2	1444	1073
2	2	2159	1863
1	3	2959	2723
2	3	3661	3444
3	3	4859	4666
1	4	5081	4903
2	4	5777	5607
3	4	6958	6799
4	4	8638	8492
1	5	7811	7667
2	5	8502	8362
3	5	9672	9538
4	5	11334	11207
5	5	13497	13379

3. ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОГОЙ ОРТОТРОПНОЙ ОБОЛОЧКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

3.1. Переход к безразмерным переменным

Введем характерное волновое число k_0 и характерную частоту Ω_2

$$k_0^4 = \frac{1}{R_2^2 B_{22} \sqrt{D_{11} D_{22}}} \quad (14)$$

$$\Omega_2^2 = \frac{1}{\rho h B_{22} R_2^2} \quad (15)$$

и безразмерные переменные:

$$\xi_1 = k_0 x_1; \quad \xi_2 = k_0 x_2; \quad u = k_0 w; \quad \varphi = k_0^3 B_{22} R_2 \psi; \quad \omega = \frac{\Omega}{\Omega_2};$$

После перехода к безразмерным переменным уравнения В.З. Власова примут вид:

$$\begin{aligned} \nabla_D^4 u - \nabla_D \varphi + N \Delta u - C \omega i \Delta u - 2\rho h \omega^2 u &= 0 \\ \nabla_B^4 \varphi + \nabla_K u &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\nabla_d^4 = d_{11} \frac{\partial^4}{\partial \xi_1^4} + 2d_{12} \frac{\partial^4}{\partial \xi_1^2 \partial \xi_2^2} + d_{11}^{-1} \frac{\partial^4}{\partial \xi_2^4};$$

$$\nabla_b^4 = \frac{\partial^4}{\partial \xi_1^4} + 2b_{12} \frac{\partial^4}{\partial \xi_1^2 \partial \xi_2^2} + b_{11} \frac{\partial^4}{\partial \xi_2^4};$$

$$\nabla_\chi = \frac{\partial^2}{\partial \xi_1^2} + \chi \frac{\partial^2}{\partial \xi_2^2}; \quad \chi = \frac{R_2}{R_1};$$

$$d_{11} = \left(\frac{D_{11}}{D_{22}} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad d_{12} = \frac{D_{12}}{(D_{11} D_{22})^{\frac{1}{2}}};$$

$$b_{11} = \frac{B_{11}}{B_{22}}; \quad b_{12} = \frac{B_{12}}{B_{22}};$$

Оси x_1 , x_2 выбраны таким образом, что $|\chi| \leq 1$.

3.2. Получение выражения для асимптотической плотности

Для определения форм и частот собственных колебаний ортотропной пологой оболочки можно воспользоваться асимптотическим методом. Асимптотические выражения для форм колебаний во внутренней области и для собственных частот имеют вид

$$u = U \sin \kappa_1 (\xi_1 - \xi_1^0) \cdot \sin \kappa_2 (\xi_1 - \xi_2^0) \quad (17)$$

$$\varphi = \Phi \sin \kappa_1 (\xi_1 - \xi_1^0) \cdot \sin \kappa_2 (\xi_1 - \xi_2^0)$$

$$\omega^2 = d_\kappa - N \cdot \kappa^4 + b_\kappa - \frac{C}{8} \cdot \kappa^4 \quad (18)$$

Здесь $d_\kappa = d_{11}\kappa_1^4 + 2d_{12}\kappa_1^2\kappa_2^2 + d_{11}^{-1}\kappa_2^4$;

$$b_\kappa = \frac{(\kappa_1^2 + \chi d_{11}\kappa_2^2)^2}{\kappa_1^4 + 2b_{12}\kappa_1^2\kappa_2^2 + b_{11}\kappa_2^4}; \quad \kappa^2 = \kappa_1^2 + \kappa_2^2;$$

где κ_1, κ_2 – безразмерные волновые числа, ξ_1^0, ξ_2^0 – фазовые постоянные. Вблизи краев выражения (18) для форм колебаний должны быть скорректированы с учетом решений типа динамического краевого эффекта.

Условием представления частот и форм собственных колебаний в виде (17) и (18) является невырождение динамического краевого эффекта. Установлено, что области вырождения динамических краевых эффектов у ортотропных оболочек определяются соотношением между главными радиусами кривизны оболочки и упругими постоянными ортотропного материала. Краевой эффект у края $\xi_1 = 0$ не вырождается, если $0 \leq \chi \leq \frac{b_{11}}{b_{22}}$, $\xi_2 = 0$ при $\chi \geq \sqrt{b_{11}}$. В частности, у кругового края цилиндрической оболочки динамический краевой эффект не вырождается ни при каких волновых числах. Вне области вырождения динамического краевого эффекта соотношения для определения волновых чисел допускает асимптотическое представление

$$\kappa_1 a_1 = m_1 \pi + O(1), \quad \kappa_2 a_2 = m_2 \pi + O(1) \quad (19)$$

Формулы (17), (18) и (19) применимы к замкнутым круговым цилиндрическим оболочкам, а также к цилиндрическим панелям и опертым вдоль образующих при любых соотношениях между упругими постоянными ортотропного материала. Для замкнутых пологих оболочек вращения, опертых по торцам, или пологих панелей с условиями шарнирного опирания по всем кромкам соотношения (17), (18) и (19) являются точными.

Число собственных частот $N(\omega_0)$, меньших некоторого заданного значения частоты ω_0 , приближенно оценивается

$$N(\omega_0) \approx \frac{1}{\Delta\kappa_1 \Delta\kappa_2} \iint_{\omega(\kappa_1, \kappa_2) < \omega_0} d\kappa_1 d\kappa_2 \quad (20)$$

в полярных координатах:

$$r^2 = \kappa_1^2 d_{11}^{\frac{1}{2}} + \kappa_2^2 d_{11}^{-\frac{1}{2}}, \quad \text{tg} \theta = \frac{\kappa_2}{d_{11}^{-\frac{1}{2}} \kappa_1}$$

формула (18) имеет вид (при $b_{11} d_{11}^2 = 1$):

$$\omega^2 = (1 - c^2 \sin^2 2\theta) r^4 + \frac{(\cos^2 \theta + \chi d_{11} \sin^2 \theta)^2}{1 - a \sin^2 2\theta} \quad (21)$$

здесь $c_2 = \frac{1}{2}(1 - d_{12})$, $a = \frac{1}{2}(1 - b_{12} d_{11})$

После интегрирования по r из (20) получаем:

$$N(\omega) = \frac{1}{2\Delta\kappa_1 \Delta\kappa_2} \int_{\theta_1(\omega)}^{\theta_2(\omega)} r^2(\theta) d\theta \quad (22)$$

$$r^2(\theta) = \frac{\sqrt{\omega^2 - \frac{(\cos^2 \theta + \chi d_{11} \sin^2 \theta)^2}{1 - a \sin^2 2\theta}}}{(1 - c^2 \sin^2 2\theta)^{\frac{1}{2}}} \quad (23)$$

Выражение для асимптотической плотности частот получим, проинтегрировав $N(\omega_0)$ по параметру ω :

$$n(\omega) = \frac{\omega}{2\Delta\kappa_1 \Delta\kappa_2} \int_{\theta_1(\omega)}^{\theta_2(\omega)} \frac{d\theta}{f(\theta)} \quad (24)$$

$$f(\theta) = \sqrt{v_1(\theta) [\omega^2 - (v_2(\theta))^2 \cdot v_3(\theta)]} \quad (25)$$

Здесь $v_1(\theta) = 1 - c^2 \sin^2 2\theta$;

$$v_2(\theta) = (\cos^2 \theta + \chi d_{11} \sin^2 \theta)^2; \quad v_3(\theta) = (1 - a \sin^2 2\theta)^{-1};$$

пределы интегрирования $\theta_1(\omega), \theta_2(\omega)$ определяются из условия неотрицательности подкоренного выражения, входящего в $r^2(\theta)$. Будем рассматривать ортотропные оболочки с параметром $\chi d_{11} < 1$. Тогда при $\omega > 1$ пределы интегрирования $\theta_2 = \frac{\pi}{2}, \theta_1 = 0$, при $\chi d_{11} < \omega < 1 - \theta_2 = \frac{\pi}{2}, \theta_1 = \theta_*$. Значение нижнего предела определяется из неотрицательности квадратной скобки, входящей в подкоренное выражение

$$c^2 < 1 \text{ и } 1 - c^2 \sin^2 2\theta > 0.$$

$$\theta_* = \arccos \sqrt{\frac{p_1 - \sqrt{p_1^2 - p_3 \cdot p_1}}{p_4}} \quad (26)$$

Здесь $p_1 = 2a\omega^2 + \chi d_{11} - \chi^2 d_{11}^2$; $p_2 = \omega^2 - \chi^2 d_{11}^2$;

$$p_3 = 4a\omega^2 + \chi d_{11} - 1 - \chi^2 d_{11}^2;$$

$$p_4 = 4a\omega^2 + 2\chi d_{11} - 1 - \chi^2 d_{11}^2;$$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение асимптотического метода В.В. Болотина к исследованию спектров собственных частот колебаний ортотропных пологих оболочек позволяет производить расчеты, используя практически любые программные комплексы. Ввиду сведения задачи к решению системы трансцендентных уравнений, написание соответствующих программ не вызывает затруднений. Универсальность полученных алгоритмов обусловлена возможностью мгновенного получения новых расчетных данных, благодаря изменению требуемых параметров ортотропии, магнитного поля, типа закрепления. Полученные численные результаты являются новыми, нигде ранее не встречающимися. Благодаря полученным значениям удастся определить характер влияния поперечного магнитного поля на собственные частоты.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\chi=(\mu_r-1)$ – магнитная восприимчивость;
 μ_r – относительная магнитная проницаемость материала оболочки;
 $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;
 $E_1, E_2, G, \nu_1, \nu_2$ – упругие постоянные,
 σ – коэффициент электропроводности оболочки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вибрации** в технике. Справочник в 6-ти томах. Т.1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. - М.: Машиностроение. 2-е изд..1999.
2. **Корешкова Н.С., Хроматов В.Е.** О влиянии поперечного магнитного поля на спектры частот колебаний пологих оболочек// Изв. РАН. Механика твердого тела. 2009. № 4. С. 165-171.
3. **Хроматов В.Е., Голубева Т.Н.** Колебания и устойчивость ферромагнитной цилиндрической оболочки в магнитном поле// Вестник Московского авиационного института. 2013. № 3. Т. 20. С. 212-219.
4. **Хроматов В.Е., Голубева Т.Н.** О влиянии магнитных полей на колебания и устойчивость пластин из ферромагнитного материала// Вестник машиностроения. 2012. № 9. С.12-16.
5. **Хроматов В.Е., Комиссарова Т.Н., Каплун В.О.** О влиянии магнитных полей на спектры частот колебаний ортотропных пластин// Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды - 2020», 28 сентября – 2 октября 2020 г., Казань. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет; изд-во Академии наук РТ, 2020. С. 424-42.

**ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО КУРСУ «ТЭС И АЭС»
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ
«ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА»**

АННОТАЦИЯ

В докладе содержатся примеры упражнений по моделированию и расчету теплоэнергетических процессов в тепловой схеме энергоблока тепловой электростанции (ТЭС), выполняемые в программной системе Mathcad. Приведены модели основных теплоэнергетических процессов и результаты учебных расчетных исследований режимных взаимосвязей параметров процессов.

Ключевые слова – тепловая схема, деаэратор, энергоблок, энтальпия, КПД, удельный расход топлива

1. ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования и конструирования энергоблоков ТЭС необходимо создавать математические модели, описывающие теплоэнергетические процессы в оборудовании, строить расчетные алгоритмы и их реализации в электронном виде для компьютерного поиска структуры тепловой схемы и параметров, при которых достигается высокая энергетическая эффективность производства электроэнергии. Представленный в докладе материал дополняет учебные упражнения опубликованные в [1, 2].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБОРУДОВАНИИ ТЭС

2.1. Моделирование деаэратора и алгоритма исследования режимных зависимостей теплотехнических параметров

В профильном учебнике [3] отсутствует аналитический материал, раскрывающий работу деаэратора энергоблока ТЭС при изменении электрической нагрузки. Нагрузка энергоблоков значительно снижается в ночной период и в выходные дни. Поэтому студенту необходимо знать, как изменяются основные параметры функциональных потоков рабочей среды (воды, пара) в зависимости от нагрузки. Определяющим режимным параметром деаэратора служит расход питательной воды, выходящей из него $D_{п.в}$. На рис.1 приведена схема деаэратора с основными технологическими потоками.

Для расчета режимных энергетических характеристик деаэратора, модели теплоэнергетических процессов в Mathcad, следует составлять с применением инструмента векторизации формул.

На рис. 2 приведен фрагмент листинга Mathcad с основными моделями (уравнениями) теплотехнических процессов. В расчете применяются четыре уравнения, аппроксимирующие группы режимных

параметров, полученных по результатам полных расчетов тепловой схемы.

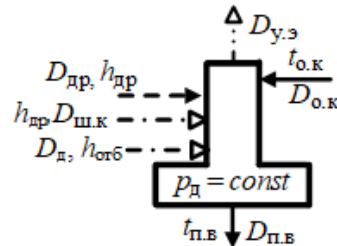


Рис. 1. Схема деаэратора с основными потоками рабочей среды

Режимные характеристики, полученные при полном расчете тепловой схемы

Температура основного конденсата на входе $t_{о.к} := ((90 + 0.299 \cdot D_{п.в}))$

Тогда энтальпия основного конденсата на входе в деаэратор

$$h_{о.к} := (\text{wspHPT}(P_{ок} \cdot 10^6, t_{о.к} + 273.15) \cdot 10^{-3})$$

Энтальпия греющего пара из отбора турбины (из расчета процесса расширения в турбине)

$$h_{отб} := (\overline{0.67 \cdot D_{п.в} + 3210})$$

Расход конденсата (дренажа), сливаемого в деаэратор из ПВД

$$D_{др} := (\overline{0.11708 \cdot D_{п.в} + 4.81})$$

Энтальпия дренажа, сливаемого в деаэратор из ПВД в зависимости от нагрузки

$$h_{др} := (\overline{0.406 \cdot D_{п.в} + 637})$$

Нагрев основного конденсата в деаэраторе $\Delta t_d := (t_s - t_{о.к})$

Расход пара в деаэратор (из решения системы уравнений материального и теплового балансов)

$$D_d := \frac{D_{п.в} \cdot h_{п.в} + D_{у.э} \cdot h_{с_пар} - D_{ш.к} \cdot h_{отб} - D_{др} \cdot h_{др} - (D_{п.в} + D_{у.э} - D_{др} - D_{ш.к}) \cdot h_{о.к}}{h_{отб} - h_{о.к}}$$

Рис. 2. Фрагмент листинга Mathcad моделей теплотехнических характеристик параметров деаэратора

Характеристика повышения температуры основного конденсата в зависимости от расхода питательной воды (от нагрузки) приведена на рис. 3.

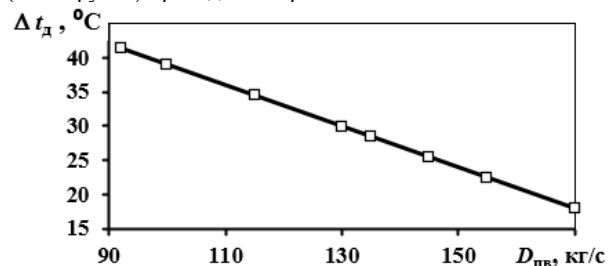


Рис. 3. Повышение температуры основного конденсата в деаэраторе в зависимости от расхода питательной воды

Расчетное исследование показывает, что при снижении нагрузки энергоблока подогрев в деаэраторе значительно увеличивается.

На рис. 4 приведены энергетические характеристики, отражающие расходы основного конденсата и пара из отбора турбины в зависимости от расхода питательной воды.

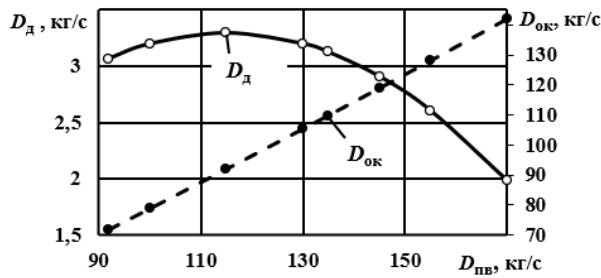


Рис.4. Расходы основного конденсата $D_{ок}$ и пара из отбора турбины D_d в зависимости от нагрузки деаэратора

Результаты приведенных учебных расчетных исследований расширяют профессиональные знания студентов на этапе бакалавриата.

2.2. Моделирование тепловой схемы энергоблока с целью поиска оптимальных параметров

В [2] приведены основы моделирования простейшей тепловой схемы энергоблока в оптимизационной постановке. Приведенный учебный материал предназначен для выполнения на учебном семинаре. Для самостоятельной работы студента предлагается более сложная тепловая схема энергоблока (рис. 5).

Целью моделирования и расчетного исследования является поиск давления пара после промежуточного перегрева (перед вторым цилиндром турбины) и давлений в регенеративных отборах из второго цилиндра, при которых обеспечивается максимальный КПД энергоблока нетто (минимальный удельный расход топлива). В расчете учитываются затраты мощности на электроприводы двух питательных насосов, конденсатного и циркуляционного насосов и тягодутьевых машин котла.

Давление пара после промежуточного перегрева $P_{пн}$ и в отборах P_3 , и P_4 искомые переменные.

$$h_{к_из}(P_{пн}, P_3, P_4) := \text{wspHPS}(P_k \cdot 10^6, s_4(P_{пн}, P_3, P_4) \cdot 10^3) \cdot 10^{-3}$$

$$h_k(P_{пн}, P_3, P_4) := h_4(P_{пн}, P_3, P_4) - \eta_5 \cdot (h_4(P_{пн}, P_3, P_4) - h_{к_из}(P_{пн}, P_3, P_4))$$

$$s_k(P_{пн}, P_3, P_4) := \text{wspSPH}(P_k \cdot 10^6, h_k(P_{пн}, P_3, P_4) \cdot 10^3) \cdot 10^{-3}$$

$$X_k(P_{пн}, P_3, P_4) := \text{wspXSTH}(t_k + 273.15, h_k(P_{пн}, P_3, P_4) \cdot 10^3)$$

$$\alpha_{п1}(P_{пн}, P_3, P_4) := \frac{\alpha_{пв} \cdot h_{п1_вых}(P_4) - \alpha_{др2}(P_{пн}, P_3, P_4) \cdot h_{др2}(P_3) - (\alpha_{пв} - \alpha_{др2}(P_{пн}, P_3, P_4)) \cdot (h_{ок} + \Delta h_{кн})}{h_4(P_{пн}, P_3, P_4) - (h_{ок} + \Delta h_{кн})}$$

$$Q_{ту}(P_{пн}, P_3, P_4) := D_0(P_{пн}, P_3, P_4) \cdot (h_0 - h_{пв}) + D_{пн}(P_{пн}, P_3, P_4) \cdot (h_{пн}(P_{пн}) - h_2(P_{пн})) - D_{доб}(P_{пн}, P_3, P_4) \cdot (h_{пв} - h_{доб})$$

Рис. 6. Фрагмент блока уравнений определения энтальпии, энтропии, степени сухости пара в выхлопе турбины, относительного расхода пара в подогреватель П1 и расхода теплоты турбоустановкой

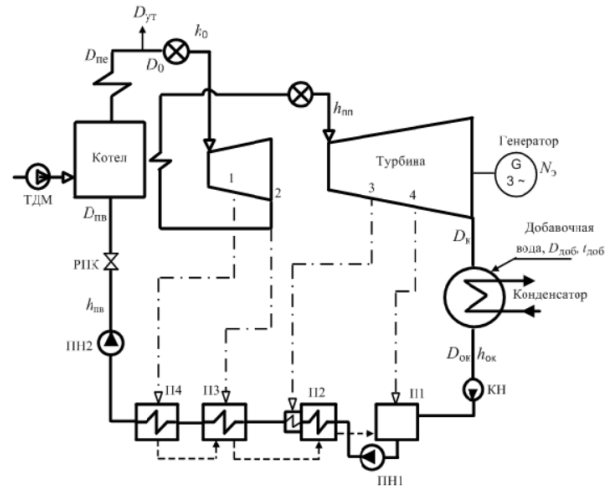


Рис.5. Тепловая схема энергоблока с промежуточным перегревом пара, с регенеративными подогревателями разного типа и с двумя ступенями питательных насосов: П1, П2, П3, П4 – регенеративные подогреватели; ПН1, ПН2 – питательные насосы; КН – конденсатный насос; ТДМ – тягодутьевые машины котла; РПК – регулирующий питательный клапан котла

Давление в выхлопе первого цилиндра турбины P_2 в функции от $P_{пн}$ (в нотации Mathcad), МПа

$$P_2(P_{пн}) := \frac{P_{пн}}{(1 - 0.01 \cdot \delta P_{пн})}$$

Энтальпия пара в камере второго регенеративного отбора

$$h_2(P_{пн}) := h_1 - \eta_2 \cdot (h_1 - h_{2_из}(P_{пн}))$$

Энтальпия питательной воды на выходе подогревателя П3, кДж/кг

$$h_{пв_п3}(P_{пн}) := \text{wspHPT}(P_{вых_п3} \cdot 10^6, t_{пв_п3}(P_{пн}) + 273.15) \cdot 10^{-3}$$

Аналогично моделируются остальные регенеративные подогреватели.

Основы моделирования процесса расширения пара в турбине покажем на блоке уравнений для параметров пара в выхлопе турбины (рис. 6)

Целевой функционал – КПД энергоблока по отпуску электроэнергии (ниже фрагмент листинга Mathcad)

$$\eta_{\text{бл_нетто}}(P_{\text{шт}}, P_3, P_4) := \frac{N_{\text{отп}}(P_{\text{шт}}, P_3, P_4)}{B_T(P_{\text{шт}}, P_3, P_4) \cdot Q_{T_i}} \cdot 100$$

Для поиска параметров, обеспечивающих максимум КПД применяется инструмент Given – Find Mathcad. В записи поисковой модели указываются ограничения на искомые параметры тепловой схемы (ниже фрагмент листинга Mathcad)

Given

$$P_4 > 0.02 \quad P_3 > P_4 \quad P_{\text{шт}} > P_3 \quad P_{\text{шт}} < P_1$$

$$f_{\text{шт34}} := \text{Maximize}(\eta_{\text{бл_нетто}}, P_{\text{шт}}, P_3, P_4)$$

По рассмотренной модели тепловой схемы определяются оптимальные величины давления пара после промежуточного перегрева и в регенеративных отборах турбины при фиксированных величинах температуры питательной воды и давления в конденсаторе. Модель позволяет выполнять расчетные исследования при вариации температуры питательной воды и давления в конденсаторе. Температура питательной воды утверждается при согласовании характеристик турбоустановки и котельной установки (согласие турбинного и котельного заводов). Поэтому в рассматриваемой оптимизационной модели тепловой схемы температура питательной воды отнесена в состав исходных данных.

На рис. 7 приведены результаты оптимизационных расчетов при изменении температуры питательной воды. Эта характеристика показывает диапазон устойчивости энергетической эффективности по отношению к изменению температуры питательной воды при фиксированном КПД котла.

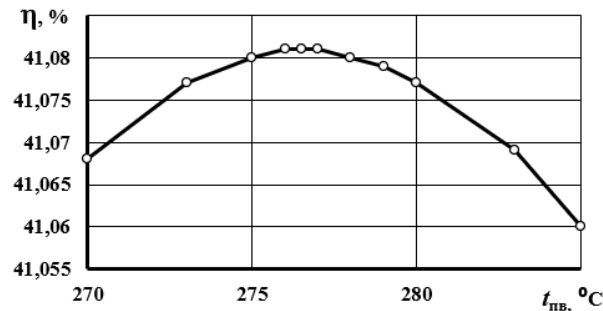


Рис. 7. Максимальные КПД тепловой схемы энергоблока в зависимости от температуры питательной воды

Зависимость оптимального давления пара после промежуточного перегрева от температуры питательной воды приведена на рис. 8. Оптимальное давление пара после промперегрева линейно зависит от температуры питательной воды.

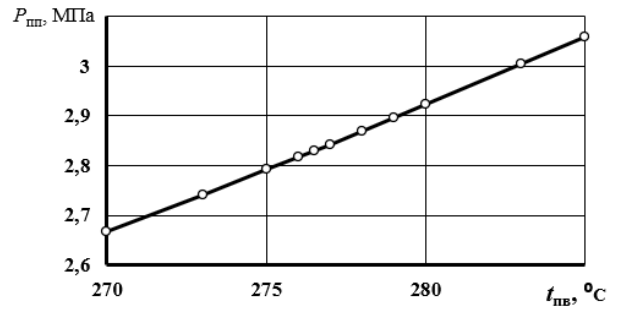


Рис. 8. Оптимальное давление пара промперегрева в зависимости от температуры питательной воды

2.3. Моделирование и расчет толщины слоя теплоизоляции сосудов цилиндрической формы

В соответствии с требованиями Свода правил СП 61.13330.2012 температура на поверхности тепловой изоляции для объектов, расположенных в рабочей зоне или в обслуживаемых зонах помещений, с температурой рабочих сред от 150 до 500 °C принимается не более 45 °C. Исходя из этого требования необходимо выполнять расчет толщины слоя теплоизоляции. Для реализации расчета в Своде правил рекомендован метод последовательного приближения. Расчетные инструменты Mathcad позволяют построить более эффективную модель расчета тепловой изоляции теплообменных аппаратов ТЭС.

Ниже приведена Mathcad-модель расчета толщины слоя известково-кремнеземистой теплоизоляции (до 600 °C)

$$\begin{aligned} \text{Температура пара} & \quad t_{\text{внутр}} := 200 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{Диаметр сосуда} & \quad d_{\text{ст_н}} := 1.250 \text{ м} \\ \text{Температура окружающей среды} & \quad t_{\text{н}} := 20 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{Допустимая температура поверхности} & \quad t_{\text{п}} := 45 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Линейное термическое сопротивление теплоотдаче наружной изоляции (из Свода правил СП 61.13330.2012, табл. В.3)

$$R_{L_н} := 0.08 \text{ м}^2\text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

Коэффициент теплопроводности теплоизоляции известково-кремнеземистой (ГОСТ 24748-81)

$$t_{\text{из}} := \frac{t_{\text{внутр}} + t_{\text{п}}}{2} = 122.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \lambda_{\text{из}} := 0.069 + 0.00015 \cdot t_{\text{из}} = 0.0874 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$$

Уравнения связи конструктивных параметров с теплотехническими (из Свода правил СП 61.13330.2012 (СНиП 41-03-2003))

$$\ln \left(\frac{d_{\text{ст_н}} + 2 \cdot \delta_{\text{из}}}{d_{\text{ст_н}}} \right) = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{из_известк_кремн}} \cdot R_{L_н} \cdot \frac{(t_{\text{внутр}} - t_{\text{н}})}{t_{\text{п}} - t_{\text{н}}}$$

Обозначим левую часть уравнения lnB

$$\text{где} \quad B = \frac{d_{\text{ст_н}} + 2 \cdot \delta_{\text{из}}}{d_{\text{ст_н}}}$$

$$\text{Связь между B и } \delta_{\text{из}} \quad \delta_{\text{из}} = \frac{B \cdot d_{\text{ст_н}} - d_{\text{ст_н}}}{2}$$

$$\text{Тогда} \quad \ln B := 2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{из}} \cdot R_{L_н} \cdot \frac{(t_{\text{внутр}} - t_{\text{н}})}{t_{\text{п}} - t_{\text{н}}} = 0.316$$

Так как фактически в левой части логарифм (натуральный), то выполняем поиск величины B (в скобках логарифма) и, затем вычисляем из дробного выражения толщину слоя теплоизоляции

$$B := e^{\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{из}} \cdot R_{L_H} \cdot (t_{\text{внутр}} - t_{\text{н}})}{t_{\text{п}} - t_{\text{н}}} \right]} = 1.372$$

Расчетная толщина слоя теплоизоляции

$$\delta_{\text{из}} := \frac{B \cdot d_{\text{ст_н}} - d_{\text{ст_н}}}{2} = 0.232 \text{ м}$$

Исходя из расчетной толщины, по номенклатурному каталогу завода-изготовителя, выбирают промышленные изделия теплоизоляции.

2.4. Подготовка насоса к установке в тепловую схему ТЭС

При монтаже и пуско-наладочных работах определяются гидравлические сопротивления трактов, на которые работают насосы. Напоры насосов, поставленных заводами-изготовителями, часто превышают требуемые напоры. Поэтому на ТЭС выполняют расчеты и подрезку (обточку) рабочих колес центробежных насосов. Основные характеристики насоса с обточенным рабочим колесом определяются на основе уравнений подобия. Ниже приведен расчет диаметра рабочего колеса сетевого насоса СЭ 2500-180-8 на требуемый напор.

Паспортный напор насоса $H_{\text{зав}} := 180 \text{ м}$

Диаметр рабочего колеса (заводской)

$$D_{\text{раб_кол_зав}} := 408.5 \text{ мм}$$

Паспортная подача $Q_{\text{зав}} := 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$

Паспортная мощность на муфте $N_{\text{нас}} := 1380 \text{ кВт}$

Требуемый напор насоса $H_{\text{треб}} := 150 \text{ м}$

$$\text{Уравнение подобия: } \frac{H_{\text{треб}}}{H_{\text{зав}}} = \left(\frac{D_{\text{раб_кол_обточки}}}{D_{\text{раб_кол_зав}}} \right)^2$$

Необходимый диаметр обточенного рабочего колеса

$$D_{\text{раб_кол_подрез}} := D_{\text{раб_кол_зав}} \cdot \sqrt{\frac{H_{\text{треб}}}{H_{\text{зав}}}} = 372.91 \text{ мм}$$

Величина подрезки (обточки) рабочего колеса по диаметру

$$\Delta D := D_{\text{раб_кол_зав}} - D_{\text{раб_кол_подрез}} = 35.59 \text{ мм}$$

По экспертным данным КПД насоса снижается на 4 %

Коэффициент учета снижения КПД насоса (увеличение объемных протечек через щелевые уплотнения)

$$\zeta := 0.96$$

Мощность насоса после подрезки рабочего колеса

$$N_{\text{нас_подрез}} := \frac{1}{\zeta} \cdot N_{\text{нас}} \cdot \left(\frac{D_{\text{раб_кол_подрез}}}{D_{\text{раб_кол_зав}}} \right)^3 = 1093.5 \text{ кВт}$$

Аналогично, по уравнению подобия, определяется подача насоса с обточенным рабочим колесом.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные Mathcad-модели для проведения практических и самостоятельных занятий студентов в профессиональной подготовке бакалавров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» могут включаться в базовый комплекс цифровых учебных упражнений и будут способствовать наработке профессиональных умений. Они дополняют комплекс учебных упражнений представленный в [2].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит К.А. Орлова и В.Ф. Очкова за предоставление преподавателям и студентам программного обеспечения для расчета термодинамических параметров воды и пара (www.wsp.ru).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $D_{\text{п.в}}$ — расход питательной воды, кг/с;
- $t_{\text{п.в}}$ — температура питательной воды, °С;
- $D_{\text{о.к}}$ — расход основного конденсата, кг/с;
- $t_{\text{о.к}}$ — температура основного конденсата, °С;
- $D_{\text{д}}$ — расход пара в деаэрактор, кг/с;
- $D_{\text{др}}$ — расход дренажа из ПВД в деаэрактор, кг/с;
- $D_{\text{у.э}}$ — расход пара из деаэратора на концевые уплотнения цилиндров турбины, кг/с;
- $p_{\text{д}}$ — давление в деаэраторе, °С;
- $h_{\text{отб}}$ — энтальпия пара из отбора турбины, кДж/кг;
- $\Delta t_{\text{д}}$ — нагрев основного конденсата в деаэраторе, °С;
- $P_{\text{пн}}, P_3$ и P_4 — давление пара после промежуточного перегрева, в камере отбора № 3, в камере отбора № 4;
- $P_2(P_{\text{пн}})$ — давление в регенеративном отборе № 2 в функции от давления пара промежуточного перегрева (в нотации Mathcad);
- η_2 — относительный внутренний КПД второго отсека турбины, от. ед.;
- $\alpha_{\text{п1}}(P_{\text{пн}}, P_3, P_4)$ — относительный расход пара в регенеративный подогреватель П1 в функции от искомым переменных $P_{\text{пн}}, P_3, P_4$, от. ед.;
- $Q_{\text{ту}}(P_{\text{пн}}, P_3, P_4)$ — расход теплоты турбоустановкой для производства электроэнергии (мощности), кВт;
- $V_{\text{т}}(P_{\text{пн}}, P_3, P_4)$ — расход условного топлива в функции от искомым переменных $P_{\text{пн}}, P_3, P_4$, т у.т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теплотехнические** расчеты на компьютере: учебное пособие /А.А. Александров, Аунг Ту Ра Тун, А.Б. Гаераев и др. М.: Издательство МЭИ, 2019. 448 с.
2. **Дорохов Е.В., Очков В.Ф.** Основы моделирования тепловых схем ТЭС и АЭС. М.: Издательство МЭИ, 2021. 68 с.
3. **Тепловые** электрические станции: учебник для вузов / В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др.— 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 466 с.

И.В. Володин, И.А. Корняков, И.А. Ячевский

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ КИПЕНИЯ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ

АННОТАЦИЯ

В работе представлено описание экспериментальной установки по исследованию процессов теплопереноса в сверхтекучем гелии, в том числе при кипении в свободном объеме и в стесненных условиях. Предложена схема автоматизации сбора данных, перечислены все элементы установки, датчики и выходные сигналы, приведены примеры данных, получаемых в ходе проведения экспериментальных серий.

Ключевые слова – сверхтекучий гелий, теплоперенос, температура, давление, тепловая нагрузка, эксперимент, автоматизация

1. ВВЕДЕНИЕ

На кафедре низких температур НИУ «МЭИ» проводятся эксперименты по исследованию процессов теплопереноса в сверхтекучем гелии. Для подобных экспериментов была собрана и введена в эксплуатацию экспериментальная установка. С течением лет данную установку усовершенствовали и модифицировали для того, чтобы лучше воспроизводить режимные параметры эксперимента и получать точные результаты. Предыдущая конфигурация установки описана в статье [1]. Эксперименты проводятся в различных условиях: свободный объем, внутри пористого тела, в U-образном канале. При этом режимные параметры процесса могут варьироваться в широких пределах: давление от 500 до 5000 Па, температура жидкости: 1,6 – 2,2К, температура нагревателя: 1,6 – 100К, тепловая нагрузка 10^4 – $3,5 \cdot 10^4$ Вт/м². Глубина погружения экспериментальной ячейки также изменяется вследствие испарения жидкости внутри сосуда.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

2.1. Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд (рис. 1) включает в себя систему криостатирования, оптического наблюдения, цифровой видеозаписи, подачи тепловой нагрузки и измерения режимных параметров.

Система криостатирования состоит из двух стеклянных сосудов Дьюара разного диаметра, расположенных коаксиально. Сосуд большего диаметра заполняется жидким азотом для создания криостатирующей рубашки, защищающей внутренний сосуд малого диаметра от избыточных теплопритоков из окружающей среды. Внутренний сосуд меньшего диаметра заполняется жидким гелием, в который погружается экспериментальная ячейка на

определенную глубину. На оба сосуда нанесено напыление, выполняющее функцию отражающего экрана для защиты от излучения. Также, сосуды имеют смотровые щели с двух сторон для наблюдения и видеофиксации процесса эксперимента на просвет.

Гелиевый сосуд закрывается металлической цилиндрической муфтой с фланцами. Муфта-крышка обеспечивает герметичность в ходе эксперимента, в частности при заправке жидкого гелия и при вакуумной откачке внутреннего пространства сосуда для понижения температуры жидкости и перевода ее в сверхтекучее состояние. Трубопроводы системы вакуумной откачки, включающей в себя два насоса, производительностью 20 л/с подсоединяются к двум портам в крышке. Кроме этого, муфта снабжена аналоговым разъемом для считывания данных с термодатчиков, подачи напряжения на нагреватель и измерение тепловой нагрузки, а также внутренним резьбовым соединением для крепления штока, на котором закреплена экспериментальная ячейка.

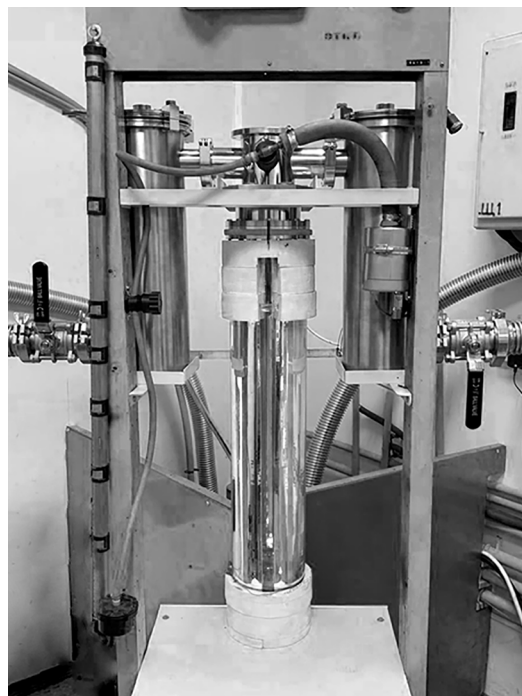


Рис. 1. Внешний вид центральной стойки с криостатами.

Два новых вакуумных поста оборудованы металлическими азотными ловушками, обеспечивающими надежную изоляцию рабочего пространства гелиевого криостата от смазочного масла во избежание выпадения мутного осадка и нарушения прозрачности, а также повышения давления в ра-

бочем объеме. Двухконтурная система вакуумной откачки обеспечивает постоянство давления паров во внутреннем сосуде, а значит и температуры жидкости в некотором диапазоне рабочих параметров [2]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

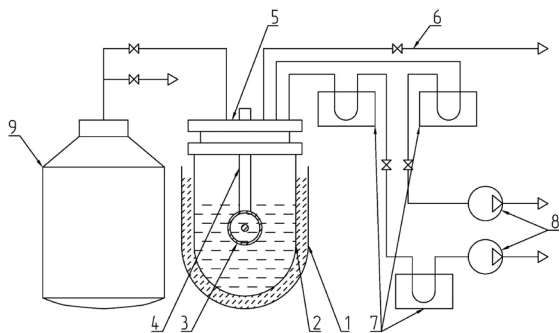


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1- внешний сосуд Дьюара; 2 – внутренний сосуд Дьюара; 3 – экспериментальная ячейка; 4 – шток; 5 – муфта; 6 – линия сброса давления; 7 – азотная ловушка; 8– насос НВЗ-20; 9 – транспортный гелиевый сосуд СТГ-40.

2.3. Описание экспериментальной ячейки

Центральным элементом установки является экспериментальная ячейка [3]: цилиндрическая оболочка из нержавеющей стали с внутренним диаметром 36 мм. Внутри корпуса вкладывается пористая структура толщиной 7,5 мм из стальной тканной сетки. Ячейка герметизируется индиевой проволокой, закладываемой в канавки на корпусе. Торцевые крышки ячейки имеют смотровые окна, выполненные из оргстекла толщиной 1 мм. На оси ячейки крепится цилиндрический нагреватель на Г-образный изогнутый стержень. Изоляцию между держателем и оболочкой обеспечивает эпоксидная смола. Наружная поверхность цилиндрического нагревателя представляет собой латунную трубку диаметром 3 мм и длиной 30 мм, внутри которой находится намотка из нихромовой проволоки [4].

3. АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА ДАННЫХ

3.1. Схема автоматизации

Автоматическая система сбора и обработки параметров эксперимента позволяет анализировать данные непосредственно во время его проведения. Аналоговый сигнал приходит от различных датчиков на АЦП, обрабатывается, затем идёт на персональный компьютер, где выводится на экран непосредственно во время эксперимента в виде графической или табличной информации, а также записывается в файл для дальнейшей обработки (рис.3).

3.2. Датчики давления

Давление во внутреннем сосуде контролируется визуально с помощью присоединённого к нему ртутного чашечного манометра МЧР-4. Диапазон измерения от 0 мм рт.ст. до 1000 мм рт. ст. с по-

грешностью в 0,5 мм. В автоматическом режиме записывает ёмкостной датчик давления «Баратрон-мастер» (модели 235). Точность измеряемого давления в диапазоне от 0,2 Торр до 1000 Торр составляет 0,5% измеримой величины.

3.3. Датчики температуры

Для измерения температур жидкости и поверхности нагревателя были установлены высокоточные температурные датчики сопротивления, базирующиеся на 0.125 Вт композитных ТВО-резисторах K91K012Q и K91K909. Допустимый диапазон измерения от 1.45K до 293.0K. Точность измерений, обусловленная погрешностью ТВО-резисторов, составляет ± 10 мК для температур ниже 4K [5]. Встроенное программное обеспечение выводит на экран данные в реальном времени, записывая измерения в лог-файл. Данное преимущество используется для более точного контроля нагрузки, подаваемой на нагреватель, так как программа может оповещать о превышении температуры в λ -точке, чтобы остановить экспериментальную сессию или резко снизить нагрузку.

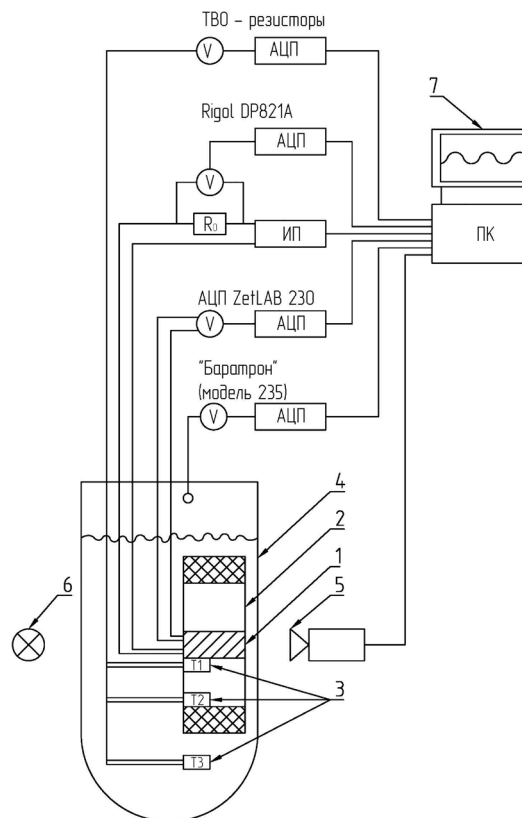


Рис. 3. Схема автоматизации экспериментального стенда: 1 – нагреватель; 2 – экспериментальная ячейка; 3 – ТВО-резисторы; 4 – сосуд Дьюара; 5 – камера для видеонаблюдения; 6 – источник света; 7 – ЭВМ.

3.4. Источник питания

Для подачи тепловой нагрузки на нагреватель используется программируемый источник питания Rigol DP821A, обладающий следующими характеристиками: низким уровнем шумов и пульсаций, высокой точностью установки напряжения и тока.

В источнике питания имеется графический интерфейс, который обеспечивает цифровую, аналоговую и графическую формы отображения параметров в реальном времени. Кроме того, источник питания DP821A позволяет запрограммировать выходные параметры, задержку и условия для синхронизации, а также получать внешний сигнал от АЦП, что позволяет организовать единый блок контроля и управления.

3.5. Модуль аналого-цифрового преобразователя

Для автоматического сбора и обработки результатов эксперимента используется модуль АЦП-ЦАП ZetLAB 230 и 220. Модуль задействуется непосредственно во время эксперимента для измерения падения напряжения на эталонном сопротивлении и нагревателе, а также значений температуры в характерных точках экспериментальной ячейки. Для записи данных с источника питания вся информация сразу собирается в лог-файл, что существенно упрощает обработку данных. Имеется возможность программирования, управления другими устройствами, демонстрации сигналов графически и символично, а также широкий функционал встроенной обработки и представления данных.

3.6. Проблемы и особенности автоматизации

Необходимо получить большое количество режимных параметров, наблюдающихся в процессе эксперимента. Для этого было установлено 5 ТВО-резисторов, баратрон. Все данные записываются на ЭВМ с интервалом по времени. Предыдущий источник питания не имел функции записи напряжения, подаваемого на нагреватель, снятие напряжения происходило с вольтметров, сейчас – автоматически, с записью в файл. Температура измерялась по линии насыщения гелия, в данный момент снимается с температурных датчиков. В ходе обработки экспериментальных данных необходимо проводить синхронизацию видеозаписи эксперимента с файлами показаний датчиков давления, температуры и нагрузки, подаваемой на нагреватель.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Предварительным этапом к началу эксперимента является заливка азота во внешний сосуд. В отверстие муфты для заливки гелия одним концом вставляется переливной сифон. Другой конец вставляется в транспортный сосуд. Производится первичная откачка давления из внутреннего сосуда для удаления паров воды и других примесей. Открывается клапан на переливном устройстве, вследствие разницы давлений между транспортным сосудом СТГ-40 и криостатом гелий начинает поступать внутрь. Давление на этом этапе отслеживается с помощью ртутного чашечного манометра. Завершающим этапом заправки является откачка излишних паров гелия для достижения температу-

ры λ -перехода. Непосредственно визуально наблюдается переход гелия в сверхтекучее состояние.

Экспериментальная серия начинается в момент подачи напряжения на нагреватель. В это время контролируются все параметры в системе: давление в криостате; напряжение, подаваемое на нагреватель; температура нагревателя и температура среды (жидкого гелия). Одновременно с этим начинается видеofиксация проведения эксперимента, рукописные записи (логи) и озвучка логов на видео, запись полученной информации в виде табличных файлов.

Подача тепловой нагрузки на нагреватель приводит к образованию паровой плёнки на нагревателе и выходу пара через пористую структуру из экспериментальной ячейки в криостат. Процесс характерно сопровождается увеличением давления из-за испарения гелия, откачка насосами не прекращается. Из-за испарения также уменьшается уровень гелия в криостате, вследствие чего ведётся наблюдение и за уровнем гелия. Нулевой точкой отсчёта уровня служит центр оси нагревателя, то есть глубина погружения.

Экспериментальная сессия заканчивается при достижении λ -точки или при существенном повышении температуры нагревателя (выше 200К). В этих случаях подача нагрузки прекращается. Гелий вновь заполняет полость внутри ячейки, а паровая плёнка схлопывается. Для подготовки проведения новой серии пары гелия вновь откачиваются до требуемого уровня.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ

5.1. Датчик давления

Цифровой датчик давления баратрон модели 235 записывает все данные с использованием программы, написанной на java (рис. 4).

Log Initiated: Wed May 12 14:26:29.6				
Date	Time	Digital Pressure	Analog Pressure	Pressure Units
12-May-2006	14:26:34.0	867.27	869.26	Pa
12-May-2006	14:26:38.8	868.15	869.79	Pa
12-May-2006	14:26:43.7	867.53	867.42	Pa
12-May-2006	14:26:48.6	867.63	865.44	Pa
12-May-2006	14:26:53.5	867.68	865.64	Pa
12-May-2006	14:26:58.4	865.52	865.77	Pa
12-May-2006	14:27:03.3	863.49	862.94	Pa
12-May-2006	14:27:08.1	867.05	867.94	Pa
12-May-2006	14:27:13.0	868.26	869.72	Pa
12-May-2006	14:27:17.9	868.22	869.00	Pa
12-May-2006	14:27:22.8	867.20	868.80	Pa
12-May-2006	14:27:27.7	867.46	870.64	Pa
12-May-2006	14:27:32.6	868.15	864.19	Pa

Рис. 4. Данные, записанные с датчиков давления.

Также имеется функция демонстрации изменения давления в экспериментальном объёме в реальном времени с возможностями настройки временного интервала и необходимого предела измерения давления в Па. Отображение данных представлена на рис. 5.

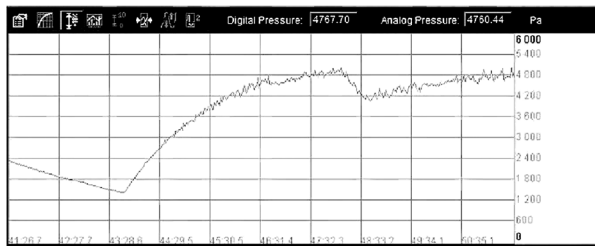


Рис. 5. Графическое отображение изменение давления в реальном времени.

5.2. Термограммы, полученные с датчиков температуры

ТВО-резисторы, установленные внутрь экспериментального объёма, записывают свои данные двумя способами: одним датчиком с интервалом записи 0.25 с, либо несколькими датчиками, но с интервалом записи в две секунды. Обычно, если экспериментальная сессия нуждается в дополнительном исследовании влияния температуры, исходящей от нагревателя, выбирается один датчик, установленный на нём, для более точного наблюдения изменения температуры.

Остальные датчики расположены в свободном объёме и в пористой структуре для контроля температуры среды. С точки зрения исследования сверхтекучего гелия необходимо поддерживать температуру среды ниже λ -точки, в противном случае гелий перейдёт в нормальное состояние. На рис. 6, 7 представлены графики зависимости температуры от времени в двух разных режимах записи: на один и на 5 датчиков, а также таблица с записанными данными.

5.3. Источник питания

Источник питания Rigol DP821A записывает данные в файлы формата ROF. Все каналы записи перенаправляются через делитель напряжения на АЦП. АЦП ZetLAB 230 может записывать двухканальный сигнал. В экспериментах записывается напряжение, подаваемое на нагреватель и ток. Данные от источника представлены с коэффициентом деления и для перехода к исходным необходимо: знать значение подаваемого напряжения (записывается в лог проведения эксперимента), либо знать коэффициент делителя напряжения. Необходимым режимным параметром является удельная тепловая нагрузка, излучаемая нагревателем, представленная в виде графической зависимости на рис. 8. Это значение рассчитывается исходя из мощности (Вт), подаваемой на нагреватель и площади поверхности цилиндрического нагревателя. В первом приближение концевые стоки тепла не рассматриваются. Итоговые результаты, снятые с источника питания, представлены на рис. 9.

sensors=1 interval=0.25 sec sensor number=1

Date	Time	T01(K)
24-11-21	14:27:57.60	1.9642
24-11-21	14:27:57.82	2.1516
24-11-21	14:27:58.10	1.9630
24-11-21	14:27:58.32	1.8465
24-11-21	14:27:58.59	1.9657
24-11-21	14:27:58.86	1.9877
24-11-21	14:27:59.08	1.9648
24-11-21	14:27:59.36	1.9409
24-11-21	14:27:59.58	1.9642
24-11-21	14:27:59.85	2.0556

Рис. 6. Данные, записанные температурными датчиками.

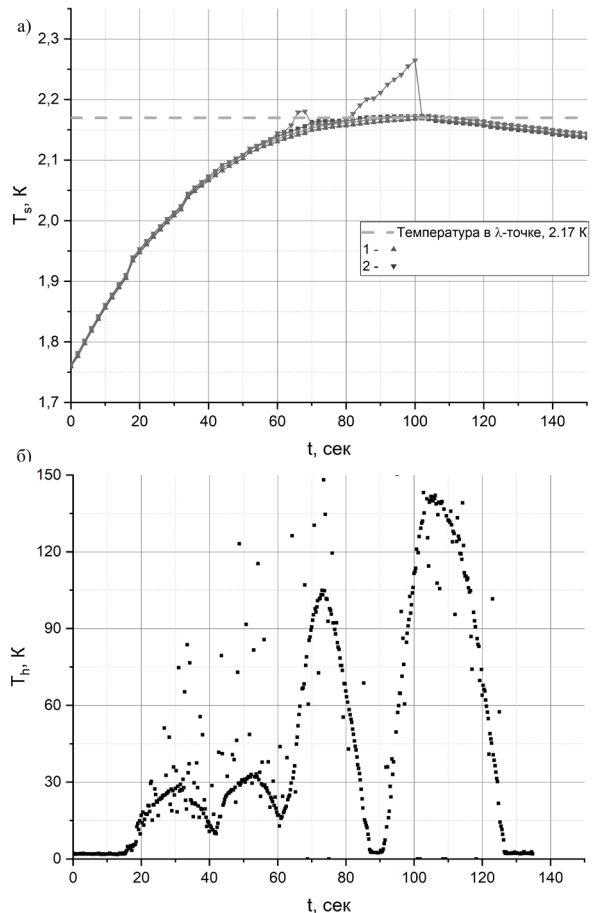


Рис. 7. Зависимости: а) температуры внутри криостата от времени: 1 – датчик в свободном объёме; 2 – датчик в ячейке; б) температуры нагревателя от времени.

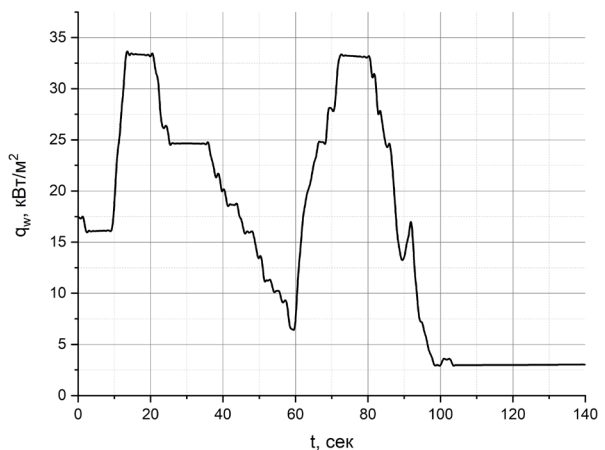


Рис. 8. Зависимость удельной нагрузки от времени.

	Время		мВ	мВ
	с	мВ		
3534	706.6	2012.39	415.1	
3535	706.8	2120.66	436.594	
3536	707	2243.94	461.053	
3537	707.2	2269.4	465.868	
3538	707.4	2355.12	482.572	
3539	707.6	2364.82	484.168	
3540	707.8	2358.31	482.634	
3541	708	2365.04	483.715	
3542	708.2	2361.85	482.568	
3543	708.4	2364.61	482.535	
3544	708.6	2364.13	481.94	
3545	708.8	2364.71	481.769	
3546	709	2365.04	481.471	
3547	709.2	2365.31	481.03	

Рис. 9. Таблица записанных напряжений, снятых с источника питания во временном интервале.

5.4 Некоторые режимы кипения He-II

На рис. 10 показан пример визуализации пленочного кипения сверхтекучего гелия в стесненных условиях. Как показали эксперименты [4], помимо известных шумового и бесшумового пленочного кипения гелия-II, внутри пористой оболочки реализуется еще так называемый режим перевернутой «колоколообразной» паровой пленки.

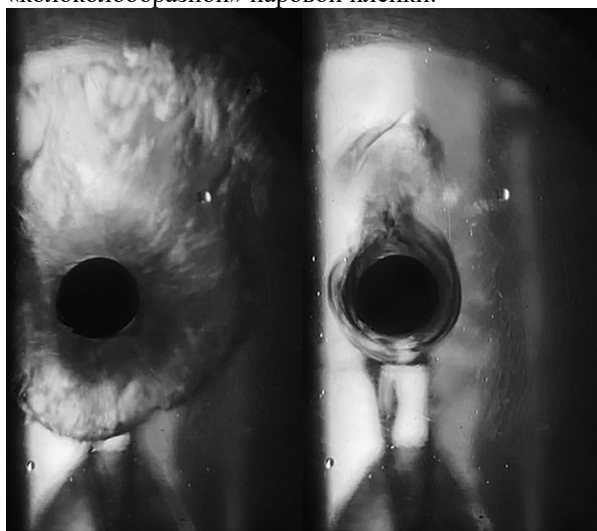


Рис. 10. Кипение гелия-II в стесненных условиях: а) шумовой режим кипения с замкнутой пленкой; б) колоколообразная пленка.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено описание системы автоматического сбора данных в экспериментальной установке по исследованию процессов теплопереноса в сверхтекучем гелии. Основная сложность процесса заключается в ультранизких температурах рабочей среды криостатирования, а также в работе при пониженных давлениях. Приведен полный перечень установленных датчиков с представлением выходных данных в графическом и табличном виде. В результате работы был налажен процесс автоматического сбора и систематизации данных описывающих параметры опытов. Современное аппаратное и программное обеспечение, установленное на стенде и описанное в данной статье, позволяет проводить исследования с возросшей эффективностью за счёт сокращения времени регистрации и обработки данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №19-19-00321.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Королев П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.**, Экспериментальное исследование кипения сверхтекучего гелия (He-II) внутри пористого тела // Прикладная механика и техническая физика, 2017, Т. 58, №4, С. 126-134.
2. **P V Korolyov and I A Yachevsky and I V Volodin** Boiling of He-II on a cylindrical heater inside a porous shell with constant operation condition // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2021, V. 2057, 012055.
3. **Королев П.В., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.** Конструкция экспериментальной ячейки для исследования кипения гелия-II в условиях невесомости. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ, 2012. – Т. 130, №.5 С.43-50.
4. **Korolyov P.V., Kryukov A.P., Puzina Yu.Yu., Yachevsky I.A.** The formation of a closed vapor film during the boiling of helium II on a cylindrical heater inside the porous structure // Journal of Physics: Conf. Series, 2020. V. 1675, 012059
5. **Filippov Yu.P., Miklyaev V.V.** A comparison of Two Kinds of TVO Cryogenic Temperature Sensors. // Cryogenics, 2019. V. 100, P.85-91.

ИЗУЧЕНИЕ СТАРЕНИЯ И НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО СОСТАВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

АННОТАЦИЯ

Установлено влияние концентрации ароматических углеводородов на эксплуатационные свойства модельных смесей. В результате математических исследований получены функциональные зависимости, описывающие влияние концентрации ароматических углеводородов на эксплуатационные свойства масла. В результате оптимизации полученных зависимостей найдена оптимальная концентрация ароматических углеводородов, обеспечивающая высокие эксплуатационные показатели.

Ключевые слова – ароматические углеводороды, тангенс угла диэлектрических потерь, пробивное напряжение, планирование эксперимента.

Анализ развития российской энергетики за последние десятилетия показывает, что несмотря на экономический спад производства, отечественная энергетика по реализации научно-технического прогресса не уступает передовым промышленно развитым странам. Свидетельством тому являются достижения энергетиков в создании, освоении и техническом перевооружении энергоблоков на сверхкритические параметры мощностью 300, 500, 800 и 1200 МВт и теплофикационных энергоблоков 175-250 МВт [12, 15].

Основное отечественное оборудование по своему техническому уровню не уступает зарубежным аналогам, а по некоторым позициям и превосходит последние. Котельные установки, турбогенераторы, трансформаторы и генераторы электрического тока по конструкциям, тепловым схемам, основным технологическим и проектным решениям гарантируют развитие промышленности и стабильное обеспечение всего хозяйства тепловой и электрической энергией.

Для нормального функционирования энергетических предприятий необходимо ввести около 80 млн. кВт генерирующих мощностей на новых и модернизируемых электрических станциях, охватывающих всю территорию России, в том числе десятки тысяч маслонаполненных электрических аппаратов высокого напряжения [11, 14]. Рассматривая в этом аспекте надёжность электроснабжения промышленных объектов и населённых пунктов, следует отметить, что последняя во многом определяется физико-химическими эксплуатационными свойствами трансформаторного масла, выполняющего роль жидкой изоляции электрических маслонаполненных установок.

В этом случае масло является основной изолиру-

ющей средой и определяет электрическую прочность всей конструкции энергетической установки. В этой связи основным требованием, предъявляемым к трансформаторным маслам, являются высокая электрическая прочность, стабильность против окисления, газостойкость в электрическом поле и низкие диэлектрические потери. Поэтому трансформаторное масло, используемое в электрических аппаратах в качестве теплопроводящей и изолирующей среды, должно обладать высокими эксплуатационными характеристиками в условиях работы его в электрическом поле высокой напряженности и повышенных температур [9].

Маслонаполненное электрическое оборудование, обеспечивающее распределение электрической энергии, определяет надёжность электроснабжения промышленных объектов и коммунального хозяйства. Стабильность, долговечность и ресурс работы электрооборудования на электрических объектах во многом зависит от качества используемого нефтяного трансформаторного масла. При этом работоспособность маслонаполненных электрических машин и аппаратов в основном определяется скоростью старения масла в силовых трансформаторах. Углеводородный состав трансформаторного масла и присутствующий в его составе растворенный воздух, оказывает существенное влияние на скорость старения масла в процессе эксплуатации в функционирующем электрооборудовании на энергетических объектах. В соответствии с литературными данными [1, 2], старение масла сопровождается окислительным превращением его углеводородов с образованием жидких, твёрдых и газообразных продуктов, резко ухудшающих эксплуатационные свойства. В этой связи представляло интерес изучить влияние углеводородного состава масла на его эксплуатационные свойства [6, 10].

Для выявления влияния продуктов старения на эксплуатационные свойства масла были использованы модельные смеси, основу которых составляли парафино-нафтеновые углеводороды с добавлением моно- и бициклических ароматических углеводородов (*Ароматические углеводороды* - входят в состав всех масел и являются основным материалом, из которого образуется шлам. Разделяются на углеводороды симметричного строения (например: бензол, нафталин, антрацен) и ароматику с короткими боковыми цепями (например: толуол) в разных концентрациях. Модельные смеси имели следующий состав:

- парафино-нафтеновые углеводороды + 2 % моно- и бициклических ароматических углеводородов - модельная смесь 1
- парафино-нафтеновые углеводороды + 5 % моно- и бициклических ароматических углеводородов - модельная смесь 2
- парафино-нафтеновые углеводороды + 8 % моно- и бициклических ароматических углеводородов - модельная смесь 3
- парафино-нафтеновые фракция + 9 % моно- и бициклических ароматических углеводородов - модельная смесь 4
- парафино-нафтеновые углеводороды + 10 % моно- и бициклических ароматических углеводородов - модельная смесь 5
- парафино-нафтеновые углеводороды + 12 % моно- и бициклических ароматических углеводородов - модельная смесь 6
- парафино-нафтеновые углеводороды + 15 % моно- и бициклических ароматических углеводородов - модельная смесь 7

С использованием модельных смесей было изучено влияние концентрации ароматических углеводородов на скорость старения масла. Скорость старения определяли концентрацией образовавшихся осадка и воды, а так же электроизоляционными свойствами, такими как пробивное напряжение (*Пробивное напряжение* - критическое напряжение, характеризующее электрическую способность образца диэлектрика противостоять электрическому полю.) и тангенс угла диэлектрических потерь (*Тангенс угла диэлектрических потерь* - величина, представляющая собой отношение суммарного активного тока потерь у суммарному реактивному току. Является характеристическим показателем потерь в масле по постоянному и переменному току).

Экспериментальные данные приведены на рис. 1-4.

Скорость образования осадка в зависимости от концентрации ароматических углеводородов приведена на рис. 1. Концентрацию осадка определили в соответствии с ГОСТ 6370-83.

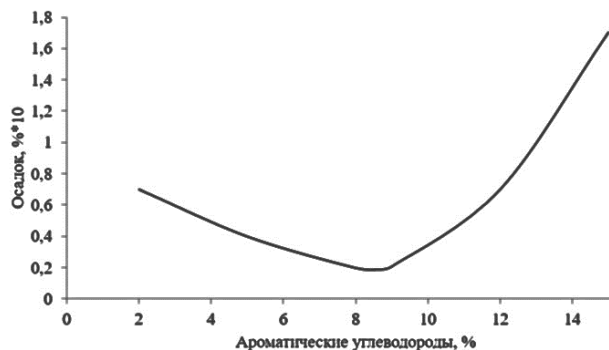


Рис. 1. Зависимость количества осадка от концентрации ароматических углеводородов в модельных смесях

В соответствии с экспериментальными данными из рис. 1 следует, что минимальное количество осадка 0,015 % в масле в процессе его старения образуется при концентрации ароматических углеводородов, в модельной смеси, равной 8,6%. Вместе

с тем увеличение или уменьшение концентрации ароматических углеводородов в модельных смесях сопровождается ростом количества осадка в смесях.

Зависимость количества образовавшейся воды от концентрации ароматических углеводородов, определенная по ГОСТ 7827-75 приведена на рис. 2.

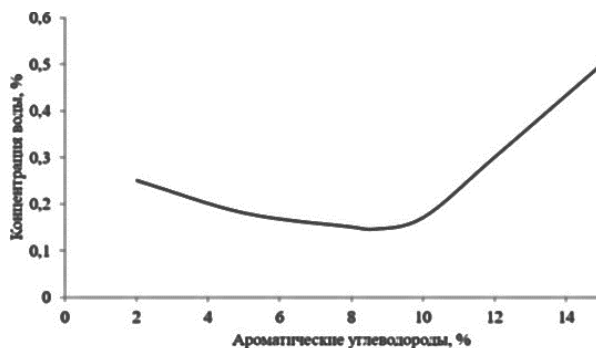


Рис. 2. Зависимость количества образовавшейся воды от концентрации ароматических углеводородов в модельных смесях.

С увеличением концентрации ароматических углеводородов в модельных смесях (1-7) от 2 % до 8 % количество образовавшейся воды в смесях снижается в 1,56 раза. Наименьшее количество воды в модельной смеси, равное 0,0123 %, образуется при концентрации ароматических углеводородов в смеси 8,6 %. Повышение концентрации ароматических углеводородов в смеси до 10 % и 15 %, повышает количество образовавшейся соответственно воды в смеси до 0,018 % и 0,045 %, что указывает на интенсивное старение модельных смесей 5 и 7 в условиях эксперимента.

Следующая серия опытов была поставлена с целью определения диэлектрических характеристик масла. В качестве диэлектрических характеристик были рассмотрены тангенс угла диэлектрических потерь и пробивное напряжение. Тангенс угла диэлектрических потерь определен при температуре 70°C по ГОСТ 6571-75. Пробивное напряжение в модельных смесях (1-7) определяли в соответствии с ГОСТ 6581-75.

Зависимость диэлектрических характеристик масла от его углеводородного состава представлена на рис. 3 и 4. В соответствии с данными рис. 3, с повышением концентрации ароматических углеводородов от 2 % до 8,6 %, тангенс угла диэлектрических потерь понижается в 1,57 раза.

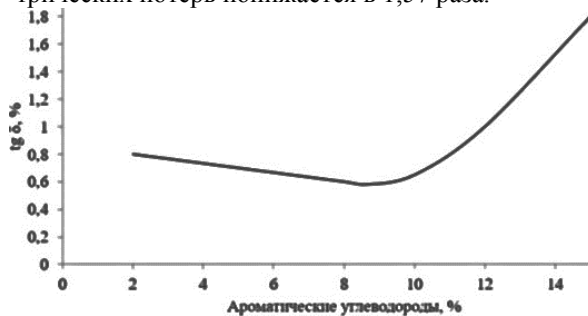


Рис. 3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от концентрации ароматических углеводородов в модельной смеси.

Дальнейшее повышение концентрации ароматических углеводородов в модельной смеси от 8,6 % до 15 % сопровождается увеличением тангенса угла диэлектрических потерь в 3,4 раза. При концентрации ароматических углеводородов в модельной смеси, равной 8,6 %, тангенс угла диэлектрических потерь имеет самое минимальное значение - 0,51 % (рис. 3). Понижение концентрации ароматических углеводородов в модельных смесях от 8,6 % до 2 % сопровождается увеличением тангенса угла диэлектрических потерь до 0,812 %, т. е. 1,6 раза. Достижение величины тангенса угла диэлектрических потерь больше 2 % свидетельствует о наличии дефекта, т. е. тангенс угла диэлектрических потерь относится к диагностическим характеристикам трансформаторного масла. [5].

Влияние концентрации ароматических углеводородов на величину пробивного напряжения показано на рис. 4. Из рисунка следует, что наибольшее значение пробивного напряжения, равное 59,2 кВ, достигается при концентрации ароматических углеводородов в модельной смеси, равной 8,6 %.

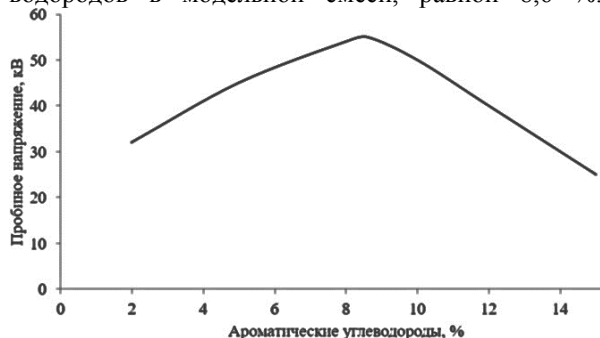


Рис. 4. Зависимость величины пробивного напряжения от концентрации ароматических углеводородов.

Увеличение концентрации ароматических углеводородов в модельной смеси до 15 %, сопровождается снижением пробивного напряжения в 2,3 раза, поскольку при данной концентрации ароматических углеводородов образуется в 3,66 раза больше воды и в 11,3 раза больше осадка, чем при концентрации в смеси равной 8,6 %. Снижение концентрации ароматических углеводородов в модельной смеси до 2 %, способствует уменьшению пробивного напряжения в 1,82 раза, поскольку при низком содержании ароматических углеводородов, играющих роль ингибиторов старения масла, возрастают окислительные превращения углеводородов масла с образованием повышенного количества в смесях осадка и воды [7]. Следовательно, с точки зрения получения максимальной величины пробивного напряжения, масло не должно быть увлажненным и содержать осадок и должно быть высушено и дегазировано (*Дегазация жидкости* — процесс удаления нежелательных растворённых газов (отдельных или всех сразу) из какой-либо жидкости).

На основании полученных экспериментальных данных, с целью наиболее точного описания процессов, протекающих в ходе эксплуатации масла, были составлены математические модели [3, 4]. Описание полученных зависимостей произведено регрессионным анализом, методом планирования

эксперимента (*Планирование эксперимента* - выбор плана эксперимента, удовлетворяющего заданным требованиям, совокупность действий направленных на разработку стратегии экспериментирования (от получения априорной информации до получения работоспособной математической модели или определения оптимальных условий). Это целенаправленное управление экспериментом, реализуемое в условиях неполного знания механизма изучаемого явления) первого порядка. С целью математического описания конкретного вида зависимостей с использованием регрессионного анализа подбирают класс функций, связывающих результирующий показатель y и аргументы x_1, x_2, \dots, x_k , отбирают наиболее информативные аргументы, вычисляют оценки неизвестных значений параметров уравнения связи и анализируют точность полученного уравнения [8, 13]. Для точного описания уравнения регрессии необходимо знать условный закон распределения результирующего показателя y . В данном случае закон распределения выглядит следующим образом: $y_x = ax^2 + bx + c$.

В результате математических расчетов, были найдены уравнения, которые позволяют описать зависимость основных электроизоляционных и эксплуатационных характеристик масла от содержания ароматических углеводородов в его составе.

Уравнение для тангенса угла диэлектрических потерь:

$$y = 0,01655x^2 - 0,20742x + 1,19229 \quad (1)$$

где y – тангенс угла диэлектрических потерь, а x – содержание ароматических углеводородов.

Уравнение для пробивного напряжения:

$$y = -0,16497x^2 + 9,85797x + 14,100 \quad (2)$$

где y – пробивное напряжение, а x – содержание ароматических углеводородов.

Уравнение для концентрации осадка

$$y = 0,02336x^2 - 0,32661x + 1,3 \quad (3)$$

где y – концентрации осадка, а x – содержание ароматических углеводородов

Уравнение для концентрации воды:

$$y = 0,00569x^2 - 0,07819x + 0,38617 \quad (4)$$

где y – концентрации воды, а x – содержание ароматических углеводородов

Расчётные значения оптимальной концентрации ароматических углеводородов, полученные по уравнениям (1-4), максимально точно описывают процессы старения, протекающие в масле. Полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными. Стандартная ошибка составила менее 1,5%, что свидетельствует о высокой точности расчетов.

Таким образом, оптимальная концентрация ароматических углеводородов, входящих в состав модельной смеси, равная 8,6 %, обеспечивает наиболее высокие значения пробивного напряжения, низкое содержание воды и твердого осадка, а так же минимальные потери по электрическому току, что позволяет продлить срок службы маслонеполненного электрического оборудования в современных энергосистемах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С использованием модельных смесей, установлена зависимость эксплуатационных характеристик от группового состава трансформаторного масла.

2. Показано, что при концентрации ароматических углеводородов в смесях, равным 8,6 % можно получить высокие эксплуатационные показатели масла по всем параметрам, дальнейшее повышение концентрации от 8,6 % до 15 % приводит к ухудшению показателей. Экспериментально доказано, что содержание 8,6 % ароматических углеводородов – это оптимальная концентрация их содержания в модельных смесях.

3. На основании полученных данных, с целью оптимизации эксперимента, провели математическое исследование, результатом которого были получены функциональные зависимости. Описание полученных зависимостей произведено регрессионным анализом, методом планирования эксперимента первого порядка. Расчетные данные адекватны экспериментальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурьянов Б. П.** Трансформаторное масло // Государственное Энергетическое Издательство. 1955.
2. **Бубнов И.В., Саблин А.Е.** Статистические характеристики электрической прочности трансформаторного масла для маслonaполненного оборудования // В сборнике: ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА СИГРЭ. Сборник конкурсных докладов по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ по итогам Конкурса докладов в рамках IX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014». ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» 2014. С. 240-244.
3. **Липштейн Р.А., Шахнович М.И.** Трансформаторное масло // Энергоатомиздат. 1983.
4. **Трифонов А.Г.** Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения // Энергоатомиздат. ТетраСистемс. Проблемы энергетики [Электронный ресурс]. <https://www.energyret.ru/jour>. 2005.
5. **Орлов А.И.** Эконометрика. Учебник. М.: Издательство Экзамен. 2002.
6. **Ризванова Г.И., Гафиятуллин Л.Г., Гарифуллин М.Ш., Козлов В.К., Туранов А.Н.** Особенности старения трансформаторного масла в реальных условиях эксплуатации // ИЗВУЗ. Проблемы энергетики [Электронный ресурс]. <https://www.energyret.ru/jour>. №9-10. 2015. С.91-94.
7. **Валиуллина Д.М., Загустина И.Д., Козлов В.К.** Орделение качественного состава примесей в отработанном трансформаторном масле // Вестник КГЭУ [Электронный ресурс]. <https://vkgeu.ru/>. №4 (40). 2018. С. 25-32.
8. **Коваль А.В., Вилданов Р.Р., Гайнуллина Л.Р., Сидоренко А.В., Тутубалина В.П.** Влияние некоторых факторов на эксплуатационные свойства трансформаторного масла // ИЗВУЗ. Проблемы энергетики [Электронный ресурс]. <https://www.energyret.ru/jour>. №1-2. 2005. С.100-104.
9. **Трушкин В.А., Шлюпиков С.В.** Факторы влияющие на старение трансформаторного масла // В сборнике: Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Под редакцией А.В. Павлова. 2013. С. 320-322.
10. **Кисляков М.А., Чернов В.А., Чернышев В.А.** Многопараметрическая оценка качества трансформаторного масла // Электротехника. 2017. № 10. С. 92-97
11. **Вилданов Р.Р., Сидоренко А.В., Тутубалина В.П.** Установка для диагностики трансформаторного масла // Проблемы энергетики [Электронный ресурс]. <https://www.energyret.ru/jour>. №9-10. 2006. С.105-108.
12. **Довгопольный Е.Е.** Масла для Российской энергетики // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2013. № 3. С. 32.
13. **Минлибаев М.Р., Зайнакова И.Ф.** Исследование краткорных дефектов силовых маслonaполненных трансформаторов и обоснование методов диагностики // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов: сборник трудов. 2016. С. 148-151.
14. **Саушев А.В., Шерстнев Д.А., Широков Н.В.** Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Т. 9. № 5. С. 1073-1085.
15. **Марьян О.В.** Приоритетные направления развития российских компаний ТЭК, обусловленные проблемами существующими в Российской и мировой энергетике. // Международный научно-исследовательский журнал. 2012. № 6-1 (6). С. 101-102.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ДИФFUЗОРЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ В ANSYS FLUENT

АННОТАЦИЯ

Доклад посвящен исследованию осевого кольцевого диффузора с цилиндрической втулкой и поперечным оребрением на периферийном обводе, установленного за последней ступенью паровой турбины. Цель исследований - оптимизация его размеров и обеспечение безотрывного течения во всей области течения. Приводится сравнение различных методов стабилизации течения в канале диффузора. Дается анализ результатов расчета диффузора в пакете ANSYS Fluent с заданной закруткой потока на входе в диффузор, имитирующей направление течения за последней ступенью паровой турбины. Показано, что поперечное оребрение является оптимальным способом стабилизации течения с коэффициентом восстановления энергии $\xi_{вос} = 0,3$.

Ключевые слова — паровая турбина, диффузор, оребрение, стабилизация течения, закрутка, ANSYS FLUENT

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов повышения экономичности паротурбинных установок является установка диффузора за последней ступенью паровой турбины для снижения потерь с выходной скоростью. Наиболее эффективная форма такого диффузора - осевой кольцевой диффузор, применение которого ограничивается однопоточными ЦНД паровых турбин средней мощности или однопоточными ЦНД для одновальных парогазовых установок с осевым расположением конденсатора.

На течение в диффузоре, установленном за последней ступенью турбины, влияет структура потока и неравномерность распределения составляющих скорости по радиусу в выходном сечении турбины [1]. К таким факторам относится, прежде всего, закрутка потока не только на нерасчетных режимах работы турбины, но и на расчетном режиме, изменяющаяся по высоте ступени. Закрутка потока до определенного предела может служить фактором стабилизации течения вследствие действия центробежной силы, прижимающей поток к периферийному обводу.

Кроме того, направление вектора скорости не совпадает с продольной осью турбины, а имеет значительную радиальную составляющую из-за раскрытия периферийного меридионального обвода последней ступени и из-за наклона и кривизны линий тока.

Положительным фактором при использовании осевого диффузора является отсутствие окружающей

неравномерности потока за последней ступенью турбины.

Размеры конического кольцевого диффузора зависят прежде всего от длины рабочей лопатки последней ступени паровой турбины l_2 и ее среднего диаметра d_{2cp} , которые формируют входные размеры диффузора. Длина диффузора определяет осевые габариты всей установки и должна быть оптимизирована из условия получения максимального коэффициента восстановления скорости $\xi_{вос}$ и условия безотрывного течения в диффузоре.

Исследование посвящено оптимизации кольцевого осевого диффузора с цилиндрической втулкой для конденсационной паровой турбины в пакете ANSYS Fluent.

2. СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ В ОСЕВЫХ ДИФFUЗОРАХ

В [2] было показано, что без применения специальных методов стабилизации течения максимальный угол раскрытия периферийного обвода α кольцевого диффузора с постоянным диаметром втулки не превышает 7° . При этом коэффициент восстановления скорости, определенный по формуле

$$\xi_{вос} = \frac{P_K - P_{2Z}}{c_{2Z}^2 / 2v_{2Z}},$$

составляет $\xi_{вос} = 0,21$.

Для диффузоров выходных патрубков известны следующие конструктивные приемы, подтвержденные экспериментально, способствующие стабилизации течения в канале [3]:

1. Отсос пограничного слоя, препятствующий возникновению отрыва. Щель отсоса располагают перед сечением отрыва потока. К лучшим результатам приводит отсос потока через перфорированные стенки, хотя в этом случае организация отсоса значительно сложнее. Недостатками этого метода является необходимость источника низкого давления и удаление из канала части потока.
2. Пристеночный вдув потока в пограничный слой в месте кризисных явлений, характеризующих начало возникновения отрыва потока. Струя жидкости с повышенной энергией активизирует течение в пограничном слое, уменьшая его толщину, и создает для течения в ядре потока новую подвижную границу. Эжектирующие свойства струи смещают границу активного потока к периферии.

Для эффективности вдува необходим относительный расход 2,5 – 6 %, к сожалению, требующий отбора из промежуточной ступени турбины.

3. Конструирование продольного оребрения в виде разделительных ребер или продольных канавок. Добавочные поверхности, введенные в поток, увеличивают потери на трение, но способствуют стабилизации течения и уменьшают вибрацию. В результате коэффициент потерь в диффузоре незначительно снижается.
4. Создание поперечного оребрения на стенках диффузора, которое подробно освещается в данной публикации и др.

Для моделирования течения был выбран диффузор паровой турбины, работающей в составе одновальной ПГУ, изображенный на (рис.1).

Размеры диффузора:

наружный диаметр $d_1 = 4.2$ м;

диаметр втулки $d_{вт.} = 1.8$ м = const;

длина $L = 7$ м;

угол раскрытия диффузора $\alpha = 7^\circ - 15^\circ$.

Ребра выполнены в виде канавок 5ммх5мм на внешней стенке с шагом 300 мм.

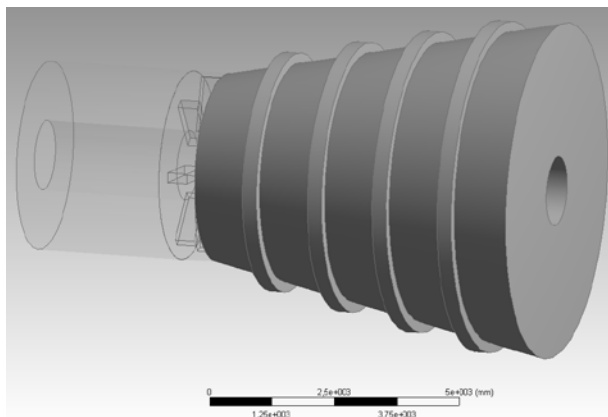


Рис.1. Осевой кольцевой диффузор с поперечным оребрением и цилиндрической втулкой

Расчеты кольцевого диффузора за последнюю ступень паровой турбины с рабочей лопаткой 1200 мм были выполнены И.Б. Лазаревым.

Граничные условия на входе в диффузор имитировали выход из последней ступени: скорость $c_2 = 250$ м/с; окружная составляющая скорости на периферии $c_{2u} = 40$ м/с; распределение окружной составляющей скорости по радиусу по условию $c_{ur} = const$.

3. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДИФфуЗОРА В ПАКЕТЕ ANSYS FLUENT

При проведении различного рода расчетных экспериментов в программных пакетах необходимо при выборе настроек провести сопоставление с опытными данными. Такие исследования были выполнены в [2] с тремя моделями турбулентности: *k-ε*, *SST* и *Reynolds Stress Model*. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных было по-

лучено при использовании *SST* модели турбулентности. Вследствие этого для данного исследования была выбрана *SST* модель турбулентности.

Расчитываемый объект был построен в стандартном модуле *ansys – design modeler*, который в свою очередь имеет все современные методы построения модели. Объект состоит из двух моделей с различной толщиной колец в основной части исследования поля течения исследуемого потока. Также был построен элемент для закручивания потока.

В качестве рабочего тела из справочника ANSYS Fluent выбран водяной пар, шероховатость стенки диффузора задана в подпрограмме *Equivalent Sand Grain Roughness* ($y^+=0.75$), то есть создавалась модель естественного пристеночного слоя.

Построение расчетной сетки сводится к получению сгущения сетки в местах наиболее интенсивного изменения параметров течения: перехода диаметров и элементных выступов. Была выбрана неструктурированная сетка с числом ячеек 600000. Результат построения сетки представлен на рис. 2.

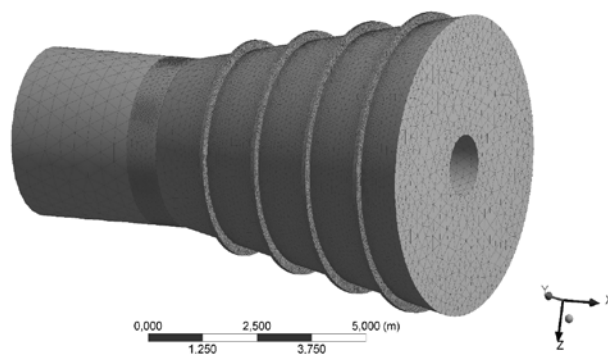


Рис. 2. Построение расчетной сетки для диффузора с поперечным оребрением и цилиндрической втулкой

В виде начальных условий использовалось давление 5000 Па в конденсаторе паровой турбины.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате расчетов диффузора с оребрением внешней стенки были получены поля давлений и скоростей во всей области течения. Исследования показали, что при угле раскрытия диффузора $\alpha = 12^\circ$ отрыв во всей области течения отсутствует, и коэффициент полных потерь при этом $\xi_{п} = 0,7$, соответственно коэффициент восстановления энергии равен $\xi_{вос} = 0,3$.

На рис. 3 приведено поле скоростей в диффузоре с углом раскрытия $\alpha = 12^\circ$, характеризующее стабильность течения с закруткой на входе, имитирующей условия выхода из последней ступени при указанных граничных условиях.

Такой эффект объясняется генерированием серии микроотрывов с поверхности канала в области ребер. Эти микроотрывы инициируют поперечный

перенос массы к поверхности диффузора. Там заторможенный пограничный слой истончается и увеличивает свою устойчивость к микроотрыву.

При этом первую канавку нужно располагать в месте кризисных явлений, характеризующих начало возникновения отрыва потока.

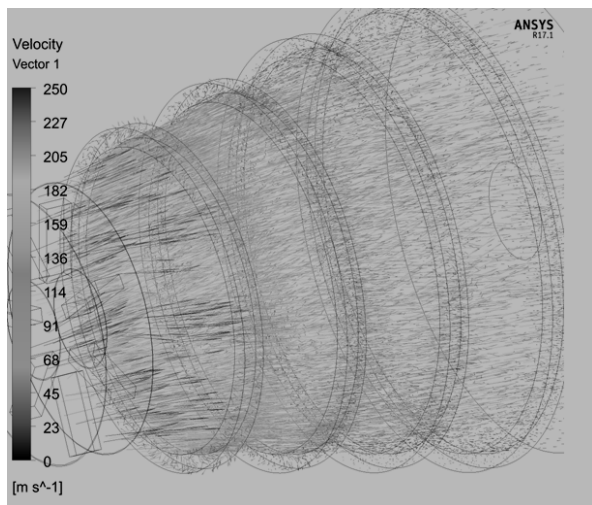


Рис.3. Поле скоростей в диффузоре с поперечным оребрением и углом раскрытия $\alpha = 12^\circ$

Установка поперечных ребер снижает локальный положительный градиент давления в сечении входа в канавку, не уменьшая при этом проходную площадь сечения, а создание с помощью ребер изолированных друг от друга камер для расширения потока способствует стабилизации течения в самой опасной с точки зрения отрыва потока области за счет введения добавочных поверхностей (внутри канавок), увеличивающих сцепление потока с внешней стенкой диффузора.

Такой метод направлен на разрушения сложившегося пограничного слоя, и по сути ведет к сильной турбулизации пристеночной области течения.

Если при гладких поверхностях канала рост угла раскрытия диффузора приводит к очень резкому увеличению потерь именно в связи с интенсивным приближением сечения отрыва к входному сечению диффузора, то при выполнении на поверхности канавок поперечного оребрения возможно получить безотрывное течение при угле раскрытия $\alpha = 10-12^\circ$ и степени расширения $n = 4$, и заметно сократить протяженность отрывных зон при больших углах раскрытия, где периодический отрыв наблюдается только в отдельных местах выходного сечения.

Идея применения диффузора с поперечным оребрением вытекает из механизма возникновения отрыва, согласно которому с приближением к сечению отрыва в пограничном слое кризисным образом начинает падать поперечный градиент напряжения трения у стенки. Для предотвращения этого процесса в зоне, где силы трения обеспечивают увлечение заторможенных нижних слоев жидкости вышележащими слоями, достаточно расположить канавку и отсечь часть жидкости, неспособную двигаться против действующего положительного гра-

диента давления. Ниже по потоку, где может произойти отрыв, следует расположить следующую канавку и т.д. В результате получается канал с оребрением [4]. Таким образом, можно выявить оптимальный шаг канавок.

Вихревая структура, которая отчетливо видна на рис.4, формирующаяся в пристеночной зоне при обтекании каждой канавки, обеспечивает повышенную устойчивость потока к действию положительного градиента давления. Внутри канавки в угловых областях происходит развитие вторичных течений, обусловленных различными значениями касательных напряжений по периметру канавки [2]. Одновременно генерируется система мелкомасштабных вихрей, обеспечивающая повышенный обмен энергией между жидкостью, обтекающей внутреннюю поверхность канавки, и внешним течением. В результате возрастает эффективное напряжение в пристеночной зоне, а средняя толщина пограничного слоя δ уменьшается ростом скорости потока [3].

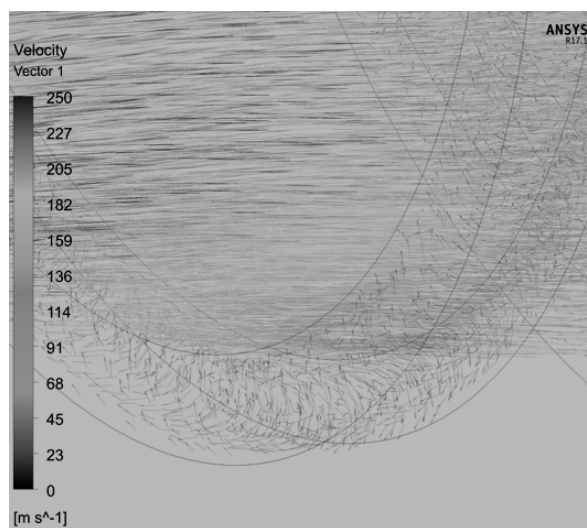


Рис.4. Образование вихря в канавке оребрения

Исследования также показали, что коэффициент полных потерь диффузора с поперечным оребрением зависит от относительной скорости на входе в диффузор M_1 (рис.5).

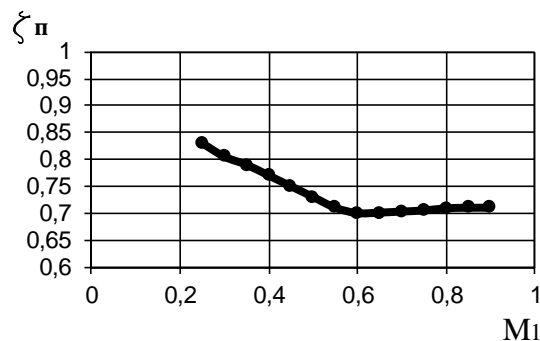


Рис.5. Зависимость коэффициента полных потерь диффузора с поперечным оребрением от относительной скорости M_1

Это является очевидным с точки зрения теории пограничного слоя. Устойчивость течения в пограничном слое полностью определяется этим критерием. Полные потери в диффузоре снижаются с увеличением относительной скорости на входе в диффузор и имеют минимальное значение при относительной скорости $M_1 = 0,6$ (рис.5). При малых относительных скоростях течение вблизи стенок неустойчиво и близко к отрыву, поэтому коэффициент полных потерь увеличивается почти по линейному закону.

Еще более перспективным является модификация поперечного оребрения внешней стенки кольцевого диффузора - применение спиральной конфигурации канавок (рис. 6). Плоскость канавок пересекает ось диффузора под таким углом, чтобы закрученный поток натекал на канавки под прямым углом.

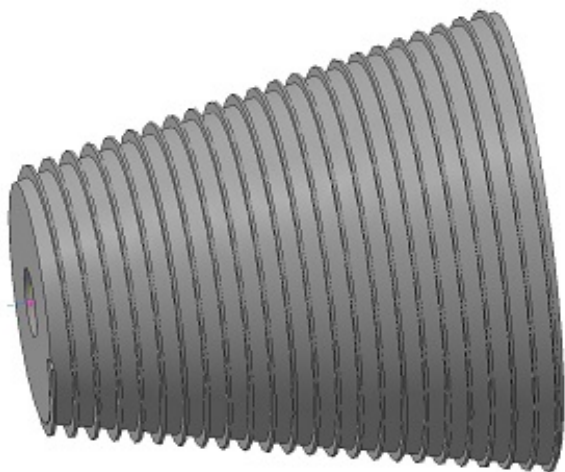


Рис.6. Осевой кольцевой диффузор со спиральной конфигурацией канавок внешней стенки и цилиндрической втулкой

Предлагаемый метод стабилизации течения исследовался в осевом кольцевом диффузоре с идентичными габаритами. Причем рассматривались два варианта спиралей: по закрутке потока на входе и против закрутки. Диффузор со спиральной навивкой канавок против закрутки потока имеет коэффициент восстановления давления $\xi_{вос} = 0,277$ при угле раскрытия 15° против исходного 7° для гладкой поверхности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение пакета ANSYS Fluent для расчета кольцевых диффузоров турбомашин при правильных настройках решателя и использованием SST модели турбулентности позволяет провести детальные их исследования и определить характеристики течения в кольцевом диффузоре. Это дает возможность использовать данную модель как для решения исследовательских задач, так и для обучения студентов в Проблемной лаборатории турбомашин кафедры Паровых и газовых турбин.

Максимальный угол раскрытия внешней стенки осевых кольцевых диффузоров с цилиндрической втулкой, который обеспечивает безотрывное течение на всей длине диффузора, составляет $\alpha = 7^\circ$. При этом коэффициент восстановления энергии в диффузоре достигает $\xi_{вос} = 0,21$. При таких малых углах раскрытия осевые размеры диффузора оказываются очень большими.

Для уменьшения длины кольцевого диффузора при сохранении высокой эффективности рекомендуется использовать поперечное оребрение в форме канавок, которое удобнее, чем организация других методов стабилизации течения в диффузорах, в частности, таких как массообмен на периферийной стенке, т.к. не требует изменения тепловой схемы установки.

При угле раскрытия диффузора $\alpha = 12^\circ$ отрыв во всей области течения отсутствует, и коэффициент полных потерь при этом $\xi_n = 0,7$. При равном отношении площадей выхода и входа F_2/F_1 длина диффузора сокращается на 40% по сравнению с кольцевым диффузором с гладкими стенками, а при винтовой конфигурации канавок на 50%. Уменьшение габаритов паротурбинной установки приносит экономический выигрыш, так как уменьшается длина установки, и снижаются затраты на ее изготовление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зарянкин А.Е.** Выхлопные патрубки паровых и газовых турбин / А.Е. Зарянкин, Б.П. Симонов. М.: Издательство МЭИ, 2002. 273 с.
2. **Богомолова Т.В.** Расчет осевого диффузора за последней ступенью паровой турбины в пакете Fluent / Т.В. Богомолова, И.Б. Лазарев // Труды международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования». М.: Издательский дом МЭИ, 2016. С. 284 – 287.
3. **Зарянкин А.Е.** Механика сжимаемых и несжимаемых жидкостей”. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 590 с.
4. **Зарянкин А.Е.** и др. Патент RU 2469214 С2 14.07.2010.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ В СИСТЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается виртуальная учебная лаборатория по электрическим машинам в дисциплине «Электротехника и электроника» при дистанционном образовании. К виртуальной лаборатории, размещенной на кластере серверов виртуализации, организован доступ с удаленного компьютера с возможностью обмена данными. Рассматривается выполнение виртуальной лабораторной работы по исследованию эксплуатационных свойств двигателя постоянного тока при использовании авторских компьютерных программ, размещенных в виртуальной лаборатории.

Ключевые слова – виртуальная лабораторная работа, дистанционное образование, удаленный доступ, электрические машины

1. ВВЕДЕНИЕ

В Национальном исследовательском университете «МЭИ» (НИУ МЭИ) на кафедре «Диагностических информационных технологий» (ДИТ) в течение ряда лет проводится целенаправленная работа по созданию комплекса электронных образовательных ресурсов к дисциплине «Электротехника и электроника» для подготовки бакалавров по неэлектротехническим направлениям трех институтов НИУ МЭИ: ИТАЭ, ИЭВТ, ЭнМИ [1-5].

В рабочую программу дисциплины входит раздел «Электрические машины», при изучении которого предусмотрены лабораторные работы (ЛР). На кафедре имеются лабораторные стенды с электрическими машинами (ЭМ), на которых проводятся ЛР с целью исследования и изучения студентами их эксплуатационных свойств.

В связи с переводом студентов на дистанционное обучение на кафедре ДИТ совместно с Информационно-вычислительным центром Московского энергетического института (ИВЦ МЭИ) проведена работа по созданию и внедрению в учебный процесс виртуального лабораторного комплекса для дистанционного выполнения ЛР. При этом работа на реальном оборудовании заменяется виртуальной лабораторной работой (ВЛР) на компьютерах с использованием компьютерных моделей (КМ) ЭМ. Виртуальная лаборатория (ВЛ) организована на серверах кафедры ДИТ и ИВЦ МЭИ с обеспечением доступа к ним с удаленного компьютера и возможности обмена данными между сервером и удаленным компьютером. ВЛ содержит комплекс компьютерных программ, позволяющих проводить эксперименты полностью на компьютерных моделях ЭМ, а также методические

указания по выполнению ВЛР. Использование КМ ЭМ в ВЛ позволяет: расширить круг исследовательских задач; автоматизировать обработку экспериментальной информации; ускорить эксперимент и повысить его точность; получить и вывести на экран персонального компьютера в наглядной форме значительно более полную информацию о параметрах, свойствах, характеристиках и режимах ЭМ, чем удастся получить по измерительным приборам на лабораторном стенде; активизировать самостоятельную работу студента, предоставив ему свободу выбора программ исследования; упростить преподавателю проверку отчета студента.

В ВЛ созданы ВЛР по ЭМ для исследования эксплуатационных свойств и характеристик двигателей постоянного тока (ДПТ), асинхронных и синхронных двигателей. В дальнейшем, в качестве примера, рассматривается выполнение ВЛР по ДПТ с использованием средств удаленного доступа.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ УДАЛЕННОГО ДОСТУПА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Обучение в компьютерных классах сегодня является одной из массовых форм практической работы студентов. При работе в компьютерном классе у студента есть возможность непосредственного общения с преподавателем, а преподаватель, в свою очередь, наблюдает весь ход практической работы студента, может контролировать процесс, вносить коррективы в работу студента. Для решения конкретных учебных задач в компьютерных классах устанавливается специализированное программное обеспечение (ПО).

Применение специализированного ПО ведется несколькими способами:

1. Установка ПО на каждый компьютер в классе.
2. Использование инфраструктуры удаленных рабочих столов.
3. Использование компьютера в классе как клиента облачного сервиса по модели SaaS (Software As Service).

Установка ПО на каждый компьютер в классе сопряжена с некоторыми сложностями:

1. Администрирование большого количества инсталляций ПО требует либо специальных средств управления, либо значительного рабочего времени обслуживающего персонала.

2. Далеко не всегда характеристики компьютера в классе соответствуют минимальным требованиям даже для развертывания ПО.

Использование инфраструктуры удаленных рабочих столов вместе с системами виртуализации или облачных сервисов (в модели частного облака) устраняют эти сложности. В НИУ МЭИ используются три кластера систем виртуализации. Два кластера используют VMware ESX, третий кластер работает на базе Proxmox Virtual Environment (версии свободно-распространяемого гипервизора kvm/qemu).

При проведении практических занятий в удаленном режиме преподаватель должен иметь следующие возможности:

1. Задавать время начала и окончания занятия в соответствии с расписанием.
2. Контролировать ход выполнения студентами заданий.
3. Ограничивать доступ к занятию посторонних лиц при помощи пароля.
4. Регистрировать студентов и протоколировать их действия.
5. Организовать обратную связь со студентами во время занятия.

Удаленный режим возможно организовать через видеоконференцию с использованием программ Zoom, Webex, Mind или аналогичных. Видеоконференция создается и запускается преподавателем. Студенты запускают соединение с сетью ВУЗа (чаще всего через VPN), регистрируются в видеоконференции, затем запускают средство удаленного доступа к рабочим столам компьютеров и запускают нужное ПО.

Кафедра ДИТ совместно с ИВЦ МЭИ для организации удаленного доступа к ВЛ использовали «Кабинет для практических занятий» в Cisco Webex.

Сервис «Кабинета для практических занятий» состоит из двух частей:

1. Программное обеспечение агента Webex Access Anywhere, устанавливаемое на компьютер ВУЗа (физический или виртуальный).
2. Средство управления кабинетами для практических занятий в составе Cisco Webex Training Center.

Эти средства позволяют подключать виртуальные машины (VM) с установленным на них агентом Webex Access Anywhere к занятию, организованному в Webex Training. VM создавались с использованием средств гипервизора. На VM были установлены Windows и необходимое прикладное ПО для проведения ВЛР.

Применение «Кабинета для практических занятий» позволяет:

1. Задать время начала и окончания занятия. VM доступны студентам только в рамках запланированного занятия.
2. Резервировать VM для самостоятельного выполнения ВЛР.
3. Выделять одну VM на несколько студентов.

В процессе занятия преподаватель может назначать студентам VM и следить за выполнением задания, организовать запись действий студента на VM, устанавливать со студентами голосовую связь или связь через чат, подключаться к VM, на которой работает студент.

Рассмотренный подход организации удаленного режима не требует дополнительных действий по организации доступа к VM – не нужно запускать VPN, запускать средства удаленного доступа – все доступно через приложение Webex Training или в WWW-браузере.

3. ВЛР «ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

Выполнение ВЛР начинается после удаленного подключения к ВЛ. На рабочем столе ВЛ имеется папка с ВЛР по ДПТ, которая содержит:

- программу-интерфейс (ПИ);
- КМ ДПТ;
- методические указания, содержащие описание ЛР и КМ ДПТ.

ЛР в ВЛ выполняются под управлением и контролем ПИ, в которой проводится:

- ввод персональных реквизитов студента;
- генерация и представление индивидуальных заданий к ЛР;
- проверка подготовки к занятию;
- ручной ввод и проверка результатов экспериментов на КМ и расчетов;
- автоматизированное построение характеристик ЭМ по полученным результатам моделирования;
- вывод протокола с таблицей детальных и сводных результатов выполнения ВЛР;
- автоматическое сохранение протокола в базе данных.

Использование КМ при выполнении ВЛР позволяет исследовать основные эксплуатационные свойства ДПТ путем моделирования следующих режимов работы:

- Пуск:
 - с помощью пускового реостата;
 - при пониженном напряжении, подводимом к якору двигателя.
- Изменение момента сопротивления на валу.
- Регулирование частоты вращения:
 - введением регулировочного реостата в цепь якоря;
 - введением регулировочного реостата в цепь возбуждения;
 - изменением напряжения на якоре.

На рис. 1 представлен вид главного окна КМ ДПТ. Главное окно можно разделить на несколько зон и окон по их функциональным назначениям: 1 – окна номинальных параметров; 2 – окна, в которых формируются текущие значения основных электромеханических параметров во время моделирования; 3 – зона задания схемы возбуждения; 4 – зона управления; 5 – окно выбора типа двигателя из базы данных; 6 – зона

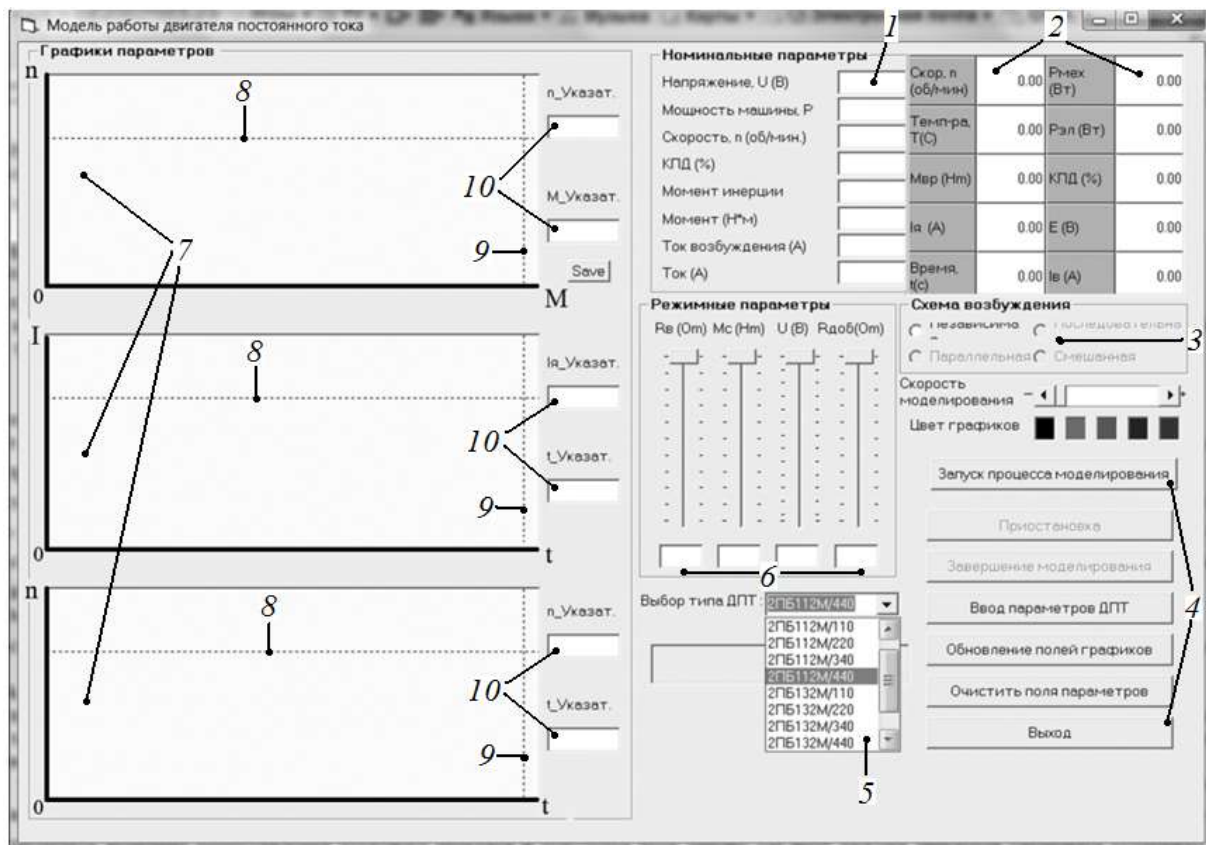


Рис. 1. Вид главного окна КМ ДПТ.

регулировки режимных параметров; 7 – зона отображения графических зависимостей; 8 – горизонтальные визирные линейки; 9 – вертикальные визирные линейки; 10 – окна, где указываются значения параметров, установленных визирными линейками.

Зона управления 4 представлена кнопками:

- «Запуск процесса моделирования» — запускается компьютерная программа.

- «Приостановка» — выполняется приостановка моделирования. После нажатия кнопка изменяет свое название на «Продолжить процесс моделирования».

- «Завершение моделирования» — выполняется моментальная остановка процесса моделирования.

- «Ввод параметров ДПТ» — выполняется ввод из базы данных номинальных параметров выбранного двигателя. Эти параметры автоматически записываются в исходные данные и отображаются в окнах зоны 1.

- «Обновление полей графиков» — выполняется очистка графиков, в том числе во время процесса моделирования.

- «Очистить поля параметров» — выполняется удаление параметров из зоны задания исходных данных. Кнопка доступна при незапущенном или завершенном процессе моделирования.

- «Выход» — выполняется завершение работы программы.

В программе предоставляется возможность выбрать тип двигателя из базы данных серийных ДПТ. Для этого необходимо открыть окно «Выбор типа ДПТ» и выделить в зоне 5 тип выбранного двигателя. Номинальные параметры выбранного двигателя вводятся в программу кнопкой «Ввод параметров ДПТ» в зоне управления 4. В зоне 7 располагаются три графика: частота вращения ротора от момента на валу (механическая характеристика); ток якоря от времени; частота вращения от времени. Характеристики строятся в процессе моделирования режимов работы.

Режимы работы двигателя задаются следующими параметрами, к которым относятся: напряжение источника (U), сопротивления регулировочных резисторов в цепях обмоток возбуждения ($R_{в}$) и якоря ($R_{доб}$), момент сопротивления на валу (M_c). Значения режимных параметров задаются в зоне 6 вводом численных значений в соответствующие окна или путем перемещения подвижных ручек. Исходные значения параметров двигателя задаются перед началом моделирования. В процессе моделирования можно изменять эти значения и тем самым изменять режим работы ДПТ. Регулировочный резистор в цепи якоря ($R_{доб}$) используется и в качестве пускового (для реостатного пуска ДПТ) и в качестве регулировочного (для регулирования частоты вращения ДПТ). На каждом графике в зоне 7 имеются две визирные линейки (горизонтальная 8 и вертикальная 9). Устанавливая эти линейки курсором мыши, можно получить в окнах 10 рядом

с графиками значения параметров для любого момента времени.

Порядок выполнения ВЛР следующий.

1. Подготовка к работе.

До начала выполнения ВЛР студент должен, используя методические указания:

- ознакомиться с порядком управления КМ;
- выбрать из таблицы, в которой заданы параметры серии ДПТ, тип двигателя (согласно номеру, под которым студент записан в групповом журнале) и записать его паспортные данные;
- рассчитать параметры двигателя, указанные в задании ($P_{1ном}$, $\eta_{ном}$, $M_{ном}$).

2. Выполнение ВЛР (рабочее задание).

2.1. Загрузить ПИ «Эксплуатационные свойства ДПТ». В стартовом окне ввести свои данные: ФИО, номер группы и номер в списке группы (Рис. 2).

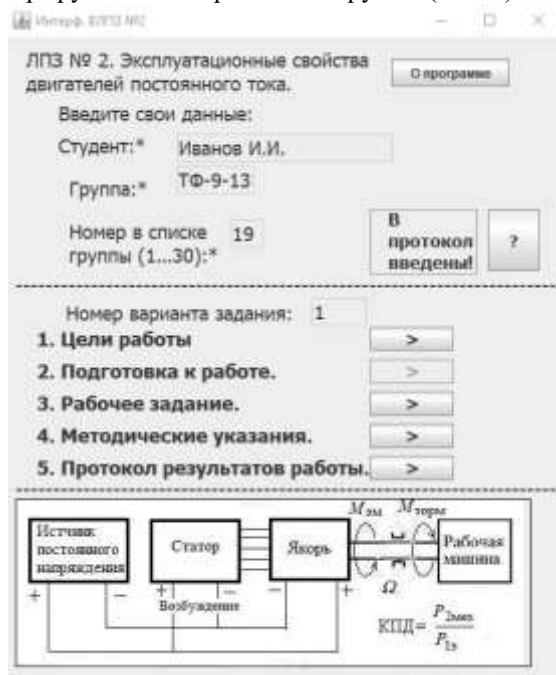


Рис. 2. Пример стартового фрейма интерфейса ВЛР.

В окне «Подготовка к работе» (Рис. 3) проверить соответствие типа и номинальных параметров ДПТ выбранному варианту. Ввести для проверки значения параметров, рассчитанные при подготовке к работе. Все значения должны иметь оценку «Правильно».

2.2. Запустить КМ ДПТ.

Выбрать тип двигателя из базы данных компьютерной модели. Произвести пуск ДПТ с помощью пускового реостата при отсутствии нагрузки на валу. Определить броски пускового тока ($I_{пуск}$) и пускового момента ($M_{пуск}$), рассчитать кратности пускового тока ($K_I = I_{пуск}/I_{ном}$) и пускового момента ($K_M = M_{пуск}/M_{ном}$). Определить частоту вращения при холостом ходе (n_x). Ввести в ПИ и проверить значения $I_{пуск}$, $M_{пуск}$ и n_x , а также рассчитанные значения K_I , K_M .

Снять участок естественной механической характеристики $n(M)$ двигателя, увеличивая момент от нуля до номинального значения.

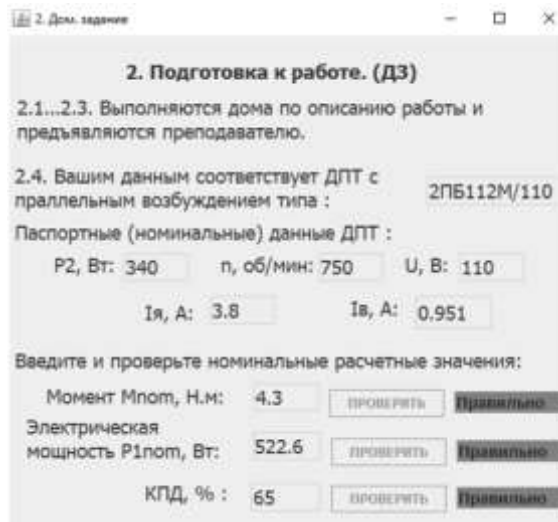


Рис. 3. Проверка результатов домашней подготовки.

Построить рабочие характеристики. С этой целью для трех значений момента сопротивления на валу ($M_c = 0$; $M_c = 0,5M_{ном}$; $M_c = M_{ном}$) определить на КМ и ввести в ПИ значения: частоты вращения n , момента (M), КПД (η), механической мощности ($P_{мех}$). При нажатии на кнопку «V» в ПИ на экране построятся в относительных единицах механическая и рабочие характеристики ДПТ (рис.4.5).

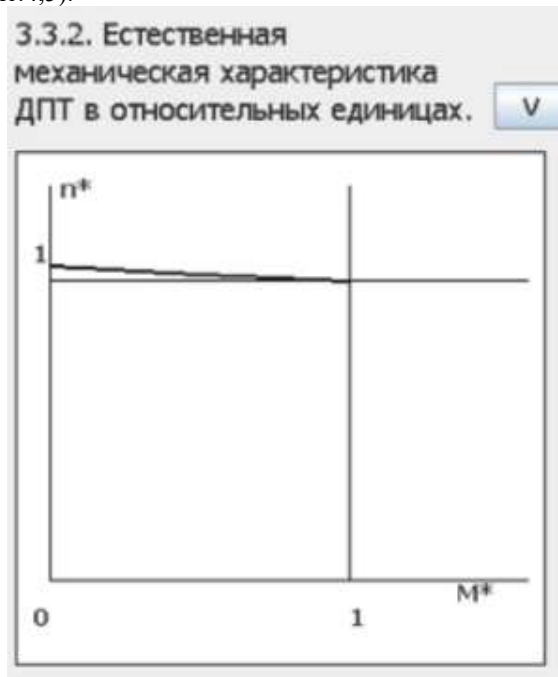


Рис. 4. Один из пунктов рабочего задания: построение естественной механической характеристики ДПТ.

2.3. Исследовать реостатный, полусный и якорный способы регулирования частоты вращения. На рис.6 в качестве примера приведены, полученные на КМ, временные диаграммы изменения тока якоря и частоты вращения для следующих режимов.



Рис. 5. Один из пунктов рабочего задания: построение рабочих характеристик ДПТ.

$0 - t_1$ – реостатный пуск двигателя без нагрузки на валу. При разгоне якоря двигателя сопротивление пускового реостата уменьшается ступенями, при этом возникают импульсы тока. Когда частота вращения достигнет установившегося значения, пусковой реостат выводится полностью и двигатель перейдет в установившийся режим работы при холостом ходе.

$t_1 - t_2$ – установившийся режим работы ДПТ при холостом ходе.

$t_2 - t_3$ – увеличения момента сопротивления (нагрузки) на валу. Из графиков виден процесс саморегулирования, который заключается в том, что при увеличении момента сопротивления протекает электромеханический переходный процесс, во время которого ток якоря и вращающий момент возрастают, а частота вращения несколько уменьшается.

$t_3 - t_4$ – реостатное регулирование частоты вращения путем увеличения сопротивления регулировочного реостата в цепи якоря. Из графиков видно, что при увеличении сопротивления в цепи якоря происходит электромеханический переходный процесс, сопровождающийся уменьшением тока якоря и частоты вращения, затем ток якоря увеличивается и достигает первоначального значения. По окончании переходного процесса наступает новый установившийся режим с меньшей частотой вращения.

По результатам выполнения ВЛР в ПИ формируется «Протокол результатов работы» (рис.7). В протоколе за каждое задание формируется балл, указывается время выполнения отдельных пунктов задания и всей работы, сколько допущено ошибок и сколько всего набрано баллов. Каждая ошибка приводит к снижению общего количества баллов.

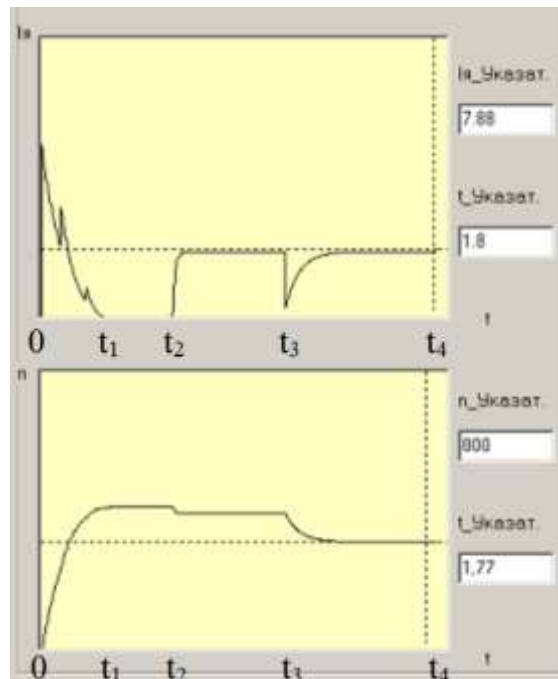


Рис.6. Временные диаграммы изменения тока якоря и частоты вращения при моделировании нескольких режимов работы ДПТ.

3. Формирование кратких выводов о пусковых свойствах, свойстве саморегулирования и способах регулирования частоты вращения ДПТ.

Результаты работы собираются студентом в электронный отчет из снимков форм, полученных в ПИ и в КМ, в последовательности выполнения задания:

- стартовой формы ВЛР, где студент вводил свои реквизиты (см. рис.2);
- промежуточных форм, где вводились контрольные числа;
- форм главного окна КМ с графиками зависимостей для всех исследуемых режимов;
- формы Протокола со сводкой результатов работы (см. рис.7).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение ВЛ с удаленным доступом позволяет заменить реальную лабораторию ЭМ, что очень важно при дистанционном образовании. На кафедре ДИТ МЭИ, используя ВЛ, только в ноябре месяце 2021 года было выполнено 180 ВЛР.

2. ВЛР позволяют расширить круг исследовательских задач, обеспечить полную индивидуальность заданий, активизировать самостоятельную работу студента, что способствует получению студентами более глубоких знаний.

3. Протокол, формируемый по результатам выполнения ВЛР, дает достаточно полную информацию об умениях и знаниях студентов по исследуемой теме.

5. Протокол результатов

5. Протокол результатов работы

ГПТ №2.ДПТ.

Ф.И. О. студента: Коваленко Д.А. Номер группы: А-15-19 Номер студента в группе: 15

Дата начала: 28 Ноябрь 2021 Время начала: 16:55:13 Время окончания: 17:47:50

Получено баллов: 89.8 из 90.0 , успешность (%): 99.77 , допущено ошибок: 1

Работа: **Завершена** Сводная таблица:

№ п/п.	№ пункта	№ вопроса	Величина	Значение	Время от...	Макс. балл	Ошибка	Балл
1	2.	2.4	Мном,Нм	15.28	16:55:57	5	0	5.0
2	2.	2.4	P1ном, Вт	2108	16:55:57	5	0	5.0
3	2.	2.4	КПД,%	76	16:55:58	5	0	5.0
4	3.	3.2.1	Iр1	19.07	16:56:55	5	0	5.0
5	3.	3.2.1	Мр1	36.26	16:56:55	5	0	5.0
6	3.	3.2.1	Iр1	2.48	16:56:56	5	0	5.0
7	3.	3.2.1	Кмр1	2.37	16:56:56	5	0	5.0
8	3.	3.2.1	nх,об/мин	1052	16:56:57	5	0	5.0
9	3.3	3.3.4	Rя,Ом	1.43	16:59:37	5	0	5.0
10	3.4	3.4.1	Rяр,Ом	5.45	17:04:14	5	0	5.0
11	3.4	3.4.2	n1,об/мин	800	17:10:07	5	0	5.0
12	3.4	3.4.2	Iа1,А	7.85	17:10:08	5	0	5.0
13	3.5	3.5.1	n2,об/мин	1082	17:45:58	5	0	5.0
14	3.5	3.5.1	Iя2,А	8.32	17:45:59	5	0	5.0
15	3.5	3.5.1	n2х,об/мин	1143.57	17:46:00	5	0	5.0
16	3.6	3.6.1	n3,об/мин	789.47	17:41:26	5	1	4.8
17	3.6	3.6.2	Iя3,А	7.66	17:41:31	5	0	5.0
18	3.6	3.6.2	n3х,об/мин	841.57	17:40:30	5	0	5.0

Рис.7. Протокол результатов выполнения ВЛР по ДПТ.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

НИУ МЭИ — Национальный исследовательский университет «МЭИ»;
 Кафедра ДИТ — кафедра «Диагностических информационных технологий»;
 ИТАЭ — институт тепловой и атомной энергетики;
 ИЭВТ — институт энергоэффективности и водородных технологий;
 ЭнМИ — институт энергомашиностроения и механики;
 ЛР — лабораторная работа;
 ЭМ — электрическая машина;
 ИВЦ МЭИ — Информационно-вычислительный центр Московского энергетического института;
 ВЛР — виртуальная лабораторная работа;
 КМ — компьютерная модель;
 ВЛ — виртуальная лаборатория;
 ДПТ — двигатель постоянного тока;
 ПО — программное обеспечение;
 ВМ — виртуальная машина;
 ПИ — программа – интерфейс;
 U — напряжение источника, В;
 R_d — сопротивление регулировочного резистора в цепи обмотки возбуждения, Ом;
 $R_{доб}$ — сопротивление регулировочного резистора в цепи обмотки якоря, Ом;
 M_c — момент сопротивления на валу, Нм;
 $P_{1ном}$ — электрическая номинальная мощность, Вт;
 $\eta_{ном}$ — номинальный КПД, %;
 $M_{ном}$ — номинальный момент, Нм;
 $I_{пуск}$ — пусковой ток, А;
 $M_{пуск}$ — пусковой момент, Нм;
 K_I — кратность пускового тока;
 K_M — кратность пускового момента;
 n_x — частота вращения при холостом ходе, об/мин;
 $P_{мех}$ — механическая мощность, Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электротехника** и электроника. В 3т. Т.2. Электромагнитные устройства и электрические машины: учебник и практикум для академического бакалавриата./ В.И. Киселев, Э.В. Кузнецов, А.И. Копылов; под общ. ред. В.П. Лунина.- 2-е изд. перераб. и доп.- М.:Издательство Юрайт, 2017.-184 с. – Серия: Бакалавр. Академический курс. Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника и практикума для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям.
2. **E.V. Kuznetsov, V.I. Kiselev, E.A. Kulikova** “Innovative technologies in course Electrical engineering and electronics” IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012374.
3. **Инновационные** технологии в дисциплине «Электротехника и электроника». Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 9-11 октября 2017г.) в 2т. Т. 2 – М.: Издательский дом МЭИ, 2017 – 410с. С. 392 – 394.
4. **Киселев В.И., Кузнецов Э.В., Луин В.П.** Программа для моделирования режимов работы двигателей постоянного тока (DCM_MPEI_1). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 10 апреля 2018г. № 2018614523.
5. **A. A. Stoliarov, V. I. Kiselev and E. V. Kuznetsov**, "Virtual Laboratory of Electric Motor in the Discipline of "Electrical Engineering and Electronics", 2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, 2020, pp. 1-4

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва (1)
 Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва (2)

ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАТФОРМЫ "GOOGLE COLABORATORY" ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрена возможность применения платформы **Google Colaboratory** [1] в учебном процессе на примере расчета пластинчатого теплообменника. В работе приводится постановка задачи расчета пластинчатого теплообменника, обзор возможностей платформы, интерфейс пользователя и представления результатов расчетов. В заключении делаются выводы о применимости платформы для учебного процесса, в том числе формате дистанционного обучения.

Ключевые слова – Google Colaboratory, учебный процесс, дистанционное обучение, пластинчатый теплообменник, оптимизация, облачные вычисления, текстовый редактор

1. ВВЕДЕНИЕ

Платформа **Google Colaboratory** — это облачный текстовый редактор с возможностью проведения фоновых вычислений. Вычисления могут проводиться на CPU и/или GPU. Программы записываются на языке **python** [2] в среде **ipython notebook** [3]. Сервис предоставляется бесплатно при наличии аккаунта Google [4], однако время использования GPU ограничено 12 часами в сутки (существует профессиональная проприетарная версия без ограничения времени, но для жителей России она не доступна).

Существует ряд работ в которых авторы рассматривают возможность применения облачных сервисов, в том числе **Google Colaboratory** для преподавания различных дисциплин [5–12].

Язык **python** — распространенный язык в науке и веб разработке. Множество программ написанных на других языках имеют интерфейс (API) на языке **python**, что позволяет писать код на одном языке и значительно расширяет возможности программиста.

Формат **ipython notebook** — это среда, в которой код программы разбивается на блоки. Запуск программы представляет собой последовательное выполнение этих блоков. Последовательность выполнения блоков задает пользователь. Запуск блоков можно осуществлять как вручную, так и автоматически. Такой формат удобен для создания небольших проектов, прототипов расчетов и экспериментов, что и является основным практическим занятием обучаемых.

Сервис позволяет работу с проектом множества людей одновременно, доступ с любого устройства из любой точки мира, сохранение и загрузку данных из облачного хранилища **Google Drive** [13].

2. ЗАДАЧА РАСЧЕТА ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Пластинчатый теплообменник – рекуперативный теплообменный аппарат с теплообменными поверхностями в виде пластин (рис. 1). В зазорах между пластинами происходит течение двух потоков теплоносителя — греющего и нагреваемого (“горячего” и “холодного”). Направление потоков теплоносителей, как правило выбирается навстречу друг другу (“противоток”).

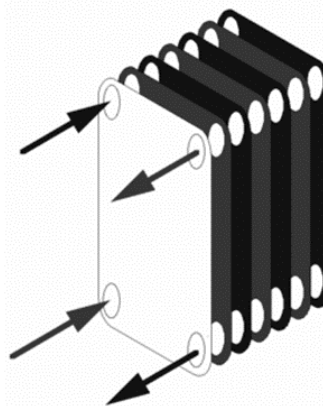


Рис. 1. Принципиальная схема пластинчатого теплообменника. Левый верхний патрубок — вход “холодного” теплоносителя, правый нижний патрубок — выход “холодного” теплоносителя, левый нижний патрубок — вход “горячего” теплоносителя, правый верхний патрубок — выход “горячего” теплоносителя. Направление потоков — противоток.

Расчет теплообменника состоит из нескольких этапов [14–19]:

- 1) Определение тепловых и гидравлических свойств теплоносителей и материалов теплообменника,
- 2) Определение геометрических характеристик каналов теплоносителей,
- 3) Решение уравнения теплового баланса совместно с уравнением неразрывности,
- 4) Определение числа Рейнольдса (Re),
- 5) Определение числа Прандтля (Pr),
- 6) Определение числа Нуссельта (Nu),
- 7) Определение температурного напора,
- 8) Решение уравнения теплопереноса,
- 9) Вычисление размеров теплообменника,
- 10) Определение числа Эйлера (Eu) и потери давления на прокачку теплоносителей.

При необходимости оптимизировать один или несколько параметров теплообменника (целевые параметры), например величину потерь давления на прокачку теплоносителя и/или площадь поверхностей теплообмена, решается задача оптимизации, т. е. проводится множество расчетов с варьированием других (входных) параметров с целью определения таких входных параметров, которые соответствуют оптимальному значению целевых. Для решения этой задачи, можно использовать открытые **python** библиотеки, например **Optuna** [20] или **Hyperopt** [21]. Однако, это выходит за рамки данной работы, но в качестве примера, в работе приводится пример простого перебора нескольких входных параметров: число пластин, тип пластин, параметры поверхности пластин, а также построение графиков зависимости целевых параметров от входных.

3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ В СРЕДЕ GOOGLE COLLABORATORY

Решение задачи доступно для просмотра, выполнения и скачивания по ссылкам: **Google Colaboratory** [22] или **GitHub** [23].

Текст в среде **Google Colaboratory** разбивается на блоки двух типов: “код” и “текст”. В блоках “код” записывается код программы на языке **python** (рис. 2).

```

class GnielinskiPetukhov(Correlation):
    """Gnielinski correlation with Petukhov approximation of Darcy friction factor

    Nu = f(Re, Pr, f) = (f/8)*(re - 1000)*pr/(1 + 12.7*(f/8)**0.5*(pr**0.667 - 1))
    f = (0.79*ln(re) - 1.65)**-2 (Darcy friction factor, Petukhov)

    https://en.wikipedia.org/wiki/Nusselt_number#Gnielinski_correlation
    """
    def __init__(self, re_lim=(3000, 5e6), pr_lim=(0.5, 2000)):
        super().__init__()
        self.re_lim, self.pr_lim = re_lim, pr_lim

    def __call__(self, re=None, pr=None, **kwargs):
        for v, lim in [(re, self.re_lim), (pr, self.pr_lim)]:
            if v is None or not lim[0] <= v <= lim[1]:
                return None
        f = (0.79*np.log(re) - 1.65)**-2
        return (f/8)*(re - 1000)*pr/(1 + 12.7*(f/8)**0.5*(pr**2/3 - 1))

class DittusBoelter(Correlation):
    """Dittus-Boelter correlation

    Nu = f(Re, Pr) = c * Re**n * Pr**m
    """

```

Рис. 2. Блок “код”.

В блоке типа “код” можно задавать входные параметры расчета с помощью элементов интерфейса пользователя, например: текстовые и числовые поля, slider (слайдер), dropdown (выпадающий список), поля выбора даты/времени и т. п. (рис. 3).

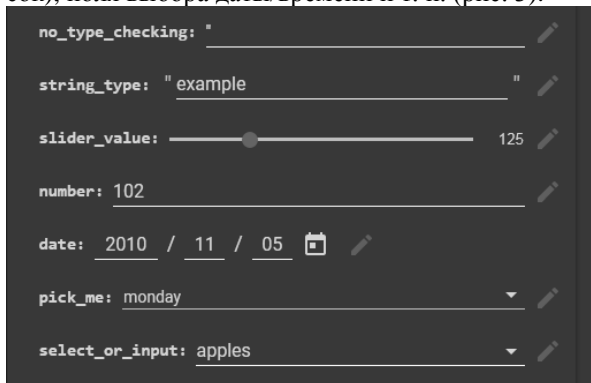


Рис. 3. Элементы интерфейса пользователя.

В блоках типа “текст” — простой текст, табли-

цы, рисунки в формате **Markdown** [24], а также текст и формулы в формате **LaTeX** [25] (рис. 4).

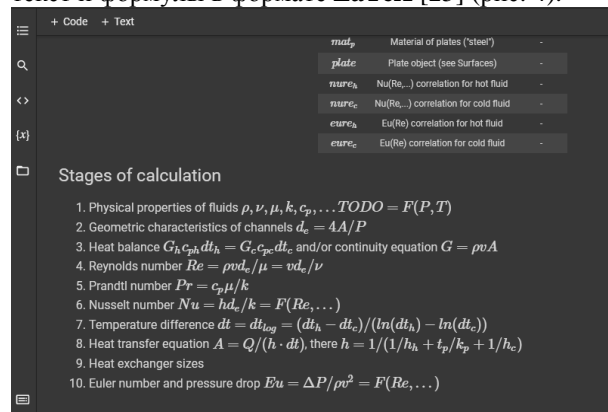


Рис. 4. Блок “текст”.

Блоки можно структурировать и перемещаться по ним при помощи оглавления (рис. 5):

- 1) **Plate heat exchanger** — описание задачи и справочные данные,
- 2) **Import modules** — импорт библиотек **python**,
- 3) **Correlations** — корреляции числа Нуссельта (Nu) и числа Эйлера (Eu) от числа Рейнольдса (Re),
- 4) **Surfaces** — расчет геометрических характеристик пластин,
- 5) **Heat Exchanger** — расчет теплообменника согласно п. 2,
- 6) **Calculations** — многовариантные расчеты и их результаты.

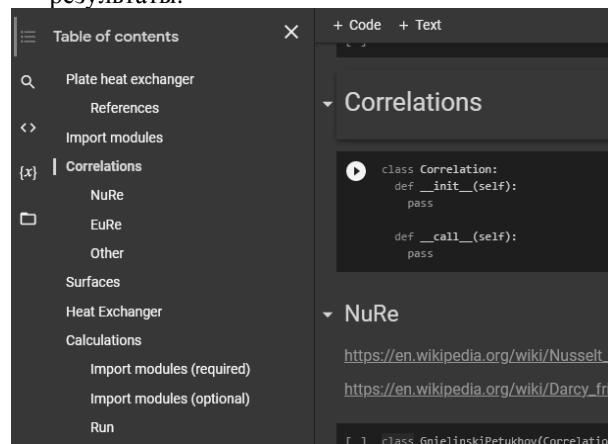


Рис. 5. Многоуровневое оглавление.

Для удобства отладки кода, в среде реализован инспектор значений переменных расчета (рис. 6).

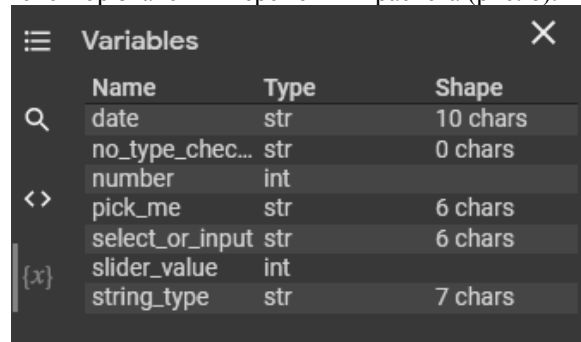


Рис. 6. Инспектор переменных расчета.

Блоки типа “код” имеют поле с выходными данными, в которое можно выводить текст, графики,

таблицы и другие данные полученные в результате расчета (рис. 7 и 8). Графики построены с помощью библиотеки `seaborn` [26].

Для создания графиков и другой визуализации результатов можно использовать различные библиотеки `python`, например:

- 1) **matplotlib** — основная библиотека визуализации языка `python` [27];
- 2) **seaborn** — библиотека для визуализации статистических данных, основана и расширяет возможности `matplotlib` [26];
- 3) **plotly** — популярная библиотека для создания интерактивных визуализаций, в том числе в формате `dashboard` (панель индикаторов) [28];
- 4) **bokeh** — библиотека для создания интерактивных визуализаций для веб-браузеров [29];

5) **altair** — библиотека для создания интерактивных визуализаций в декларативном стиле [30].

Выходные данные могут быть сохранены на локальный компьютер, а также напрямую в облако **Google Drive** или другие удаленные серверы. Аналогичным образом можно работать и с входными данными, например, преподаватель размещает в облаке данные для расчета, обучаемые передают их в программу, которая выполняется удаленно в облаке и затем сохраняют результаты расчета в том же облаке. Это позволяет значительно сократить время на передачу данных и при необходимости, времени на их корректировку.

Расчетный код можно автоматически загружать в репозиторий **GitHub** [31], что значительно упрощает процедуру распространения знаний и обменом опытом.

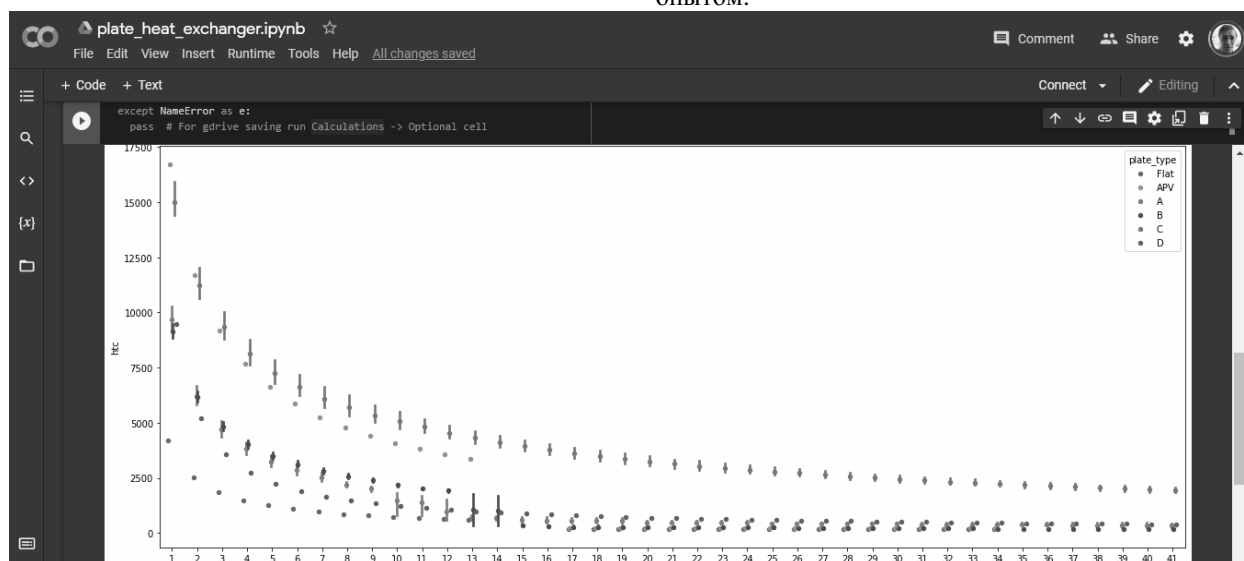


Рис. 7. Выходные данные блока “код” в виде графика на примере зависимости коэффициента теплопередачи теплообменника (ось ординат) от количества и типа пластин (ось абсцисс и легенда соответственно).

Profile	KBeta	KE	KF	KL	KM	KP	KRe_c	KRe_h	KV	KW	htc
A	1.694 - 2.181	0.994 - 1.000	0.256 - 1.048	0.552 - 0.603	0.256 - 1.048	1.039 - 108.493	0.557 - 0.933	0.557 - 0.933	0.128 - 0.567	0.070 - 7.843	242.037 - 10681.473
APV	1.000 - 1.000	1.000 - 1.001	0.175 - 0.896	1.000 - 1.000	0.175 - 0.896	0.175 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	0.175 - 0.896	0.175 - 1.000	214.211 - 16728.741
B	0.926 - 1.340	1.000 - 1.000	0.310 - 1.794	0.993 - 0.993	0.310 - 1.794	0.083 - 19.973	0.734 - 1.116	0.734 - 1.115	0.231 - 1.339	0.060 - 12.875	173.518 - 9638.566
C	1.366 - 3.447	0.999 - 1.000	0.049 - 0.297	0.552 - 0.603	0.049 - 0.297	0.369 - 8.749	0.734 - 1.116	0.734 - 1.115	0.015 - 0.199	0.026 - 1.255	1814.389 - 16313.733
D	1.002 - 1.031	1.000 - 1.000	0.245 - 0.599	1.000 - 1.000	0.181 - 0.459	0.237 - 4.259	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	0.237 - 0.598	0.237 - 4.259	397.296 - 9476.317
Flat	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	1.000 - 1.000	178.812 - 4191.189

Рис. 8. Выходные данные блока “код” в виде таблицы на примере диапазона изменения параметров эффективности теплообменника (столбцы) при варьировании входных параметров для каждого из типов пластин (строки).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Платформа **Google Collaboratory** — это удобный сервис для применения в процессе обучения студентов. Он бесплатный, облачный и доступный каждому в любой точке мира.

Широкое распространение сервиса среди научных работников по всему миру позволяет обучаемым получать актуальные навыки, знакомиться с

проектами других людей и развивать международную коллаборацию.

В эпоху дистанционного обучения использование сервиса значительно упрощает взаимодействие между участниками процесса за счет возможности онлайн редактирования, презентации и запуска, в том числе в группе с другими студентами и/или преподавателем.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

API — application programming interface, программный интерфейс приложения;
CPU — central processing unit, центральное процессорное устройство;
GPU — Graphics Processing Unit, графический процессор;
Eu — число Эйлера;
Nu — число Нуссельта;
Pr — число Прандтля;
Re — число Рейнольдса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Google Colaboratory** [Electronic resource]. URL: <https://colab.research.google.com/> (accessed: 12.12.2021).
2. **Python** [Electronic resource] // Python.org. URL: <https://www.python.org/> (accessed: 12.12.2021).
3. **The Jupyter Notebook** — IPython [Electronic resource]. URL: <https://ipython.org/notebook.html> (accessed: 12.12.2021).
4. **Google Account** [Electronic resource]. URL: <https://www.google.com/account> (accessed: 12.12.2021).
5. **Kuroki M.** Using Python and Google Colab to teach undergraduate microeconomic theory // International Review of Economics Education. 2021. Vol. 38. P. 100225.
6. **Nelson M.J., Hoover A.K.** Notes on Using Google Colaboratory in AI Education // Proceedings of the 2020 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020. P. 533–534.
7. **Huang C.-J. et al.** Developing a medical artificial intelligence course for high school students // International Forum on Medical Imaging in Asia 2021. SPIE, 2021. Vol. 11792. P. 103–108.
8. **Newland J.** Remote Astronomy Labs for High School Students. 2021.
9. **Tock K.** Google CoLaboratory as a Platform for Python Coding with Students: 1 // RTSRE Proceedings. 2019. Vol. 2, № 1.
10. **Босенко Т.М., Фролов Ю.В.** Применение Облачных Платформ Глубокого И Машинного Обучения Студентами В Условиях Дистанционного Образования. Курский государственный университет, 2020. P. 414–417.
11. **Козлов А.** Использование Google Colaboratory на лабораторных занятиях в курсе «Дискретная математика и математическое моделирование». Белорусско-Российский университет, 2021.
12. **Розов К.В.** Разработка курса “Технологии искусственного интеллекта” для студентов педагогических специальностей. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2019. P. 71–72.
13. **Google Drive** [Electronic resource]. URL: <https://www.google.com/drive/> (accessed: 12.12.2021).
14. **Петухов Б., Шиков В.** Справочник по теплообменникам // М.: Энергоатомиздат. 1987. P. 560.
15. **Пронин В.А.** Компоновки трубных пучков и синтез конвективных поверхностей теплообмена с повышенной энергоэффективностью. Московский энергетический институт, 2008.
16. **Лавров Д.А.** Интенсификация конвективного теплообмена (Оценка энергетической эффективности процесса теплопередачи конвективных поверхностей; экспериментальное измерение теплоаэродинамических характеристик в шахматных пучках высокой эффективности). 1999.
17. **Антуфьев В. et al.** Теплообменные аппараты из профильных листов // Л.: Энергия. 1972. P. 91.
18. **Величко В.И., Трофименко Н.Н., Милютин В.А.** Повышение энергетической эффективности в подогревателях низкого давления типа ПН-1100-25-6-1. Москва: Издательский дом МЭИ, 2017.
19. **Величко В.И., Бутов Р.А., Подобреев И.С.** Расчет эффективности теплообменных аппаратов из профильных листов (пластинчатые теплообменники) методом “при прочих равных условиях” // Сборник тезисов VIII международной конференции “Тепло-массообмен и гидродинамика в закрученных потоках.” Москва: Издательский дом МЭИ, 2021.
20. **Optuna** [Electronic resource] // Optuna. URL: <https://optuna.org/> (accessed: 12.12.2021).
21. **Hyperopt** [Electronic resource]. URL: <http://hyperopt.github.io/hyperopt/> (accessed: 12.12.2021).
22. **Plate heat exchanger** [Electronic resource]. URL: https://colab.research.google.com/drive/1zIr_TbtX_SX1od5yqQ9yHBwA98JIKvfT?usp=sharing (accessed: 12.12.2021).
23. **Butov R.** plate heat exchanger [Electronic resource]. 2021. URL: <https://github.com/romanzes637/plate-heat-exchanger> (accessed: 12.12.2021).
24. **Markdown** [Electronic resource] // Wikipedia. 2021. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Markdown&oldid=1059667023> (accessed: 12.12.2021).
25. **LaTeX** [Electronic resource] // Wikipedia. 2021. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=LaTeX&oldid=1055309003> (accessed: 12.12.2021).
26. **Waskom M.** seaborn: statistical data visualization // JOSS. 2021. Vol. 6, № 60. P. 3021.
27. **Matplotlib** — Visualization with Python [Electronic resource]. URL: <https://matplotlib.org/> (accessed: 12.12.2021).
28. **Plotly:** The front end for ML and data science models [Electronic resource]. URL: <https://plotly.com/> (accessed: 12.12.2021).
29. **Ven B.V.** de. Bokeh [Electronic resource]. URL: <https://bokeh.org/> (accessed: 12.12.2021).
30. **Altair:** Declarative Visualization in Python — Altair 4.2.0rc1 documentation [Electronic resource]. URL: <https://altair-viz.github.io/> (accessed: 12.12.2021).
31. **GitHub** [Electronic resource] // GitHub. URL: <https://github.com> (accessed: 12.12.2021).

ОСОБЕННОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ЛЕКЦИОННЫХ ЗАНЯТИЙ ПО «ТЕРМОДИНАМИКЕ» В УСЛОВИЯХ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена особенностям проведения лекционных занятий по дисциплине «Термодинамика». Рассмотрены различные подходы к чтению лекций – как традиционное чтение лекций в аудитории, так и дистанционное обучение, на используемой в МЭИ платформе Webex. Показаны достоинства и недостатки разных подходов к занятиям и предложен новый удобный вариант проведения лекций – озвученные презентации в Power Point, выложенные в YouTube в формате mp4. Также рассмотрены некоторые моменты, которые удобнее рассмотреть в предложенном нами формате, чем в других.

Ключевые слова – термодинамика, лекции, первое начало термодинамики, Power Point

1. ВВЕДЕНИЕ

Организация лекционных занятий в очном формате была отработана годами. В период пандемии остро встал вопрос о том, как читать лекции дистанционно. Сначала преподаватели отсылали конспекты, но некоторые моменты требовали пояснений, которые конспекты дать не могли. После внедрения в учебный процесс платформы Webex, лекторы получили возможность демонстрировать свои презентации и пояснять их. Однако все равно остался вопрос, как студенты воспринимают материал – все ли понятно и слушают ли вообще. Лектор не может одновременно читать лекцию и отслеживать присутствие студентов на ней, вполне вероятно ситуация, когда студент зашел на занятие и пошел заниматься своими делами. Поэтому, нами был предложен более удобный формат, как для лекторов, так и для студентов – озвученные презентации в Power Point.

2. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О КУРСЕ ЛЕКЦИЙ ПО «ТЕРМОДИНАМИКЕ»

Курс лекций создан для студентов, изучающих «Термодинамику» на 3 курсе, обучающихся по направлению «Ядерная энергетика и теплофизика». Этот курс изучается в течении 2 семестров и состоит из 30 лекций – 16 лекций читается в осеннем семестре и 14 в весеннем. Каждая лекция представляет собой видео с озвученными слайдами в формате .mp4. При просмотре материала у обучающихся есть возможность остановить видео в любой момент, что позволяет записать информацию в удобном для каждого темпе, есть возможность вернуться в любой фрагмент записи, если что-то было непонятно и просмотреть еще раз. Видео формат позво-

ляет наиболее точно передать аспекты информации в отличие от записи лекций на доске или просмотра конспектов.

Все лекции хранятся на канале в YouTube и в системе «Прометей» МЭИ в папке «Открытые курсы». В часы проведения лекционного занятия студентам высылаются ссылка на текущую лекцию, которая остается активной в течение всего дня. Это позволяет слушателям прослушать и законспектировать материал в удобное для них время.

Рассмотрим некоторые из «сложных» вопросов, которые легче изложить, используя дистанционные технологии.

3. ДИСТАНЦИОННОЕ ЧТЕНИЕ ЛЕКЦИЙ ПО «ТЕРМОДИНАМИКЕ». СЕМЕСТР 1

3.1. Лекция «Реальные газы»

Переходя к рассмотрению темы «Реальные газы», где в диаграммах появляются кривые насыщения, у слушателей возникают вопросы по построению этих диаграмм. Power Point позволяет наглядно показать, как правильно выполнить построение.

Например, объясняя, как определить состояние, в котором находится вода, используя таблицы свойств «Воды и водяного пара» [1], в лекциях приводится следующий пример.

Задача: определить состояние H₂O по заданным давлению и температуре.

На рис.1 приведена p-v- диаграмма с нанесенными на ней пограничными кривыми – левая пограничная кривая до критической точки, обозначенной кр, и правая пограничная кривая- правее критической точки. В лекции рассматриваются особенности построения кривых. Также на рис. 1 присутствует изобара 6 МПа, заданная в условии задачи.

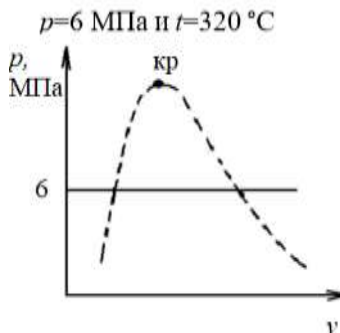
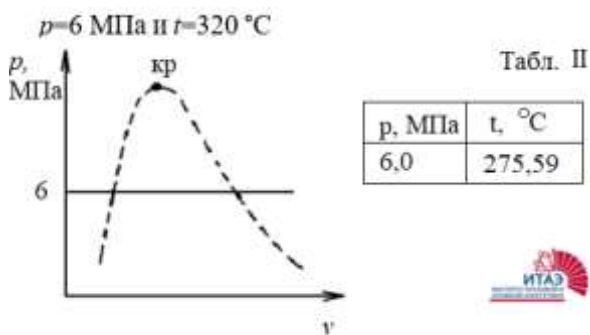


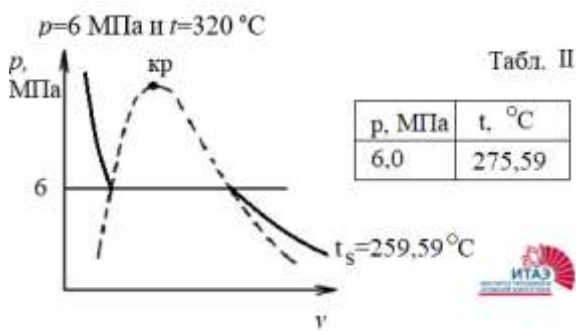
Рис.1. Задача 1 – Слайд 1



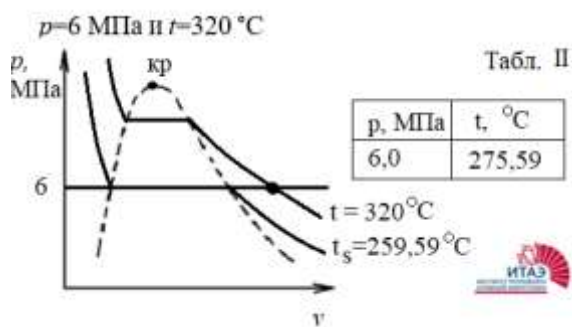
Далее в этом фрагменте лекции говорится о том, что для решения этой задачи нужно воспользоваться таблицами Александрова [1] и на слайде появляется фрагмент таблицы II – рис.2, соответствующий заданному в условии задачи давлению. Мы использовали один из функционалов Power Point, который позволяет делать анимации на одном и том же слайде. Рассказывается о температуре насыщения, которая соответствует этому давлению, согласно таблице II [1], что в двухфазной области заданное давление и температура насыщения имеют горизонтальный совместный участок. Также упоминается о том, что при давлениях выше критического давления отсутствует температура насыщения.



Затем на слайде появляется новая p-v- диаграмма, на которой нанесена изотерма, соответствующая температуре насыщения, равная 275,59 °C при заданном давлении 6 МПа – рис.3.



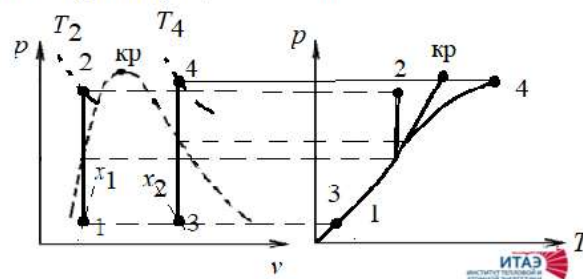
Далее рассказывается о положении изотерм в p-v- диаграмме, о том что изотерма с более высокой температурой (320 °C) располагается выше, чем изотерма с более низкой (275,59 °C), и на экране появляется рис.4. Также здесь подчеркивается тот факт, что изотермы с температурой выше критической не имеют горизонтального участка изотермы. В итоге мы имеем пересечение заданных изобары и изотермы и искомое состояние – перегретый пар, показанное на рис.4.



Подобные примеры разобраны и для других параметров (T-s, p-v и др.), что, как нам кажется, позволяет слушателям легче освоить материал, особенно в дистанционном формате.

Построение диаграмм реального газа часто вызывает затруднения у обучающихся. В лекциях мы подробно рассказываем и показываем какой вид имеют изолинии в Ts-, p-v-, p-T- и h-s- диаграммах. Для примера, приводим рис. 5 на котором изображены изохорные процессы на нескольких диаграммах, а в лекциях также озвучены особенности построения этих изолиний.

Изохорный процесс $v=const$



3.2. Лекция «Первый закон термодинамики»

Представление формулировок в лекциях. Рассмотрим на примере основополагающего закона – первого начала термодинамики. На рис. 6 приведены 3 формулировки с пояснениями.

I Закон термодинамики

I неизолированная система

$$Q = E_2 - E_1 + L$$

II изолированная система

$$E_2 - E_1 = 0 \Rightarrow U = 0$$

III

Вечный двигатель I рода не возможен

Рис. 6. Слайд – I закон термодинамики

Такая форма записи очень удобна для слушателей, можно остановить видео, записать и продолжить просмотр. Часто на очных лекциях при записи определений студенты переспрашивают. У всех

разный темп работы: кто-то дописал фразу до конца, кто-то в середине и просит повторить. Видеолекции снимают эту проблему – все работают в своем темпе.

Говоря о первом законе термодинамики и рассказывая о идеях, которые привели к его открытию, невозможно не рассказать о людях, которые стояли за этим открытием. Проводя лекцию в аудитории и записывая формулы на доске, нет возможности показать портреты этих людей – рис.7.

Однако, рассказывая о вкладе каждого из этих великих людей, очень важно соотнести образ человека с его мыслями и поступками, его социальным положением и тем, как сложилась их жизнь.



Рис.7. Основоположники первого начала термодинамики.

В Лекции мы рассказываем о фактах из биографии этих людей, о случаях, приведших к великому открытию, о том, как отреагировали современники и как заслуги этих людей признали их последователи.

4. ДИСТАНЦИОННОЕ ЧТЕНИЕ ЛЕКЦИЙ ПО «ТЕРМОДИНАМИКЕ». СЕМЕСТР 2

4.1. Лекция «Термодинамика потока вещества»

Семестр 2 начинается с изучения закономерностей, происходящих с потоком вещества. Для лучшего понимания процессов в потоке, а именно процессов истечения из суживающегося сопла в нерасчетном режиме и сопла Лавала рекомендуем изучить материал, изложенный на ИНФОРИНО-2020 «Исследование нерасчетного режима истечения газа с трением из суживающегося сопла в лаборатории Термодинамики» [2] и в [3]. В лекции мы не только излаем общепринятый подход [4], но и результаты исследований, выполненные авторами настоящей публикации [2] и [3], в которой исследовано влияние трения на параметры газа (давление, скорость и площадь минимального сечения сопла) в нерасчетном режиме с трением.

На рис. 8 показано различие в общепринятом подходе, когда при течении с трением давление в минимальном сечении принимается равным $p_{кр}$ [4] и подход предложенный в [2] и [3], в котором давление в минимальном сечении p_2 больше, чем $p_{кр}$. Чем больше трение, тем больше различие между давлениями p_2 и $p_{кр}$. На рис.8 в Ts -диаграмме показан процесс истечения из суживающегося сопла в нерасчетном режиме с начальными параметрами давлением 1 бар и температурой 22 °С и приведены давления на выходе сопла: $p_{кр}$ – давление рассчитанное по общепринятым формулам [4] и p_2 – давление, рассчитанное по [2,3].

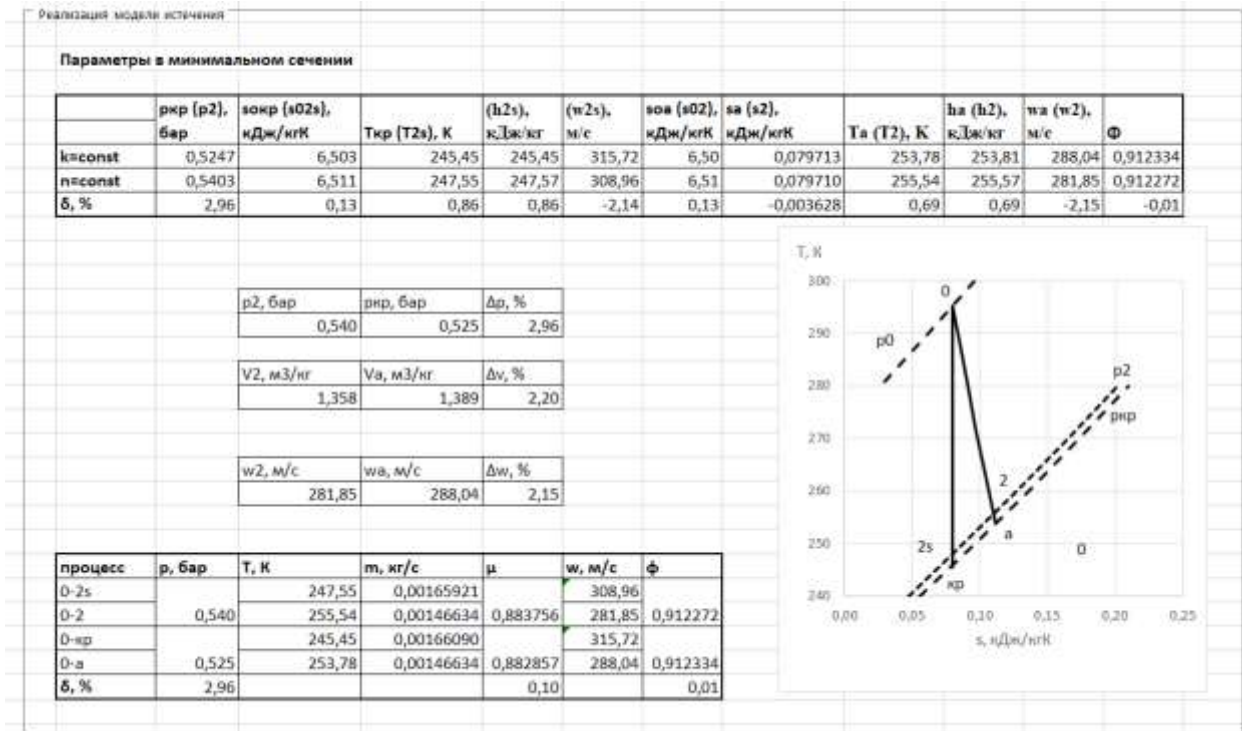


Рис.8. Параметры газа в минимальном сечении

4.2. Лекция «Газотурбинные установки»

Необходимо упомянуть об особенности показа рисунков и диаграмм при дистанционном обучении. Материал, предоставляемый слушателям, отличается высоким качеством представления, в отличие от рукописных лекций на доске при очном обучении. Например, на рис.9 приведены графики зависимости работы ГТУ и внутреннего КПД ГТУ от отношения температур (и степени повышения давлений для КПД), взятые из [5].

На рис.9 приведены численные значения, позволяющие оценить величины, в то время как в аудитории эти графики мы дали бы только качественно.

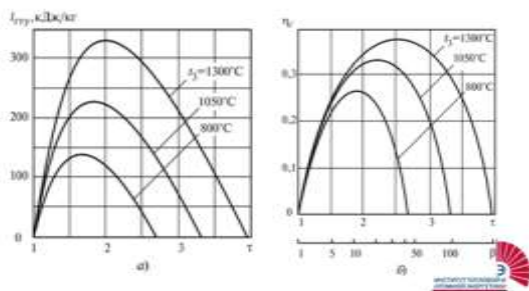


Рис.9. Слайд 1 – ГТУ

В лекциях мы проводим анализ зависимости одних параметров от других. Так при рассмотрении темы ГТУ мы анализируем влияние ТЗ- температуры перед газовой турбиной, $\varphi = l_k/l_T$ отношения работы компрессора к работе газовой турбины на внутренний КПД ГТУ. Часто это сложные зависимости, которые легче рассказать в видеолекции. На рис.10 представлен фрагмент лекции, посвященный анализу КПД.

$$\eta_i^{ГТУ} = \frac{l_T^A - l_K^A}{q_1^A} = \frac{l_T^A - l_K^A}{l_T - l_K} \frac{l_T - l_K}{q_1} \frac{q_1}{q_1^A} = \eta_{oi}^{ГТУ} \eta_t \frac{q_1}{q_1^A}$$

$$\eta_{oi}^{ГТУ} = \frac{l_T \left(\eta_{oi}^T - \frac{\varphi}{\eta_{oi}^K} \right)}{l_T (1 - \varphi)} = \frac{\eta_{oi}^T - \frac{\varphi}{\eta_{oi}^K}}{1 - \varphi}$$

Рис.10. Слайд 2 – ГТУ

Мы очень подробно рассказываем о том, как получены данные формулы, и слушатели могут прослушать этот фрагмент повторно, если остались вопросы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационные технологии широко распространены в преподавании различных дисциплин. В условиях дистанционного образования, авторы счи-

тают созданный курс видеолекций по дисциплине «Термодинамика» хорошим образовательным ресурсом для обучающихся. Курс имеет ряд преимуществ:

- возможность обучения в удобное время;
- возможность остановить видео, для записи материала;
- возможность вернуться к любому фрагменту.

Однако, хотелось бы отметить, как ни хорош предлагаемый курс, но «живого» общения заменить не сможет, поэтому рекомендуется только для дистанционного обучения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Хотим высказать благодарность организаторам конференции ИНФОРИНО -2020. Именно формат проведения этой конференции, на которой доклады были представлены в форме озвученных презентаций в Power Point и натолкнул авторов на представление курса по термодинамике в подобном виде.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИНФОРИНО-2020 — сокращенное наименование V Международной научно-практической конференции «ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»;

ГТУ – газотурбинная установка;

КПД – коэффициент полезного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров А.А.**, Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Справочник –М.: Издательский дом МЭИ, 2017. –226с.
2. **Охотин В.С.**, Джураева Е.В. Исследование нерасчетного режима истечения газа с трением из суживающегося сопла в лаборатории Термодинамики. // V Международная – практическая конференция ИНФОРИНО-2020, с. 87-92.
3. **Охотин В.С.**, Джураева Е.В. Влияние трения на параметры газа в минимальном сечении сопла. - Электронный журнал «Новое в российской энергетике», №3 2019.-с.15-24.
4. **Теоретические основы теплотехники.** Теплотехнический эксперимент: Справочник/-М.: Издательство МЭИ, 2001.-564с.
5. **Кириллин В.А.** Техническая термодинамика/В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. -6е изд.-М: Издательский дом МЭИ, 2017.-502с.

А.В. Никитин¹, А.В. Белко¹, И.С. Зейликович¹, С.М. Данилова-Третьяк²

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно (1)

Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова, Минск (2)

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

АННОТАЦИЯ

Представлены формы и программная реализация использования информационных технологий при преподавании физических и технических дисциплин. На конкретных примерах показана дидактика и компьютерная реализация физических и технических задач от простых иллюстраций до сложных объектов и процессов, понимание которых без компьютерного моделирования, затруднено.

Ключевые слова – образование, информационные технологии, физика, техника, компьютерное моделирование, кластеры, фракталы

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение компьютерных технологий в обучении предметным знаниям не должно быть самоцелью. Главное правило при этом: “не навреди”. Важно, чтобы компьютерный интерфейс не усложнял решение задачи. На наш взгляд следует использовать вычислительные и графические возможности компьютеров для изложения предметного материала в интересной и доступной форме. Мы не рассматриваем переложение лекционного материала в виде компьютерной презентации. Применение компьютера для динамических иллюстраций с возможностью варьирования исходными данными параметров, быстрое построение графических зависимостей – это наиболее простой способ. Существуют методы, применение которых без использования компьютера, практически невозможно. К таким методам относятся методы Монте-Карло, теории перколяции, клеточных автоматов, теории фракталов. Современные программные средства позволяют реализовать любую обучающую концепцию. Существуют только дидактические проблемы. Вариантов изложения одного предметного материала множество и они зависят только от фантазии преподавателя. Поэтому, мы базируемся только на собственном опыте и будем излагать одну из многих точек зрения на применение информационных технологий в образовании.

2. ОБЩИЙ ПОДХОД К СТРУКТУРЕ И ДИДАКТИКЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

2.1. Динамические иллюстрации

Лучшей иллюстрацией при преподавании физики является физический эксперимент. Однако не

всегда, по разным причинам, удается его использовать. Компьютерная динамическая иллюстрация может дополнить лекционный материал, а вычислительный эксперимент вариацией исходных данных позволит установить качественные и количественные зависимости параметров процессов [1].

Используя метод молекулярной динамики на примере модели “Идеальный газ” можно динамически проиллюстрировать “максвеллизацию” молекул газа по скоростям и убедительно ввести понятие “энергетическая температура” рис.1. Задавая в начальный момент времени регулярные распределения по скоростям и координатам можно динамически проиллюстрировать “максвеллизацию системы”. Если ввести полевое взаимодействие частиц (например, какой-либо полуэмпирический потенциал) можно показать фазовые переходы.

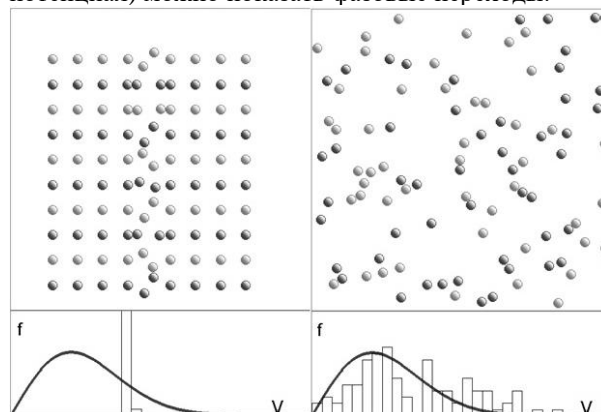


Рис. 1. Демонстрация “максвеллизации” системы частиц при регулярном начальном распределении по координатам и скоростям.

Широкие возможности компьютерной интерпретации применяются к задачам статистической физики. Число состояний таких систем достаточно велико и только методы Монте-Карло, реализуемые программным способом, позволяют построить модели канонических ансамблей. Достоинство моделей заключается в том, что в любой момент времени известны координаты молекул, их скорости и энергии. Это позволяет оценивать как термодинамические параметры, так и кинетические, связанные с процессами переноса. На основании этих данных можно рассчитывать средние значения и сравнивать их с измеряемыми величинами.

Нелинейность большинства физических задач и математические трудности их описания также в образовательных целях может быть дополнена

компьютерной интерпретацией с использованием численных моделей [2-4]. Например, понятие “солитон” достаточно просто иллюстрируется нелинейными колебаниями цепочки атомов [5]. Простая компьютерная реализация значительно расширяет понимание этого сложного явления рис.2.

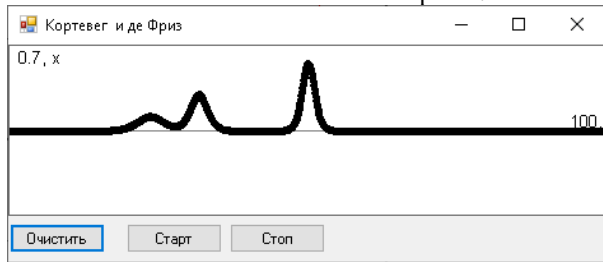


Рис. 2. Динамическая иллюстрация понятия “солитон”. Объекты с большей амплитудой движутся с большей скоростью, при перекрытии нелинейно интерферируют друг с другом.

Большое число моделей физических процессов описано в нашей работе [5]. Все приложения моделей можно скачать по ссылке [6].

2.2. Тренажеры

Практическое закрепление изучаемого предметного материала осуществляется чаще всего через решение задач. Фактор тренинга в этом случае хорошо реализуется через компьютерные технологии, позволяющие обеспечить интерактивность, вариативность исходных данных, тестирование. Решение задач связано с теорией и формулами, с поиском справочного материала, методиками решения, с расчетами. Наиболее технологично все эти компоненты можно объединить в компьютерном приложении. Более того, приложение позволяет, при необходимости и для более глубокого понимания, визуализировать процесс. Такой подход мы реализовали при разработке задачника по общей физике [7]. Основная идея такого задачника заключается в том, чтобы минимизировать поиск ресурсов для решения задачи вне приложения.

Динамически формируются параметры заданий, представлены все формулы, необходимые для решения задачи, приводится подробный пример решения аналогичной задачи выводом формул, представлена динамическая иллюстрация процесса, тестируются ответы. Задачник реализован в виде приложения, которое можно использовать на практических занятиях и в самостоятельной работе как тренажер. Динамическое приложение, в зависимости от задачи, может выполнять не только иллюстративные функции, но и интерактивные.

Рассмотрим нашу методику на примере решения задачи о движении электрона в магнитном поле. В рассмотренном случае формальное решение задачи – вычисление по формулам – дополняется возможностью визуализации процесса и параметров движения, его повторения с разными исходными данными. Пример иллюстрирует вывод формул и выполнение расчетов с получением конкретных числовых результатов. Тестирование рас-

четных результатов позволяет использовать программу в режиме тренинга.

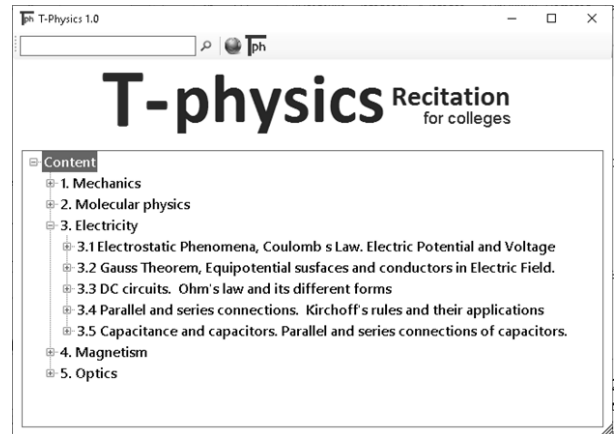


Рис. 3. Задачник по общей физике с компьютерными моделями [7].

Рассмотрим пример механической задачи на криволинейное движение. Случайным образом генерируются исходные данные рис.4. У обучающегося есть три возможности получения результата. Первый – полностью самостоятельно, не пользуясь формулами, решить задачу, второй – воспользоваться формулами и третий – изучить на примере подробно ход решения аналогичной задачи, с отличными от задания исходными данными.

1.2.7 Curvilinear motion

Given
 $V_0, \text{m/s}$: 367
 $V_{\text{frag}}, \text{m/s}$: 192

Find
 t_{exp}, s
 Y_{exp}, m
 R_{exp}, m

T.1.2.7.Task 3.

A shell begins to move up from the origin at a speed of V_0 . At the maximum height Y_{exp} the shell is exploded on a large number of fragments, scattering uniformly in all directions with the relative speed V_{frag} . Find the time t_{exp} , the height at which the projectile was exploded Y_{exp} and the radius R_{exp} of the lethal area. The acceleration of free fall is equal to $g = 9.8 \text{m/s}^2$. The air resistance is neglected.

Click the "Option" button to obtain the original data. Enter the calculated "find" parameters. Press the "Test" button to check the results of the calculation.

Formula

$$t_{\text{exp}} = \frac{V_0}{g}$$

$$Y_{\text{exp}} = V_0 \cdot t_{\text{exp}} - \frac{g \cdot t_{\text{exp}}^2}{2} = \frac{V_0^2}{2g}$$

$$R_{\text{max}} = V_{\text{frag}} \cos \beta \sqrt{\frac{V_{\text{frag}}^2 \cos^2 \beta}{g} + 2 \cdot V_{\text{exp}} g}$$

Рис. 4. Секция 1 – поля исходных данных, поля для ввода результатов расчета, кнопки генерирования новых исходных данных и проверки результатов; секция 2 – условие задачи, все формулы, необходимые для решения и пример решения аналогичной задачи.

Одновременно с загрузкой исходных данных в окне визуализации динамически отображается физический процесс рис.5. Наглядность очевидна.

Предлагаемый метод решения задач применим на практических занятиях, при самостоятельной работе и как тренинг.

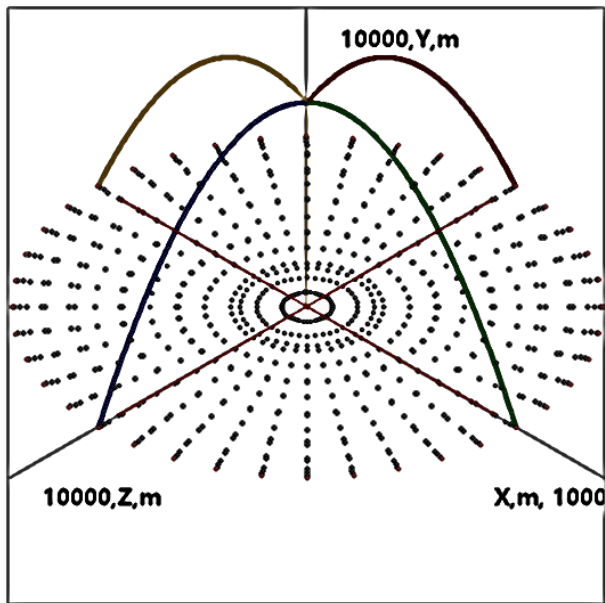


Рис. 5. Окно динамической визуализации процесса.

2.3. Лабораторный и вычислительный эксперименты

Лабораторный практикум занимает важное место в процессе обучения. Приоритет - конечно лабораторный эксперимент. Однако дополнение в виде компьютерной реализации позволяет более глубоко исследовать изучаемый процесс. Рассмотрим это на примере разработанной нами универсальной лабораторной установки, предназначенной для исследования механического движения и электромагнитных процессов. Как вычислительный эксперимент дополняет натурный показом на примере лабораторной работы "Изучение вынужденных нелинейных колебаний пружинного маятника" рис.5

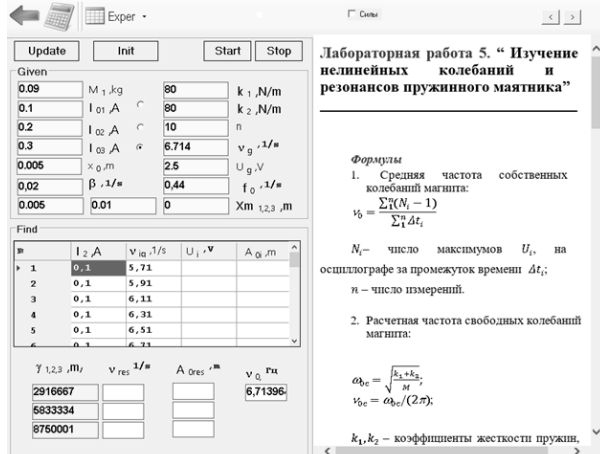


Рис. 6. Интерфейс гибридной формы лабораторной работы (лабораторный и вычислительный эксперименты).

Работа выполняется стандартно: физический эксперимент, запись и обработка экспериментальных данных. А далее проводится вычислительный эксперимент, позволяющий получить зависимости, которые экспериментально получить затруднительно. Вычислительный эксперимент, кроме по-

лучения дополнительных данных динамически отображает "фазовый портрет" процесса рис 7.

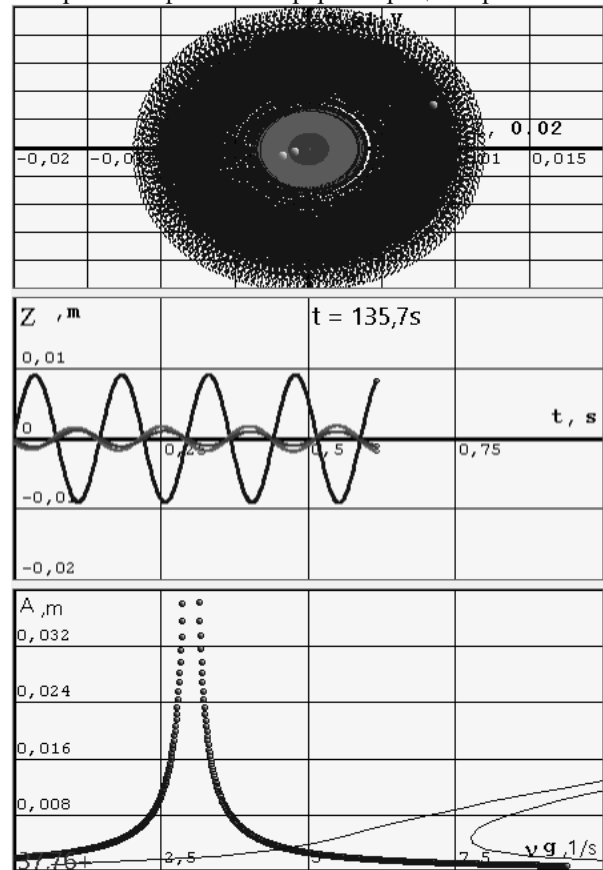


Рис. 7. Динамическая фазовая диаграмма процесса и резонансные амплитуды, полученные в результате вычислительного эксперимента.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРОВ НАПОЛНИТЕЛЯ В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ

В качестве технического приложения компьютерного моделирования рассмотрим методы формирования структуры модификатора при моделировании эффективной теплопроводности композиционного материала [7]. Конечная стадия моделирования эффективной теплопроводности - численное решение уравнения теплопроводности. Предварительно необходимо сформировать структуру распределения наполнителя в матрице. Технологически чаще всего наполнитель распределяется в матрице случайным образом. Однако получить полностью равномерное распределение невозможно. Даже в случае малых концентраций могут образовываться кластеры. Кластеры, в свою очередь образуют кластер-кластерные системы, что может приводить к перколяционным эффектам. Сама полимерная матрица с точки зрения структуры является неоднородной. Однако наибольший интерес представляют композиционные системы, когда коэффициент теплопроводности матрицы значительно ниже коэффициента теплопроводности наполнителя. С этой точки зрения теплопроводность композита в целом определяется свойствами и структурой наполнителя.

Структура композиционных систем моделируется на решетках различного типа. Распределения наполнителя в матрице элементарной ячейки можно ограничить некоторым количеством интуитивно понятных вариантов. Остановимся на фрактальной структуре распределения наполнителя. Указанная задача может быть решена исключительно компьютерными вычислительными методами.

В соответствии с моделью «агрегации ограниченной диффузией» (DLA) в рассматриваемое пространство помещается одна частица-затравка кластера, а затем в пространство добавляется по одной новой частице. Каждая новая частица движется по закону случайных блужданий. Если частица достигает границы пространства, она отражается от нее. Движение частицы продолжается до тех пор, пока она не окажется по соседству с одной из частиц кластера. Затем эта частица прекращает движение, а в пространство запускается следующая частица. Таким образом, формируется кластер. Это модель DLA. Модификация модели «агрегации ограниченной диффузией» заключается в том, что в модели учитываются вероятности прилипания диффундирующей частицы и конфигурации частиц кластера в зоне прилипания (модель «ограниченная реакцией агрегация» – RLA). Реальные физические системы обычно состоят из нескольких кластеров (кластерная система). Для того, чтобы получить модель такой системы можно еще модифицировать метод RLA. В нашем случае в отличие от модели DLA и RLA в ходе процесса кластеризации в случайном порядке добавляются затравочные частицы, которые не перемещаются по области. Также в ходе процесса кластеризации, в соответствии с моделями DLA и RLA, последовательно запускаются частицы, которые диффундируют по области. Если диффундирующая частица попадает в ячейку рядом с каким-либо кластером, то в зависимости от вероятности прилипания, она либо присоединяется к кластеру, либо продолжает диффундировать по области. Таким образом, можно построить кластерную систему рис.8.

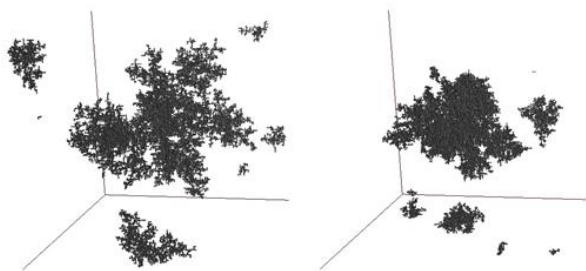


Рис.8.Кластерные системы, полученные в рамках модели RLA на трехмерных решетках при различных вероятностях прилипания: слева (1,0) и справа (0,2)

В рамках реализации этой модели кроме геометрических параметров кластеров рассчитывается такой важный параметр композиционного материала, как степень модифицирования, определяемая как отношение объема, в котором обнаруживается изменение физических свойств непосредственно

матрицы, к общему объему композита. На рис.9 представлена зависимость степени модифицирования от фрактальной размерности кластеров наполнителя D .

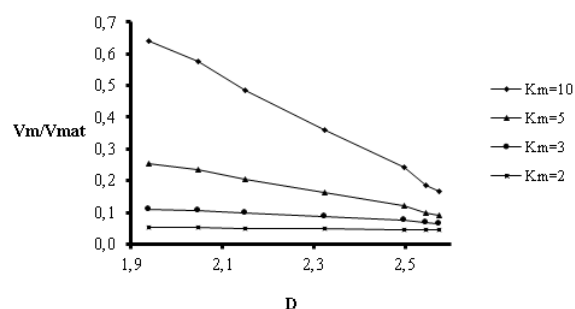


Рис. 9. Зависимость степени модифицирования матрицы от фрактальной структуры наполнителя(объемная концентрация 2%)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Формы** и программное обеспечение поддержки лекционных, практических и лабораторных занятий по физике/ А. В. Никитин [и др.] // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: в 2 ч. Ч. 1 : материалы V Междунар. науч. конф. Красноярск, 21-24 сент. 2021 г. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2021. – С. 356-360.
2. **Явление** электромагнитной индукции и его применение в лабораторном практикуме/ И. С. Зейликович [и др.] // Физическое образование в вузах. – 2018. – Т. 24. – № 4. – С. 3-17.
3. **Excitation and Detection of a Nonlinear Resonance of Oscillations of a Spring–Mass System Using Electromagnetic Induction/ I. Zeylikovich, A. V. Nikitin, A. E. Vasilevich // Technical Physics. – 2020. – Т. 65. – № 1. – С. 1-6.**
4. **Натурный** и вычислительный эксперименты при исследовании явления электромагнитной индукции / И. С. Зейликович, А.В. Никитин // Вестник ГрДУ ім'я Янки Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальна тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10. – № 1. – С. 65-74.
5. **А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Л. Шишakov.** Компьютерное моделирование физических процессов. М: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 679 с.
6. **А. В. Никитин, А. И. Слободянюк.** Компьютерное моделирование физических процессов// [Электронный ресурс].- <https://drive.google.com/drive/folders/1a2YoD19o1YFuUawBFYTuwtbhHwwFNhmg?usp=sharing>
7. **T-physics**// [Электронный ресурс].- сайт <https://sites.google.com/view/physicscomputerforcollege>.
8. **Experiment and simulation of the effective thermal conductivity of composite systems based on polymers/ A Nikitin, A. Belko, I. Zeylikovich, N. Babarika, S. Danilova-Tretjak, E. Evseeva and K. Nikolaeva, // Вестн. Гродн. гос. ун-та. Сер. 2, 2019.Т.9.№ 3. С. 94–103.**



АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Алексейчик Л.В. 50

Б

Баронов О.Р. 9

Белко А.В. 91

Богатырева Т.В. 27

Богомолова Т.В. 73

Бутов Р.А. 83

В

Величко В.И. 83

Вилданов Р.Р. 69

Володин И.В. 64

Г

Горбунов С.С. 36, 41

Грибин В.Г. 32

Д

Данилова-Третьяк С.М.
91

Джураева Е.В. 87

Дорохов Е.В. 60

Е

Егоров А.Ф. 36, 41

З

Зейликович И.С. 91

И

Иванов И.А. 14

К

Киселев В.И. 77

Коваленко Д.А. 77

Комиссарова Т.Н. 56

Корняков И.А. 64

Костандян А.В. 36, 41

Костандян В.А. 36, 41

Кузнецов Э.В. 77

Куриленко И.Е. 19

Курушин А.А. 50

М

Манчев Э.И. 56

Маран М.М. 23

Мосалов О.П. 14

Н

Невский А.Ю. 9

Никитин А.В. 91

О

Охотин В.С. 87

Р

Рожков А.Д. 32

С

Сайкова Д.А. 46

Сидоров В.В. 36, 41

Солодков А.А. 27

Сулейманова А.Р. 69

Х

Хорьков С.Н. 77

Хроматов В.Е. 56

Ш

Шихин В.А. 46

Я

Ячевский И.А. 64

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ИНДУСТРИЯ 4.0, КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ И ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

А.Ю. Невский, О.Р. Баронов

ПОДГОТОВКА БАКАЛАВРОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В
НИУ «МЭИ»: УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТРАСЛИ ЭНЕРГЕТИКИ.....9

Секция 2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

И.А. Иванов, О.П. Мосалов

СЕРВИС ДЛЯ ОЦЕНКИ АКТУАЛЬНОСТИ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ.....14

И.Е. Куриленко

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ В СОСТАВЕ ДИСТАНЦИОННЫХ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ19

М.М. Маран

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ПОДДЕРЖКИ ДИСЦИПЛИНЫ
«ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ».....23

Секция 3. ИТ В ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЁТАХ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Т.В. Богатырева, А.А. Солодков

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКТНОЙ ЗАДАЧИ ИНСТРУМЕНТАМИ СОВРЕМЕННОГО
АНАЛИЗА ДАННЫХ.....27

А.Д. Рожков, В.Г. Грибин

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГТУ
С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ.....32

С.С. Горбунов, А.В. Костандян, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров, В.А. Костандян

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СМЕШЕНИЕМ БЕНЗИНОВ В РЕЖИМЕ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....36

А.В. Костандян, С.С. Горбунов, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров, В.А. Костандян

МОНИТОРИНГ ИЗМЕРЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.....41

Д.А. Сайкова., В.А. Шихин

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ЦЕНЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВЫБОРКАХ.....46

<i>Л.В. Алексейчик, А.А. Курушин</i> РЕШЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ САПР СВЧ.....	50
<i>Э.И. Манчев, Т.Н. Комиссарова, В.Е. Хроматов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОГИХ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	56
Секция 4. ИТ В УЧЕБНЫХ, ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ	
<i>Е.В. Дорохов</i> ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО КУРСУ «ТЭС И АЭС» ДЛЯ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА».....	60
<i>И.В. Володин, И.А. Корняков, И.А. Ячевский</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ КИПЕНИЯ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ.....	64
<i>А.Р. Сулейманова, Р.Р. Вилданов</i> ИЗУЧЕНИЕ СТАРЕНИЯ И НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО СОСТАВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА.....	69
<i>Т.В. Богомолова</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ДИФФУЗОРЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ В ANSYS FLUENT	73
Секция 5. ДИСТАНЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ	
<i>Э.В. Кузнецов, В.И. Киселев, Д.А. Коваленко, С.Н. Хорьков</i> ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ В СИСТЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	77
<i>Р.А. Бутов, В.И. Величко</i> ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАТФОРМЫ "GOOGLE COLLABORATORY" ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА.....	83
<i>Е.В. Джураева, В.С. Охотин</i> ОСОБЕННОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ЛЕКЦИОННЫХ ЗАНЯТИЙ ПО «ТЕРМОДИНАМИКЕ» В УСЛОВИЯХ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	87
<i>А.В. Никитин, А.В. Белко, И.С. Зейликович, С.М. Данилова-Третьяк</i> КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН.....	91
Авторский указатель.....	95

Подписано в печать	15.06.22.	Печать цифровая	Формат 60x84 1/8
Печ. л. 12,5	Тираж 40 экз.	Изд. № 22н-051	Заказ

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14,
Тел/факс (495)362 7560, адрес в Интернете <http://mpei.ru>,
электронная почта: universe@mpei.ac.ru

Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ»
с электронного оригинал-макета.
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.13.