

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
Академия электротехнических наук Российской Федерации

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции

«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»

(XXIII Бенардосовские чтения),

*посвящается 80-летию
Российской атомной промышленности*

29–31 мая 2025 г.

II том
Теплоэнергетика

Иваново 2025

В II томе материалов конференции представлены статьи, отражающие результаты научных исследований в области тепловых и атомных электрических станций; промышленная теплоэнергетика; теплообмен в теплотехнологических установках и процессах; систем управления и автоматизации; рассмотрены вопросы математических методов в технике и технологиях.

Редакционная коллегия:

Ледуховский Г.В., д.т.н., профессор – председатель;
Тютиков В.В., д.т.н., профессор;
Шуин В.А., д.т.н., профессор;
Казаков Ю.Б., д.т.н., профессор;
Косяков С.В., д.т.н., профессор;
Бухмиров В.В., д.т.н., профессор;
Колганов А.Р., д.т.н., профессор;
Бушуев Е.Н., д.т.н., доцент;
Колибаба В.И., д.э.н., профессор;
Карякин А.М., д.э.н., профессор;
Клюнина С.В., начальник УИУНЛ.

По материалам Международной научно-технической конференции
«Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии»
(XXIII Бенардосовские чтения) будет выпущен электронный сборник научных
трудов, который будет размещен в научной электронной библиотеке
на eLIBRARY.RU договор № 1042-03/2015K

посвящается 80-летию Российской атомной промышленности

ISBN 978-5-00062-671-9
ISBN 978-5-00062-669-6 (Т. 2)

© ФГБОУВО «Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина», 2025

СЕКЦИЯ 4.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 371.693.4

А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н.,
Е.В. БОЛОНИН, студент
И.Е. ДУБОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: ilya.game37@yandex.ru

Разработка визуальных двойников датчика давления, уровня и температуры для тренажера КИПиА

Аннотация. В работе приведены результаты разработки пользовательского двухмерного и трехмерного интерфейса дифференциального манометра и термосопротивления.

Ключевые слова: АСУТП, КИПиА, тренажер, цифровой двойник, датчик.

A.V. GOLUBEV, PhD
E.V. BOLONIN, student
I.E. DUBOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: ilya.game37@yandex.ru

Development of visual counterparts of pressure, level and temperature sensors for an instrumentation and automation simulator

Abstract. The paper presents the results of the development of a user-defined two-dimensional and three-dimensional interface of a differential pressure gauge and thermal resistance.

Key words: automated control system, instrumentation, simulator, digital twin, sensor.

Разработка тренажерного комплекса нацелена на создание современного учебного инструмента, предназначенного для освоения и получения практических навыков в обслуживании систем контроля и управления, средств измерения и приборов автоматизации на теплоэнергетических станциях (ТЭС) [1].

В работе разработан пользовательский интерфейс, а также трехмерная и двухмерная модель контрольно измерительных приборов и автоматики (КИПиА), на примере датчиков температуры, давления и

уровня. Данная работа является частью разработки комплексного тренажера оперативного персонала - электрослесаря КИПиА ТЭС.

Тренажер реализуется на движке для создания мультимедиа приложений с использованием технологий виртуальной реальности. Проект предоставляет уникальную возможность создания трехмерного виртуального аналога энергетической станции, некоего «цифрового двойника» с интерактивными моделями энергетического оборудования, линий и устройств КИПиА. Проект реализуется с поддержкой отечественных операционных систем, таких как «Astra Linux» и «Alt Linux».

Тренажер может работать в нескольких режимах: двухмерный режим, трехмерный режим и режим виртуальной реальности.

Для двухмерного режима работы тренажера разработаны пользовательские интерфейсы (ПИ) измерительных приборов, в том числе пользовательский интерфейс датчика уровня, термометра сопротивления и термодары. Данный ПИ представляет собой окно, в котором изображена схема подключения датчика и персонал КИПиА может освоить процесс обслуживания и ремонта датчиков.

Все интерактивные объекты привязаны к математической модели, что позволяет легко осуществлять контроль за процессом обучения персонала и облегчает дальнейшую разработку тренажера.

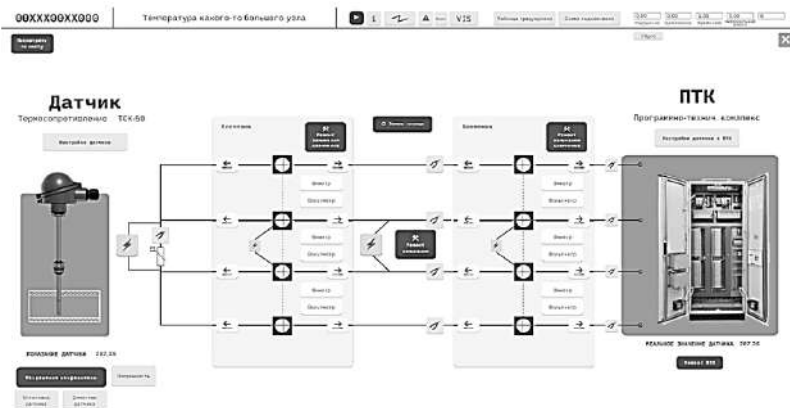


Рис. 1. Пример пользовательского интерфейса датчика термосопротивления

Для обеспечения работы с измерительным оборудованием в трехмерном режиме и режиме виртуальной реальности разработана детализированная модель датчика уровня и платинового термосопротивления. Процесс моделирования выполнялся в профессиональном пакете «Blender», что позволило достичь высокой степени визуального и функционального соответствия реальному промышленному прототипу.

С целью максимального приближения к реальным условиям эксплуатации создано полноценное трехмерное рабочее пространство, включающее характерные элементы ТЭС (рис. 2).



Рис. 2. Трёхмерное окружение участка ТЭС

При работе с тренажером, обучающийся, находясь в окне датчика на мнемосхеме может нажать на кнопку «Посмотреть по месту» и перейти к трехмерному представлению датчика. В данном режиме, обучающийся может посмотреть схему подключения датчика, его марку, подключение датчика к клеммникам в клеммной коробке. Также, обучающийся может настраивать, подключать и отключать датчик.

В тренажере реализована детализированная система подключения датчиков уровня с полным набором функциональных возможностей. Одним из элементов системы является интерактивная 3D-модель клеммной коробки датчика, где пользователи могут выполнять подключение и отключение проводов, проводить измерения параметров цепи с помощью мультиметра (рис. 3).



Рис. 3. Подключение мультиметра в промежуточном клеммнике

В целом на датчике давления можно выполнять поиск и определение различного рода неисправностей, таких как неисправность датчика, обрывы линий, короткие замыкания, свищи в импульсных трубках и т.д.

Таким образом, в рамках проекта были разработаны цифровые двойники датчиков давления, уровня и температуры, включающие двумерный и трехмерный пользовательские интерфейсы, а также детализированные 3D-модели оборудования. Реализованный тренажер на основе технологий виртуальной реальности предоставляет персоналу КИПиА ТЭС эффективный инструмент для обучения, отработки навыков обслуживания, диагностики и ремонта измерительных приборов в реалистичных условиях.

Литература

1. Разработка системы обучения персонала КИПиА и ее интеграция с компьютерным тренажером ТЭС / А.В. Голубев [и др.] // Автоматизация в промышленности. 2023. №4. С. 3–11.

2. Болонин Е.В., Дубов И.Е., Голубев А.В. Использование VR при обучении оперативного персонала ТЭС / Математическое моделирование и информационные технологии // Тез. докладов: «Энергия-2024», Иваново, 2024. Т. 5. С. 7.

УДК 681.516.42

А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент
В.И. КАНАРЕЙКИН, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Разработка многомерной системы управления микроклиматом помещения

Аннотация. В работе приведены результаты разработки системы управления микроклиматом помещения блочного щита управления энергоблоком АЭС. Математические модели разработаны в среде SimInTech, аппаратная часть реализована на базе программно-технического комплекса (ПТК) «Квинт СИ».

Ключевые слова: автоматизация, моделирование, SimInTech, многомерная система, квинт, микроклимат помещений.

A.V. GOLUBEV, PhD
V.I. KANAREYKIN, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Development of a multidimensional indoor climate management system

Abstract. The paper presents the results of the development of a microclimate management system for a block control panel for a nuclear power plant. Mathematical models were developed in the SimInTech environment, the hardware is implemented on the basis of the software and hardware complex (DCS) «Quint SI».

Key words: automation, modeling, SimInTech, multidimensional system, quint, indoor microclimate.

Микроклимат помещения, состоящий из параметров температуры, влажности, воздушного потока, концентрации CO_2 и других факторов, значительно влияет на комфорт и здоровье человека. Эффективное управление микроклиматом играет ключевую роль в обеспечении оптимальных условий для работы в промышленных зданиях [1].

В рамках данной работы описывается разработка системы управления для лаборатории прецизионных систем формирования микроклимата в производственных помещениях.

В состав лабораторной установки входит:

- 1) два водогрейных котла De Dietrich GT-217K;
- 2) тепловой насос CLIVET WSAE-EE82;
- 3) тепловой насос НТВ-50-2/4-1 «Тритон»;
- 4) три бойлера косвенного нагрева (БКН) серии UBT-1000;
- 5) центральный кондиционер CLIVET-HC-100.

Рабочей зоной лаборатории является помещение блочного щита управления (БЩУ). В нем требуется поддерживать заданные значения температуры и влажности. Это осуществляется за счет циркуляции воздуха в помещении. Схема расположения воздуховодов в помещении БЩУ представлена на рис. 1, где из коллектора (2) по воздуховодам (1) сверху вниз через воздухораспределительные решетки поступает воздух с необходимыми параметрами.

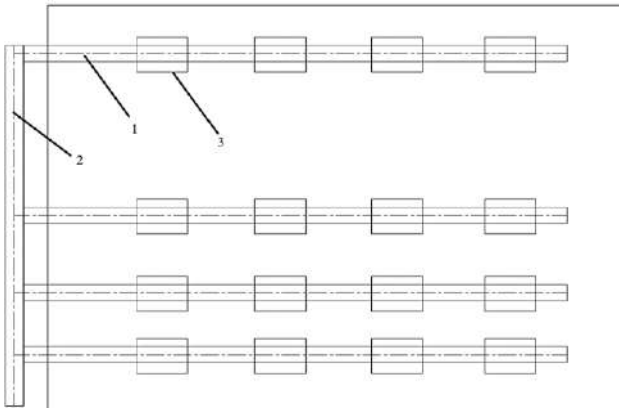


Рис. 1. Схема расположения воздуховодов: 1 – воздуховод; 2 – коллектор приточного воздуха; 3 – воздухораспределительная решетка

За поддержание необходимых параметров воздуха отвечает центральный кондиционер CLIVET-НС-100. В нём наружный воздух последовательно проходит через рекуператор, 3 ступени теплообменников (2 нагревателя и 1 охладитель) и секцию орошения. Температура воды в теплообменниках поддерживается с помощью регулирующих смешительных клапанов. Горячая вода поступает напрямую от водогрейных котлов и теплового насоса CLIVET или через БКН. Холодная вода поступает напрямую от теплового насоса TRITON или через БКН.

В ПТК «Квинт СИ» реализованы следующие функции системы управления:

1) контроль 66 сигналов с датчиков, в том числе: 41 датчик температуры, 9 датчиков влажности, 5 датчиков давления, 11 датчиков расхода.

2) дистанционное управление 31 исполнительным механизмом, в том числе: 10 циркуляционными насосами, 2 вентиляторами 11 регулирующими клапанами, 8 двухпозиционными клапанами.

Кроме поддержания параметров воздуха в данной лаборатории планируются исследования систем динамического микроклимата. Изменение заданных параметров микроклимата, определение характеристик приточного воздуха и нагрузок на систему представляет собой довольно сложную научную и техническую задачу.

Для решения поставленной задачи разработана математическая модель системы в среде динамического моделирования SimInTech [2,3]. Модель состоит из 3 частей: модель центрального кондиционера, модель гидравлической части системы отопления и модель воздуховодов. Модели центрального кондиционера и системы отопления являются моделями с сосредоточенными параметрами, основанными на законах сохранения энергии для сред и поверхностей нагрева. Вторая часть представляет собой модель с распределенными параметрами для контура теплоизолированных воздуховодов. Ниже приведена схема имитационной модели (рис. 2).

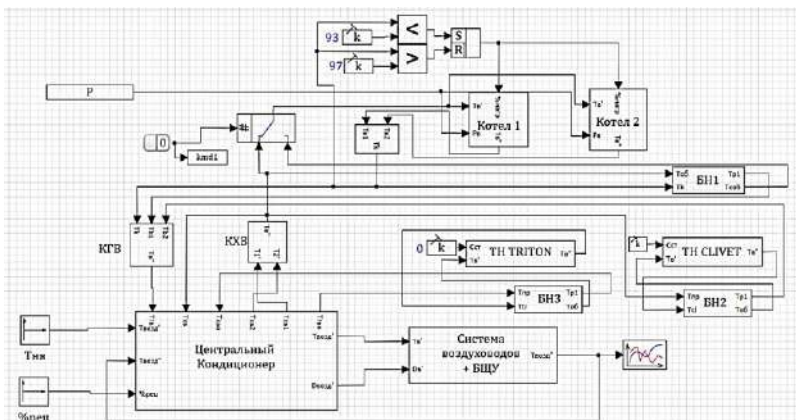


Рис. 2. Схема имитационной модели системы формирования микроклимата

В дальнейшем на основе разработанных моделей и аппаратного обеспечения планируется разработка многозонного регулятора для поддержания параметров динамического микроклимата.

Литература

1. Гаранин А.В. Разработка систем динамического микроклимата и создание на их основе энергосберегающих режимов работы оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.14.04 / Гаранин А.В. Иваново, 2010, 209 с.

2. Введение в работу с программным обеспечением. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Часть 1: учеб. пособие / ООО «ЗВ Сервис», 2017. 109 с.

3. Канарейкин В.И. Разработка математической модели системы формирования микроклимата / В.И. Канарейкин // Математическое моделирование и информационные технологии // Тез. докладов: «Энергия-2024», Иваново, 2024. Т.5. С. 13.

УДК: 004.522

К.К. ЕРМАКОВ, аспирант
А.А. КУЗЬМИН, студент,
О.С. ЕГОРОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: yttuye@gmail.com

Разработка голосового интерфейса для взаимодействия с роботом

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка модуля голосового взаимодействия с роботом, направленного на упрощение обмена информацией между пользователем и машиной, что расширяет функциональные возможности робота. Приведено описание аппаратного и программного обеспечения модуля управления. Описан процесс разработки программного модуля взаимодействия с роботом и использование технологий TextToSpeech и SpeechToText.

Ключевые слова: TextToSpeech (TTS), SpeechToText (STT), offline, сервер, одноплатный компьютер, GenerativePre-trainedTransformer (GPT), RobotOperatingSystem 2 (ROS2), FestivalSpeechSynthesisSystem, голосовое управление, распознавание речи, синтез речи, человеко-машинное взаимодействие, Vosk, встроенные системы.

К.К. ERMAKOV, postgraduate student
А.А. KUZMIN, student,
О.С. EGOROV, student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: yttuye@gmail.com

Development of a Voice Interface for Interaction with a Robot

Abstract. This paper presents the development of a module for controlling a robot using voice commands, aimed at simplifying human-machine interaction and enhancing the robot's functionality. The hardware and software components of the control module are described. The development process of the software interaction module is detailed, along with the use of Text-to-Speech (TTS) and Speech-to-Text (STT) technologies, including the Vosk framework.

Key words: TextToSpeech (TTS), SpeechToText (STT), offline, server, single-board computer, GenerativePre-trainedTransformer (GPT), RobotOperatingSystem 2 (ROS2), Festival Speech Synthesis System, Vosk, voice control, speech recognition, speech synthesis, human-machine interaction, robotics, embedded systems.

Введение

Современные роботы становятся всё более сложными и автономными, но зачастую ограничены в своей функциональности из-за перегруженных и неудобных интерфейсов управления [1]. Голосовые команды, представляются перспективным решением, значительно расширяющим возможности взаимодействия человека с машиной. Данная статья посвящена разработке модуля голосового управления роботом Unitree H1, основанного на использовании технологий распознавания речи (STT), синтеза речи (TTS) и системе ROS2 [2]. Разработка обусловлена отсутствием готового решения от производителя Unitree и необходимостью адаптации под аппаратные особенности [3].

В данной работе подробно рассматривается архитектура системы, состоящей из одноплатного компьютера с периферийными устройствами, функционирующего в качестве вычислительного ядра и сервера для обработки пользовательских запросов. Особое внимание уделено интеграции технологий Speech-to-Text (STT) и Text-to-Speech (TTS), выбору оптимальных решений и их настройке для обеспечения эффективной работы в реальных условиях.

Выбор одноплатного компьютера

Выбор микрокомпьютера был обусловлен необходимостью обеспечить минимальную задержку обработки голосовых команд и достаточным количеством памяти для стабильного функционирования одновременно двух языковых моделей: STT и TTS. Среди критериев выбора также выделены: наличие встроенного Wi-Fi адаптера и SIM-модуля, параметры энергопотребления. Отдельный SIM-модуль в данной реализации также был недопустим. Для тестирования был использован микрокомпьютер Orange Pi Zero 2, с энергопотреблением 5В, 2А. Успешное тестирование STT и TTS в локальной сети позволило перейти к более производительному решению. Исходя из технических характеристик и требований к системе, оптимальным вариантом является микрокомпьютер Nano PC T6, удовлетворяющий всем поставленным критериям. Он также использует питание 12В и 2А, что позволяет ему работать как от распространенных блоков питания, так и от источника питания робота Unitree H1.

Архитектура ПО

Последующие этапы разработки предполагают настройку одноплатного компьютера, создание специализированного программного обеспечения (ПО). Одним из способов управления роботом UnitreeH1 является вызов встроенных команд, реализованных в системе ROS2. Происходит это следующим образом: одноплатный компьютер, подключенный по SSH к компьютеру робота, вызывает необходимые команды для управления. Инициализация команды происходит из промежуточного программного обеспечения (middleware), которое обрабатывает ответ от GPT на основании ответа вызывает команду действия робота или синтеза текст ответа. GPT модель работает на высокопроизводительном сервере и получая запрос от пользователя по распознанному тексту, интегрированному в шаблонный промпт. Такой запрос содержит подробные сведения о роботе, о его возможностях с перечнем команд действий, о формате, в котором необходимо предоставить ответ. Ответ возвращается в формате JSON с полем типа действия (управление или озвучивание) и полем с полезной нагрузкой, в которой находится наименование команды или текст для синтеза.

Одноплатный компьютер работает под управлением Ubuntu 20.04 LTS, что обусловлено стабильностью данной версии и наличием необходимой поддержки для NodeJS версии 16.20.2, используемого для реализации STT посредством библиотеки Vosk [4] и языковой модели vosk-model-ru-0.42 происходит преобразование русской речи человека в текст. Технология TTS была реализована с помощью синтезатора речи Festival [5]. К особенностям стоит отнести настройку синтезируемого голоса для чтения получаемого текста: скорость речи, высота тона и громкость.

Выводы по работе

В результате разработки интерфейса голосового взаимодействия с роботом успешно реализованы базовые функции распознавания голосовых команд и их преобразования в действия робота, учтены задержки серверной обработки и реализовано локальное выполнение простых команд, что повысило отклик системы. Выбор платформы распознавания речи, оптимизация словаря команд и использование middleware сыграли ключевую роль в эффективности модуля.

Дальнейшие работы будут направлены на улучшение понимания естественной речи, повышение устойчивости к шуму, интеграцию с сенсорами, развитие интерфейса и оптимизацию под встроенные системы.

Литература

1. Жумашева Ж.Т., Абдулхайров М.Т., Кыздарбекова А.С. Повышение эффективности голосового управления роботов на основе адаптивных процедур// Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. Материалы докладов конференции. 2017.С. 358–361.

2. The Robot Operating System [Электронныйресурс] // ROS2 [сайт]. URL: <https://docs.ros.org/en/rolling/index.html> (дата обращения: 08.04.2025).

3. AboutH1 [Электронныйресурс] // Unitreedocumentation center [сайт]. URL: https://support.unitree.com/home/en/H1_developer (дата обращения 08.04.2025).

4. Voskofflinespeechrecognition [Электронныйресурс] // Vosk [сайт]. URL: <https://alphacephei.com/vosk/> (датаобращения: 08.04.2025).

5. The Festival Speech Synthesis System [Электронныйресурс] // Festival [сайт]. URL: <https://www.cstr.ed.ac.uk/projects/festival/> (дата обращения: 08.04.2025).

УДК 533.6.071

И.К. МУРАВЬЕВ, к.т.н., доцент,
Д.А. ШИНКЕВИЧ, аспирант
Д.А. ПРАНЬКОВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru, dan-shinkevich@yandex.ru

Имитационное моделирование системы регулирования турбокомпрессора

Аннотация. В статье рассматривается имитационное моделирование основного контура регулирования по изменению частоты вращения ротора турбокомпрессора K-5500-41-1М на базе теплогидравлического кода HS – модуля среды динамического моделирования SimInTech.

Ключевые слова: имитационное моделирование, регулирование, турбокомпрессор.

I.K. MURAVEV, candidate of technical sciences, docent,
D.A. SHINKEVICH, graduate student
D.A. PRANKOV, undergraduate student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru, dan-shinkevich@yandex.ru

Simulation of the turbocharger control system

Abstract. This article examines the simulation modeling of the main control loop for rotor speed variation in a K-5500-41-1M turbo-compressor. The simulation is performed using the SimInTech dynamic modeling environment, specifically utilizing the HS thermal-hydraulic code module.

Key words: simulation, regulation, turbocharger.

Турбокомпрессоры используются для обеспечения дутья – сжатого воздуха, обогащенного кислородом, необходимого для доменных печей в металлургическом производстве. Эти турбокомпрессоры

состоят из паровой турбины, которая вращает ротор, соединенный с компрессором.

Имитационная модель работы агрегата с системой управления позволяет рассмотреть различные режимы работы технологической цепочки «Турбокомпрессор – доменная печь».

Для моделирования гидравлических и газодинамических систем существует различное программное обеспечение, в том числе и отечественная среда динамического моделирования SimInTech, в основе которого заложен теплогидравлический код HS [1].

Для разработки модели был выбран турбокомпрессор K-5500-41-1M. Этот агрегат представляет собой одноцилиндровую, двухсекционную, четырехступенчатую машину, оснащенную промежуточным охладителем. Приводом служат паровые турбины мощностью 8-30 МВт, позволяющие также менять режимы работы за счет изменения частоты вращения роторов.

Моделирование каждой секции компрессора осуществлялось при помощи аппроксимирования газодинамических характеристик [2] в редакторе таблиц блока «Компрессор». Общий вид модели представлен на рис. 1.

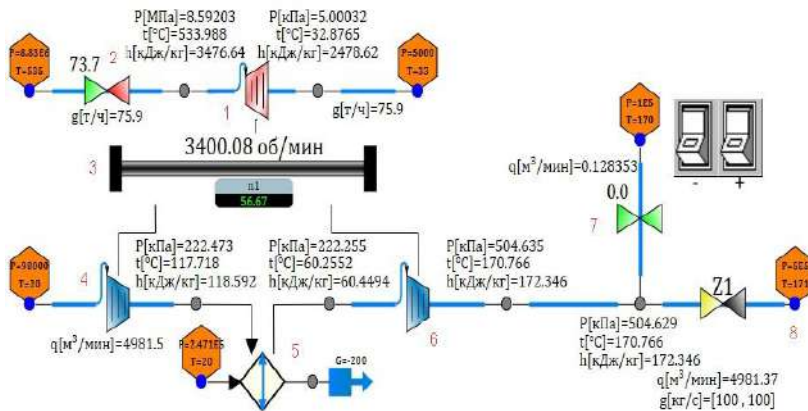


Рис. 1. Общий вид имитационной модели:

- 1 – паровая турбина; 2 – клапан паровой турбины; 3 – ротор; 4 – первая секция компрессора (блок «Компрессор»); 5 – промежуточный воздухоохладитель;
- 6 – вторая секция компрессора; 7 – воздушно-разгрузочный клапан;
- 8 – потребитель

Основной контур системы регулирования турбокомпрессора включает в себя изменение положения рабочей точки посредством изменения частоты вращения ротора.

При таком регулировании рабочая точка турбокомпрессора изменяет свое положение относительно характеристики сети воздуховода [3,4] (рис. 2).

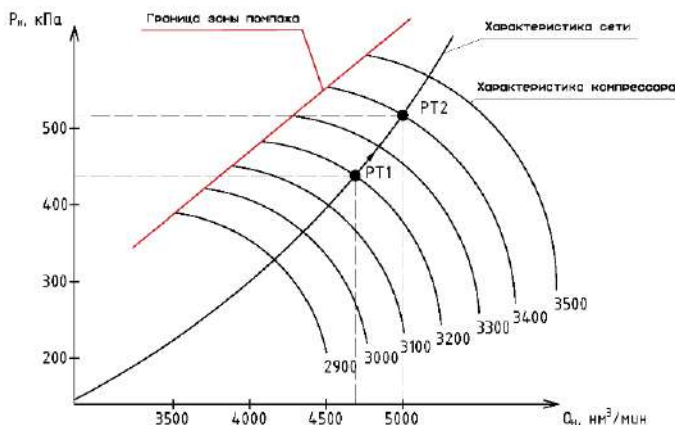


Рис. 2. Изменение рабочей точки компрессора

Контур регулирования по изменению частоты вращения ротора реализован при помощи регулирующего клапана по расходу пара на турбину. Сигнал по изменению положения регулирующего клапана приходит с реализованного в коде общего вида ПИД-регулятора, с заданными коэффициентами настройки и установленной зоной нечувствительности.

Общий вид реализации субструктуры ПИД-регулятора приведен на рис. 3.

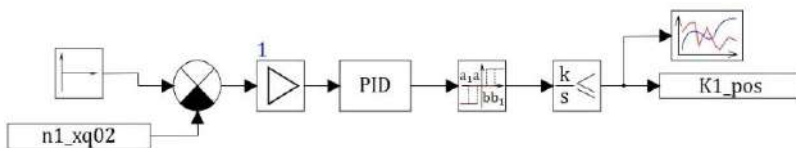


Рис. 3. Реализация ПИД-регулятора

Таким образом, разработанный основной контур регулирования турбокомпрессора на имитационной модели позволяет в будущем проводить исследования в области нахождения оптимальной рабочей точки компрессора, для достижения наилучших параметров дутья на нагнетании.

Литература

1. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. М.: ДМК Пресс, 2017. 424 с.
2. Осинцев В.В., Форостов В.М., Жиргалова Т.Б. Газодинамические расчеты центробежных компрессорных машин: Учеб. пособие. Челябинск: ЧПИ, 1989. 89 с.
3. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров / И.Г. Хисамеев, В.А. Максимов, Г.С. Баткис, Я.З. Гузельбаев. Казань: Изд-во «ФЭН», 2010. 671 с.
4. Особенности регулирования центробежного компрессора при работе на потребителя с жестко заданными параметрами / Д.А. Шинкевич, И.К. Муравьев, М.Д. Сурков // X Международная научно-техническая конференция «Энергетические системы» (ICES-2024В). Белгород, 2024. Т. 9, № 3. С. 66–71.

УДК 004.891.3

А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент
И.А. ПЕРЕСЫПКИН, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: ispolatov.snip1945@yandex.ru

Поиск неисправностей измерительных каналов производственного оборудования и выработка методов для их устранения на основе применения метода дерева принятия решений

Аннотация. В статье рассмотрена разработанная схема дерева принятия решений для поиска неисправностей и рекомендаций к их устранению на основе измерительного канала температуры с термопарой ТХА 600.

Ключевые слова: измерительный канал, диагностика оборудования, температура, неисправность.

A.V. GOLUBEV, candidate of technical sciences, docent,
I.A. PERESYPKIN, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: ispolatov.snip1945@yandex.ru

Finding the measurement channel faults of the production equipment and developing methods for their elimination based on the application of the decision tree method

Abstract. The article considers a developed decision tree diagram for troubleshooting and recommendations for their elimination based on the temperature measuring channel with thermocouple of THC 600.

Key words: measuring channel, equipment diagnostics, temperature, malfunction.

Производительность труда и качество выпускаемой продукции во многом определяется соблюдением требований к точности измерений параметров технологического процесса и скорости реакции системы автоматического управления производством на изменение этих параметров. Непрерывный мониторинг этих параметров обеспечивает полный контроль за состоянием технологического процесса на всех этапах. Заданная точность и быстродействие работы систем автоматического управления оборудованием производства кардинально зависят от работы информационно-измерительной системы [1]. Именно поэтому своевременные профилактические мероприятия и скорость поиска возникших неисправностей измерительных каналов, с их последующим устранением, способны сократить время простоя оборудования, прогнозировать ремонтные мероприятия [3]. Для поиска неисправностей и определения методов их устранения на производстве широко применяются системы диагностики. Реализация алгоритмов диагностики во многом обусловлена развитием технологий искусственного интеллекта. Применение нейросетей позволяет адаптировать диагностические системы и расширить диапазон для поиска и устранения возникающих неисправностей измерительных каналов [2].

В статье предложена структурная схема дерева принятия решений по выявлению и устранению неисправностей измерительного канала температуры, часть которой приведена на рис. 1.

Для диагностики отказов отдельных частей измерительного канала, влияющих на производственный процесс в целом, эффективно применяется метод дерева принятия решений. Метод дерева принятия решений используют чтобы разграничить весь поток входных данных на менее объемные части. Наступление события может быть спрогнозировано в зависимости от наличия определённых условий. Структуру измерительного канала, с возникающими в нем событиями, связанными с отказами или отклонениями значений измеряемых параметров, можно представить графологически в виде древовидной схемы (рис.1). В этой схеме промежуточные звенья структуры будут соответствовать проверяемым условиям, а конечные результатам принимаемых решений.

Для измерения температуры выбрана термопара ТХА-600. В основу структуры дерева принятия решений легли исследования по выявлению характерных признаков неисправностей как термопары, так и всего измерительного канала. Установлены зависимости изменения значений силы тока, сопротивления и напряжения от характера искусственно созданных неисправностей и их комбинаций на всей протяженности измерительного канала. Предложенные алгоритмы для устранения, выявленных по характерным признакам, неисправностей реализованы в виде рекомендаций для их устранения.

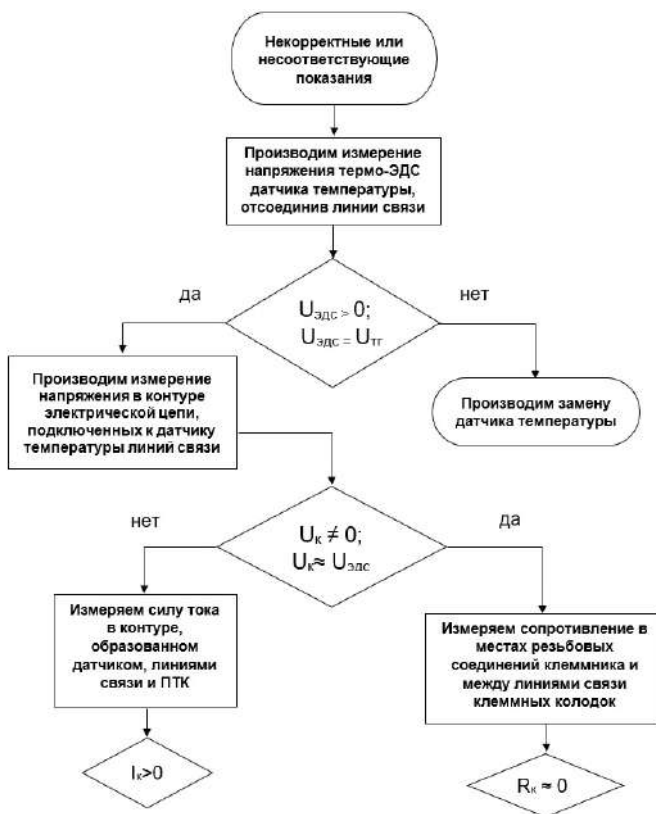


Рис.1. Фрагмент схемы дерева принятия решений для выявления и устранения неисправностей измерительного канала температуры

Литература

1. Технологии искусственного интеллекта в системах диагностики производственного оборудования / И.А. Пересыпкин // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции (Казань, 10-11 апреля 2024 г.) / под общ. ред. И.Г. Ахметовой. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2024. С. 1116–1118.

2. Нейронные сети в экспертных системах производственного оборудования / И.А. Пересыпкин // Математическое моделирование и информационные технологии // Девятнадцатая всероссийская (одиннадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия–2024», г. Иваново, 14–16 мая 2024 г.: Материалы конференции. В 6 т. Т.5. Ива-

ново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2024. С. 23.

3. Автоматизированные информационно-управляющие системы электростанций: учебное пособие / А.В. Голубев, И.К. Муравьев, Ю.В. Наумов. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 180 с.: ил., табл.

УДК 681.513.54

И.К. МУРАВЬЕВ, к.т.н., доцент
А.Ю. ТРИФОНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: muraviev@gapps.ispu.ru, crysis35346723@gmail.com.

Система управления ГТУ с предиктивной моделью

Аннотация. В работе рассмотрена возможность применения алгоритма управления на основе предиктивной модели в системах управления газотурбинных установках.

Ключевые слова: газотурбинная установка, САУ ГТУ, система управления с предиктивной моделью, MATLAB

I.K. MURAVEV, candidate of technical sciences, docent,
A.Y. TRIFONOV, post-graduate student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: muraviev@gapps.ispu.ru, crysis35346723@gmail.com.

Model predictive control system of gas turbine

Abstract. The paper examines the possibility of using a control algorithm based on a predictive model in control systems of gas turbine plants.

Key words: gas turbine unit, gas turbine ACS, model predictive control, MATLAB

Эффективность работы современных газотурбинных установок (ГТУ) в составе парогазовых установок (ПГУ) определяется выполнением технических требований и обеспечения безаварийного режима эксплуатации. Таким образом, разработчик АСУТП неизбежно сталкивается с необходимостью выполнения ряда ограничений при синтезе систем автоматического управления (САУ) ГТУ. Среди таких ограничений: допустимый уровень температуры газа перед и за турбиной, допустимый уровень вибрации турбины, режим работы компрессора на необходимом удалении от границы помпажа и др.

Также в процессе эксплуатации на работу САУ ГТУ влияют изменяющиеся внешние климатические факторы и внутренние факторы ГТУ, выражен-

ными режимами работы оборудования в её составе: давление в камере сгорания, открытие перепускных клапанов, скорость вращения вала.

Система управления с предиктивной моделью (MPC) позволяет учитывать все ограничения на параметры и, таким образом, предотвратить движение объекта к запретной (аварийной) зоне в пространстве измеряемых и оцениваемых параметров [1].

Такая система состоит из двух настраиваемых компонентов: модели процесса и оптимизатора [2].

Модель процесса описывает динамическое поведение системы и используется для предсказания будущих значений выходных переменных. Она может быть представлена в линейной форме (векторно-матричное уравнение) или в нелинейной форме (нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение). Количество временных шагов вперед определяется горизонтом предсказания.

Оптимизатор минимизирует заданную целевую функцию с учётом выбранных ограничений на вектор выходных координат объекта и на вектор управляющих воздействий [3]. Эти ограничения представляются в виде уравнений и неравенств. В результате работы оптимизатора получается последовательность будущих управляющих воздействий до горизонта управления. Структура системы управления с предиктивной моделью представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема системы управления с предиктивной моделью

Управление с предиктивной моделью выполняется в следующем порядке:

1. На основе текущего состояния системы модель оценивает вектор выходных координат $\hat{z}(k)$ до горизонта предсказания N_p .

В каждом интервале управления оптимизатор находит будущие управляющие координаты $\hat{u}(k)$ до горизонта управления N_u .

2. Первый элемент в оптимальной последовательности является управляющим для объекта управления, а остальная последовательность отбрасывается.

3. Весь расчет повторяется для следующего временного шага.

Принцип действия системы управления представлен на рис. 2.

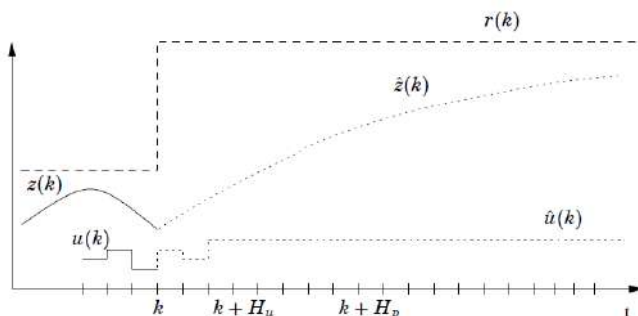


Рис. 2. К описанию действия системы управления с предиктивной моделью: $\hat{z}(k), \hat{u}(k)$ – вектор выходных и управляющих координат, $r(k)$ – вектор задающих координат, H_p, H_u – горизонты предсказания и управления

Таким образом регулятора с предиктивной моделью представляет собой единый блок, в котором решается задача оптимизации относительно всех управляющих координат. Схема управления ГТУ представлен на рис. 3.

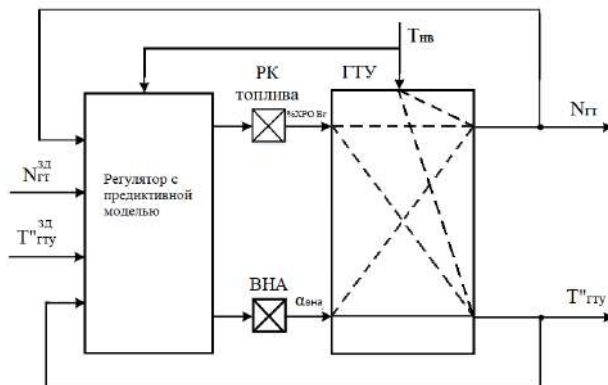


Рис. 3. Схема управления ГТУ с предиктивной моделью: $N_{ГТ}^{зд}, N_{ГТ}$ – заданное и выходная мощность ГТУ; $T_{ГТ}^{изм}, T_{ГТ}^{зд}$ – заданная и измеренная температуры газов за ГТ; $B_{Г}$, $\alpha_{ВНА}$ – расход топлива и положение входного направляющего аппарата; $T_{нв}$ – температура наружного воздуха

Таким образом, применение систем с предиктивной моделью позволяет учитывать все технические ограничения на параметры объекта управления и предотвратить появление аварийной ситуации для ГТУ.

Литература

1. Qin S.J., Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology //Control engineering practice. 2003. Т. 11. №. 7. С. 733-764.
2. Rawlings J. B. et al. Model predictive control: theory, computation, and design. Madison, WI : Nob Hill Publishing, 2017. Т. 2. 770 p.
3. Аракелян Э.К. Оптимизация и оптимальное управление: учеб. пособие / Э.К. Аракелян, Г.А. Пикина; под ред. Т.Е. Щедркиной. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 408 с.

УДК 621.31:004.942:378.147

А.Н. НИКОНОРОВ, к.т.н., доцент
В.М. ГРЕСЕВА, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: anick037@mail.ru, whyoletwhy@gmail.ru

Разработка учебных моделей энергетических установок в ПТК «СУРА»

Аннотация. В работе представлена разработка учебных имитационных моделей паровой турбины и ядерного реактора в ПТК «СУРА», основанных на системе дифференциальных уравнений, реализованных на языке FBD с использованием макросов для визуализации данных через мнемосхемы.

Ключевые слова: учебные модели, энергетические установки, ПТК «СУРА», имитационное моделирование, FBD.

A.N. NIKONOROV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
V.M. GRESEVA, Master's Student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: anick037@mail.ru, whyoletwhy@gmail.ru

Development of Educational Models of Power Plants in SURA PTC

Abstract. The article presents the development of educational simulation models of a steam turbine and a nuclear reactor in SURA PTC, based on a system of differential equations implemented in FBD language using macros for data visualization via mimic diagrams.

Key words: educational models, power plants, SURA PTC, simulation modeling, FBD.

Современные энергетические системы сталкиваются с необходимостью внедрения инновационных методов управления и подготовки специалистов, способных работать в условиях цифровой трансформации отрасли. Актуальность разработки учебных имитационных моделей энергетических установок обусловлена ограниченным доступом сту-

дентов к реальным промышленным объектам. Это создаёт пробел в формировании практических навыков, критически важных для работы в энергетике [1]. Программно-технический комплекс «СУРА» (ПТК «СУРА»), используемый как на действующих электростанциях, так и в образовательных целях, стал основой для создания моделей, максимально приближенных к реальным процессам [2].

Новизна исследования заключается в применении языка функциональных блок-диаграмм (FBD) в ПТК «СУРА» для проектирования энергетических объектов, что обеспечивает наглядное представление динамики сложных, таких как ядерный реактор или паровая турбина.

Практическая ценность исследования заключается в реализации потенциала ПТК «СУРА» в образовательном процессе, что обеспечивает следующие преимущества. Во-первых, платформа позволяет осуществлять удалённую разработку учебных проектов, обеспечивая доступность обучения для студентов вне зависимости от их местоположения. Это особенно актуально в условиях цифровизации образования, так как сокращает временные и ресурсные затраты на развёртывание проектов на вычислительных ресурсах университета.

Во-вторых, интеграция ПТК «СУРА» в учебный процесс способствует оперативному взаимодействию между студентами и преподавателями. Учащиеся могут передавать полные проектные данные для анализа, что упрощает диагностику ошибок и повышает эффективность обратной связи. Кроме того, поддержка распределённой разработки исключает необходимость физического доступа к аппаратным компонентам, на этапе проектирования, что соответствует современным тенденциям аутсорсинга в инженерной практике.

Данный подход не только оптимизирует образовательный процесс, но и формирует у студентов навыки работы с промышленными системами управления, критически важные для их профессиональной подготовки. Таким образом, исследование демонстрирует, что ПТК «СУРА» может служить инструментом как для академического обучения, так и для моделирования реальных сценариев управления энергетическими объектами.

Задачи исследования:

- 1) разработка математических моделей энергоустановок на языке FBD;
- 2) автоматизация визуализации данных через макросы и интеграция с аналитическими инструментами;
- 3) верификация моделей путём сравнения с теорией и оценки устойчивости;
- 4) адаптация моделей для учебного процесса с анализом удобства среды разработки.

В рамках исследования были разработаны имитационные модели паровой турбины и ядерного реактора, соответствующие требованиям как образовательных, так и промышленных стандартов. Для паровой

турбины формализована система из пяти дифференциальных уравнений [3], отражающих её термодинамические и механические характеристики. Реализация дифференциальных уравнений паровой турбины на языке FBD представлена на рис. 1.

Модель ядерного реактора включает параметры, учитывающие специфику нейтронно-физических процессов. Модель состоит из семи дифференциальных уравнений [4], отражающих динамику изменения плотности нейтронов, температур теплоносителей и мощностей постепенного тепловыделения. Обе модели реализованы на языке FBD с использованием макросов, что обеспечило автоматизацию передачи данных на мнемосхемы и их архивацию для последующего анализа.

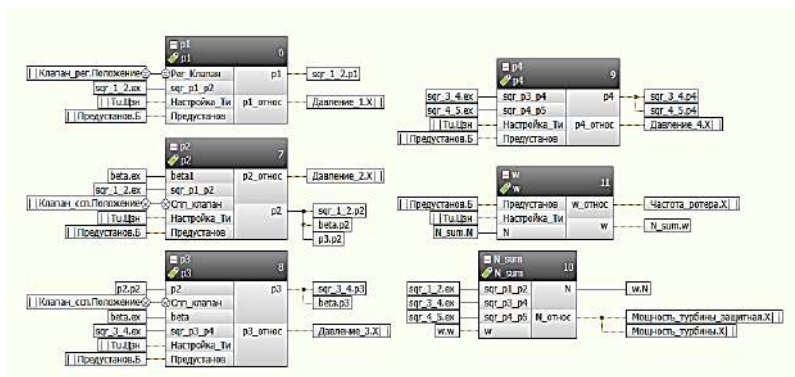


Рис. 1. Реализация дифференциальных уравнений паровой турбины

Перспективы исследования связаны с расширением функциональности ПТК «СУРА». В будущем планируется дополнение моделями парогенератора и пароперегревателя для интеграции уже созданных объектов в единую имитационную систему, что обеспечит комплексное моделирование энергетических блоков.

Таким образом, исследование подтвердило эффективность ПТК «СУРА» для создания учебных имитационных моделей энергетических установок. Разработаны модели паровой турбины и ядерного реактора на основе систем дифференциальных уравнений, реализованных на языке FBD. Верификация показала соответствие моделей промышленным прототипам.

Литература

1. Тверской Ю.С., Целищев Е.С., Голубев А.В., Никоноров А.Н., Муравьев И.К. Опыт и особенности инновационной подготовки специалистов по автоматизации на полигоне АСУТП электростанций // Автоматизация в промышленности. 2019. №9. С. 14-20.

2. Комплексы программно-технические «СУРА» Руководство по эксплуатации Принципы проектирования АДИГ.421457.005 РЭ5 [Электронный ресурс]: документация. 2023.

3. Северин В.П., Гордлевская К.Б. Нелинейные модели систем автоматического управления паровой турбиной К-1000-60/1500. Вестник Национального технического университета ХПИ, 2012. 116 с.

4. Никулина Е.Н., Северин В.П., Лукинова Д.А. Математические модели для исследования переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 серии В-320. Вестник Национального технического университета ХПИ, 2018. 18 с.

УДК 681.5

А.М. КУРБАНГАЛЕЕВА, студент
Д.З. НИГМАТЗЯНОВ, студент
У.Г. ЧЕРМАСОВА, студент
И.Д. ШАФИГУЛЛИН, студент
Г.В. НИКИШИНА, к.т.н. доцент

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева – КАИ
420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
E-mail: adelina_k03@mail.ru

Разработка модели коллаборативного робота на микроконтроллере STM32

Аннотация. Статья посвящена разработке модели коллаборативного робота для производства на базе микроконтроллера STM32. Представлена структурная схема модели и описан принцип работы системы.

Ключевые слова: коллаборативный робот, шаговый двигатель, датчик Холла, микроконтроллер.

A.M. KURBANGALEEVA, graduate student
D.Z. NIGMATSYANOV, graduate student
U.G. CHERMASOVA, graduate student
I.D. SHAFIGULLIN, graduate student
G.V. NIKISHINA, PhD Associate Professor

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
420111, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, st. K. Marx, 10
E-mail: adelina_k03@mail.ru

Development of a collaborative robot model on the STM32 microcontroller

Abstract. The article is devoted to the development of a model of a collaborative robot for production based on the STM32 microcontroller. The structural diagram of the model is presented and the operating principle of the system is described.

Key words: collaborative robot, stepper motor, Hall sensor, microcontroller.

Современное производство с каждым годом требует все большей автоматизации процессов. Автоматизированные устройства, такие как коллаборативные роботы могут работать как самостоятельно, так и под руководством человека. Данные устройства позволяют выполнять относительно тяжелые и опасные для человека работы, а также способствуют более эффективному и быстрому выполнению задач. В данной работе представлена разработка составной части прототипа коллаборативного робота, а именно устройства перемещения предметов. Существует разного рода реализаций таких роботов [1,2]. В данной работе рассматривается следующая реализация модели коллаборативного робота, структурная схема которой представлена на рис. 1. Для реализации данного прототипа были использованы два датчика Холла, шаговый двигатель и аппаратная платформа STM32 со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

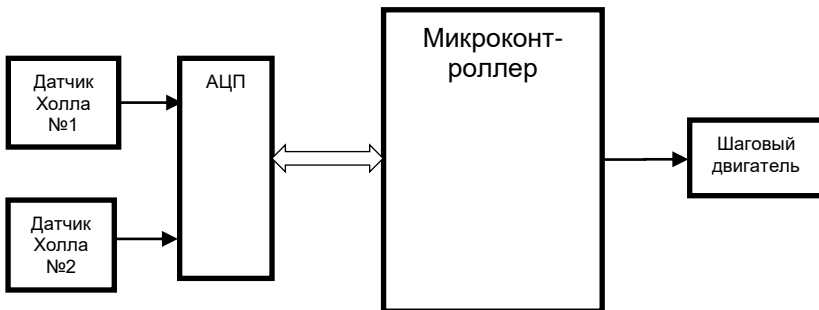


Рис. 1. Структурная схема устройства перемещения объектов прототипа коллаборативного робота

Для ограничения диапазона движения привода были использованы два датчика Холла KY-024. Выбор именно данного датчика основан на том, что датчик обладает низким уровнем шума и не требует дополнительных фильтров питания, имеет пониженное потребление тока 6 мА, при питании от источника 5 В.

Для реализации движения коллаборативного робота был выбран четырехфазный шаговый двигатель 28BYJ-48. Цифровой вывод микроконтроллера может выдать ток ~40 мА, а одна обмотка 28BYJ-48 в пике потребляет ~320 мА, следовательно, необходим усилитель тока, в качестве которого был выбран драйвер DRV8825. Основная микросхема модуля – это драйвер от TI (Texas Instruments Inc.) DRV8825, которая способна управлять одним биполярным шаговым двигателем. Микросхема DRV8825 может работать с выходным напряжением до 45 В и

током до 1,5 А на катушку без дополнительного охлаждения и до 2,5 А с использованием радиаторов.

Датчики Холла были расположены таким образом, чтобы диапазон вращения шагового двигателя составлял 60 градусов. В процессе работы, шаговый двигатель проворачивает плечо устройства перемещения, на котором установлен магнит. Магнитное поле, создаваемое данным постоянным магнитом, фиксируется при помощи датчика Холла. По достижению заданного угла поворота, устанавливаемого программой, шаговый двигатель останавливает вращение.

Программная часть модели коллаборативного робота реализована на микроконтроллере STM32F103C8T6 (Blue pill). Выбор данного микроконтроллера основан на его доступности, простоте и удобстве в программировании алгоритмов работы электронных устройств. К микроконтроллеру подключены: шаговый двигатель для реализации движения руки, два датчика Холла для ограничения хода шагового двигателя в диапазоне 60 градусов.

Алгоритм работы программной части заключается в следующем: в момент запуска устройства перемещения микроконтроллер проводит настройку шагового двигателя, а именно запускает таймер для измерения длительности движения шагового двигателя в одном направлении и запускает генератор ШИМ сигнала с заданной частотой для задания определенной скорости движения шагового двигателя. В качестве информационных сигналов микроконтроллер получает сигналы с аналогового выхода датчика на один из выбранных каналов АЦП. Микроконтроллер сравнивает полученные значения с заранее прописанным в коде пороговым значением, и если полученное значение оказывается меньше порогового и время движения шагового двигателя в одном направлении меньше указанного в коде значения времени, то направление движения шагового двигателя меняется на противоположное. Если длительность движения шагового двигателя в одном направлении оказывается больше длительности прописанного в коде, то шаговый двигатель прекращает свое движение на заданное время. По истечению установленного времени таймер запускает цикл заново.

Таким образом, в рамках данной работы на основе микроконтроллера STM32 было реализовано устройство перемещения объектов, являющееся одним из узлов модели коллаборативного робота для выполнения простых производственных задач.

Литература

1. Тимергалина, Г.В. Автоматизированная система управления роботизированной рукой / Г.В. Тимергалина, Т.П. Никишин, Е.С. Денисов // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2014; Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2014: Материалы Международных научно-технических конференций, Казань, 18–21 ноября 2014 года. Т. 3. Казань: Изд-во Казанского гос. техн. ун-та, 2014. С. 346-348.

2. Никишин, Т.П. Разработка и реализация алгоритма управления роботизированной рукой / Т.П. Никишин, Г.В. Тимергалина // Международная молодежная научная конференция "XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых)": Материалы конференции: сборник докладов, Казань, 19–21 октября 2015 года / Российский фонд фундаментальных исследований, Казанский национальный исследовательский технический университет им. АН. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). Т. IV. Казань: Изд-во "Фолиант", 2015. С. 741-745.

УДК 681.5.015:519.6

А.Н. НИКОНОВ¹, к.т.н., доцент
В.В. ЕЛИСЕЕВ^{1,2}, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34^{1, 2}
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123098, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1²
E-mail: anick037@mail.ru¹, vadim_eliseev@vk.com²

Численные методы расчета динамических систем управления: идентификация, моделирование, оптимизация

Аннотация. Статья посвящена разработке методики применения численных методов для анализа и проектирования систем управления. Методы позволяют провести идентификацию канала управления в виде передаточной функции; моделировать автоматическую систему регулирования (АСР) для поиска оптимальных настроек ПИД-регулятора.

Ключевые слова: численные методы, системы управления, метод Симона, передаточные функции, обратное преобразование Лапласа, тернарный поиск, АСР, ПИД-регулятор.

A.N. NIKONOROV¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
V.V. ELISEEV², Master's Student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34^{1, 2}
National Research Center «Kurchatov Institute»,
123098, Moscow, Akademika Kurchatova Sq., 1²
E-mail: anick037@mail.ru¹, vadim_eliseev@vk.com²

Numerical Methods for Calculating Dynamic Control Systems: Identification, Simulation, Optimization

Abstract. The article focuses on the development of numerical methods for the analysis and design of control systems. The proposed methods enable the identification of a control channel as a transfer function and the simulation of an automatic control system (ACS) to determine optimal settings for a PID controller.

Key words: numerical methods, control systems, Simeyu method, transfer functions, inverse Laplace transform, ternary search, ACS, PID controller.

Введение. Современные системы управления требуют точного анализа и проектирования, особенно в условиях нелинейности, шумов и переменных параметров. Численные методы играют ключевую роль в решении задач идентификации, моделирования и оптимизации таких систем, обеспечивая баланс между вычислительной сложностью и точностью.

Идентификация методом Симою. Метод Симою [1] позволяет определить передаточную функцию (ПФ) объекта управления $W(p) = B(p) / A(p)$ по экспериментальным данным «вход-выход». Метод устойчив к равномерному шуму.

Для вычисления коэффициентов ПФ определяется порядок числителя и знаменателя, применяются формулы:

$$\mu_k = \frac{1}{k!} \int_0^\infty (-t)^k (1 - h(t)) dt; \quad (1)$$

$$S_k = \mu_{k-1} + \sum_{i=0}^{k-2} \mu_i \times S_{k-1-i}; \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_1 = b_1 + S_1 \\ a_2 = b_2 + b_1 S_1 + S_2 \\ a_3 = b_3 + b_2 S_1 + b_1 S_2 + S_3 \\ \dots \\ a_k = b_k + \sum_{i=1}^{k-1} b_i S_{k-i} + S_k \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета коэффициентов передаточной функции $W(p)$ по зашумленным входным данным.

Моделирование передаточной функции. Для перехода от $W(p)$ к временным характеристикам $h(t)$ (переходная) и $w(t)$ (импульсная) применяется обратное преобразование Лапласа. Этапы:

1. Разложение знаменателя на биномы:

Полином $A(p) = a_0 \cdot p^0 + a_1 \cdot p^1 + \dots + a_n \cdot p^n$ раскладывается на биномы методом Лаггера [2], эффективным для нахождения комплексных корней:

$$a_0 p^0 + a_1 p^1 + \dots + a_n p^n = (p - r_1)(p - r_2) \dots (p - r_n). \quad (4)$$

2. Разложение на простейшие дроби:

Правильная рациональная дробь ПФ раскладывается на простейшие дроби, рассчитываются коэффициенты $A_0, A_1, \dots, A_n$:

$$\frac{W(p)}{p} = \frac{A_0}{p} + \frac{A_1}{p - r_1} + \dots + \frac{A_n}{p - r_n}. \quad (5)$$

3. Обратное преобразование:

Используется табличное обратное преобразование Лапласа [3] по универсальной формуле:

$$\frac{t^n}{n!} \exp(r \times t) = \frac{1}{(p - r)^{n+1}}. \quad (6)$$

Результирующие аналитические функции $h(t)$ и $w(t)$ позволяют анализировать устойчивость, перерегулирование и время установления процесса.

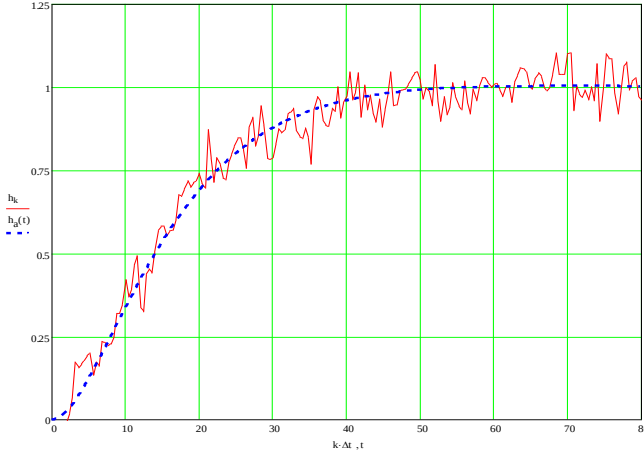


Рис. 1. Идентификация объекта управления по переходной характеристике

Поиск оптимальной настройки регулятора. Рассчитывается область заданного запаса устойчивости АСР методом расширенных комплексных частотных характеристик (РКЧХ) [4].

Для ПИ-регулятора применяются формулы:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = C_1 + \frac{C_0}{p}; \quad (7)$$

$$\begin{cases} C_0(\omega) = \omega \times (m^2 + 1) \times I^* \\ C_1(\omega) = m \times I^* - R^* \end{cases}. \quad (8)$$

Исследуются настройки регулятора при частотах, когда C_0 и C_1 положительные. Вычисленные настройки регулятора от частоты подставляются в ПФ АСР, вычисляется заданный критерий ошибки.

Если значения критерия ошибки в исследуемой области частот имеют один экстремум, то есть, функция является унимодальной, применяется тернарный поиск (рис. 2).

Преимущества тернарного поиска:

- диапазон делится на 3 части;
- на каждой итерации отбрасывается треть диапазона;
- сходимость за $O(\log_{3/2} N)$ шагов.

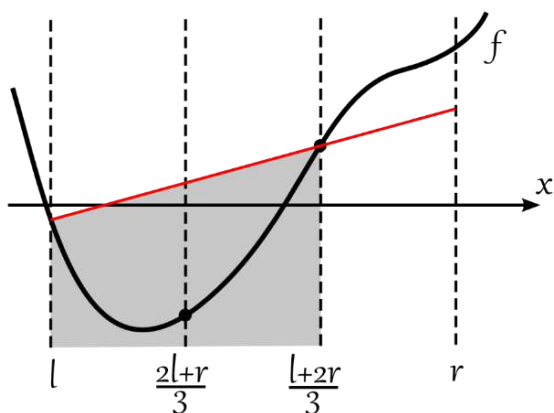


Рис. 2. Итеративное сужение области тернарного поиска

Таким образом, разработанная методика позволяет:

- 1) надёжно идентифицировать передаточные функции в зашумлённых условиях (метод Симою);
- 2) моделировать динамику систем через обратное преобразование Лапласа с учётом кратных корней;
- 3) автоматизировать настройку ПИД-регулятора с гарантией сходимости при унимодальности функции критерия.

Литература

1. Наумов Ю.В., Никоноров А.Н., Вилесов Р.А. Практикум по курсу «Идентификация и диагностика систем» для магистров направления 27.04.04 «Управление в технических системах», Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина», 2016, С. 72.
2. Ванкере Р. Итерационные методы для корней многочленов, Оксфорд, Великобритания: Оксфордский университет, 2001. С. 63.
3. Романовский П.И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразования Лапласа, Москва: Наука, 1980. С. 336.
4. Таламанов С.А. Совершенствование методологии автоматизации настройки систем регулирования в составе АСУТП тепловых электростанций: дис. док. техн. наук: 05.13.06: защищена 27.10.06: утв. 00.11.06 / Таламанов Сергей Александрович. Иваново, 2006. 388 с.

УДК 533.6.071

И.К. МУРАВЬЕВ, к.т.н., доцент,
Д.А. ШИНКЕВИЧ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru, dan-shinkevich@yandex.ru

Оценка влияния различных конструктивных решений компрессоров на энергоэффективность доменного производства

Аннотация. В данной работе рассматриваются особенности применения центробежных и осевых компрессоров на паровоздушных станциях металлургических комбинатов для обеспечения дутья доменных печей. Представлены методы регулирования производительности компрессоров.

Ключевые слова: центробежный, осевой турбокомпрессор, регулирование

I.K. MURAVEV, candidate of technical sciences, docent,
D.A. SHINKEVICH, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University
34, Rabfakovskaya St., 153003, Ivanovo
E-mail: kafsu@su.ispu.ru, dan-shinkevich@yandex.ru

Assessment of the impact of different compressor design solutions on the energy efficiency of blast furnace production

Abstract. This article examines the specific application of centrifugal and axial compressors in power air stations at metallurgical plants, focusing on their role in providing air for blast furnaces. Methods for regulating compressor performance are presented.

Key words: centrifugal, axial turbocharger, regulation.

На паровоздушной станции (ПВС) металлургического комбината для обеспечения дутья доменной печи – сжатого воздуха, обогащенного кислородом – используются турбокомпрессорные агрегаты. Для этих целей особенно распространены центробежные и осевые компрессоры, которые имеют различное конструктивное исполнение. Объемная производительность таких агрегатов обычно составляет до 7000 м³/мин.

Центробежные компрессоры, как правило, обеспечивают высокое повышение давления в одной ступени за счет высоких окружных скоростей рабочих колес. Сложность многоступенчатой конструкции, обусловленная необходимостью многократных поворотов воздушного потока, может, впрочем, приводить к потерям давления. [1].

Осевые компрессоры, наоборот, демонстрируют высокую эффективность на расчетных режимах и способны обрабатывать большие

объемы воздуха при меньших поперечных размерах. Это достигается за счет прямолинейного движения потока вдоль оси компрессора.

Однако, такие компрессоры обычно имеют большую длину (за счет большого количества секций и воздухоохладителей между ними), а их конструкция сложнее и дороже в изготовлении. Управление осевым компрессором может осуществляться с помощью входного направляющего аппарата (ВНА), который регулирует угол атаки лопаток и, следовательно, производительность.

Использование ВНА в центробежных турбокомпрессорах не является широко распространенным из-за аэродинамических недостатков, связанных со снижением КПД: увеличение поверхностей трения даже при исходном положении лопаток, появление срывных зон при повороте лопаток на большие углы и несоответствие профиля потока, создаваемого ВНА, оптимальному профилю для входа в рабочее колесо, что приводит к увеличению углов атаки и дальнейшему снижению эффективности компрессора [2].

Основным способом регулирования обоих компрессоров является изменение частоты вращения ротора паровой турбины, изменяя положение рабочей точки (РТ) на характеристике сети от РТ1 до РТ2, и наоборот (рис. 1).

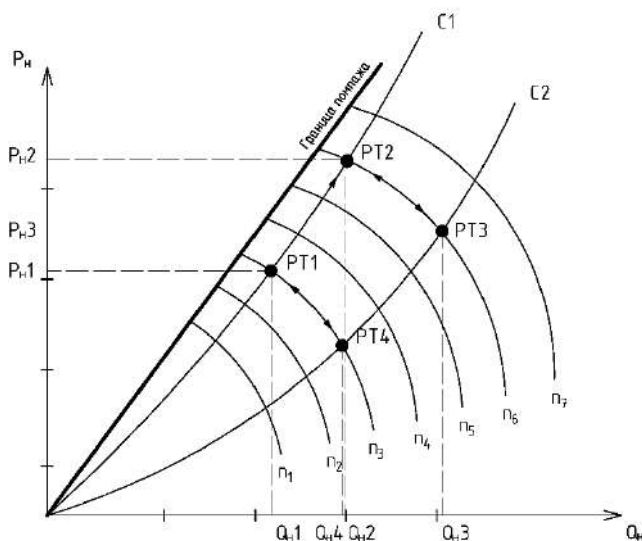


Рис. 1. Изменение положения рабочей точки центробежного и осевого турбокомпрессоров

Дополнительно, для изменения характеристики сети от С1 до С2, используется способ со сбросом излишек воздуха через воздушно-разгрузочный клапан в атмосферу. Такой способ часто применяется в центробежных компрессорах [3].

В осевых компрессорах входной направляющий аппарат (ВНА) обычно размещается перед первым рабочим колесом, но может быть установлен и в других секциях компрессора. Изменение угла установки лопаток ВНА позволяет корректировать угол входа газового потока на рабочее колесо, что, в свою очередь, влияет на рабочую точку компрессора и его выходные параметры (давление P_n и объемный расход Q_n на нагнетании), перемещая рабочую точку по характеристике сети (С) от РТ1 к РТ4 или от РТ2 к РТ3. [4].

Таким образом, использование ВНА на осевых компрессорах позволяет изменять характеристику сети, не сбрасывая сжатый воздух в атмосферу. Из-за аэродинамических недостатков регулирование центробежными компрессорами при помощи ВНА нецелесообразно. Для изменения характеристики сети используется сброс воздуха в атмосферу, что приводит к снижению энергоэффективности системы.

Литература

1. Черкасский, В.М. Насосы, компрессоры, вентиляторы: учебное пособие для энергетических вузов и факультетов / В.М. Черкасский, Т.М. Романова, Р.А. Кауль. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1968. 304 с.: ил.
2. Карабанова, В.В. Влияние формы профиля лопатки входного направляющего аппарата на газодинамические характеристики центробежной компрессорной ступени / В.В. Карабанова, А.Д. Ванышов, В. Л. Юши // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т.4, № 4. С. 41–48.
3. Особенности регулирования центробежного компрессора при работе на потребителя с жестко заданными параметрами / Д.А. Шинкевич, И.К. Муравьев, М.Д. Сурков // X Международная научно-техническая конференция «Энергетические системы» (ICES-2024В). Белгород, 2024. Т. 9, № 3. С. 66–71.
4. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров / И.Г. Хисамеев, В.А. Максимов, Г.С. Баткис, Я.З. Гузель-баев. Казань: Изд-во «ФЭН», 2010. 671 с.

СЕКЦИЯ 6.

ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

УДК 621.43.038.771

В.Д. БУРОВ¹ к.т.н.,
Ю.А. МАКАРКИН² студент

Московский энергетический институт,
111250, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1
E-mail: BurovVD@mpei.ru¹, MakarkinYA@mpei.ru²

Влияние эффективности воздушных фильтров на эксплуатационные характеристики ГТУ

Аннотация. В работе рассмотрен способ продления ресурса ГТУ, а также уменьшение снижения её технико-экономических показателей (ТЭП) с течением времени. Значительное влияние на состояние проточной части компрессора и отдельных элементов ГТУ оказывает качество подготовки рабочего тела. Для очистки воздуха, от содержащихся в нем примесей, служат воздушные фильтры с разной эффективностью очистки.

Ключевые слова: газотурбинная установка, комплексное воздухоочистительное устройство (КБОУ), фильтрация рабочего тела ГТУ, загрязнения воздуха, деградация мощности ГТУ

V.D. BUROV¹, Doctor of Engineering,
Y.A. MAKARKIN² student

Moscow Power Engineering Institute,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya street 14, p. 1
E-mail: BurovVD@mpei.ru¹, MakarkinYA@mpei.ru²

The influence of air filter efficiency on the performance of gas turbines

Abstract. The paper considers a method for extending the service life of a gas turbine unit, as well as reducing the decline in its technical and economic indicators (TEI) over time. The quality of the working fluid preparation has a significant impact on the condition of the flow part of the compressor and individual elements of the gas turbine unit. Air filters with different cleaning efficiency are used to clean the air from impurities contained in it.

Key words: gas turbine unit (GTU), inlet air filtration system, preparation of the GTU working fluid, air pollution, GTU power degradation

В настоящий момент, одной из проблем при эксплуатации энергетических газовых турбин, является сохранение их ресурса и технических характеристик. В РФ в эксплуатации находится порядка 300 ГТУ, подавляющее большинство из которых, производства зарубежных компаний, таких как Siemens, GE, Alstrom и т.д. [1].

В среднем, для энергетической газовой турбины, газозоодушная смесь на выходе из камеры сгорания, состоит из 97% атмосферного воздуха и 3% топлива [2]. Поэтому высокая концентрация распыленных аэрозолей или мелко и грубодисперсных частиц, может значительно повлиять на технико-экономические показатели (ТЭП) ГТУ. Несмотря на то, что концентрация пыли в воздухе находится на довольно низком уровне (приблизительно 0,1 мг/м³), газовые турбины потребляют огромное количество воздуха [3].

Подавляющее количество частиц в атмосферном воздухе имеют размер от 0,1 мкм до 1,0 мкм. Скорость их осаждения крайне низкая или равна нулю, поэтому они с большей вероятностью задерживаются в воздухе.

С течением времени, выходная мощность газовой турбины снижается, в том числе из-за загрязнения проточной части компрессора, охлаждающих каналов лопаток газовой турбины, эрозионного износа. Частицы, содержащиеся в атмосферном воздухе, попадают в проточную часть осевого компрессора и оседают. В результате образуется слой отложений, ухудшающий работу компрессора – на его привод затрачивается больше энергии, в результате выходная мощность ГТУ снижается. Чтобы уменьшить количество загрязнений, попадающих в тракт ГТУ, в составе КВОУ применяются системы фильтрации воздуха (СФ).

На текущий момент, стандартной комплектацией КВОУ энергетических ГТУ является СФ с фильтрами: влагоотделитель (ВЛО) класса G2-G4; фильтр грубой очистки (ФГО) класса G4-M6; фильтр тонкой очистки (ФТО) класса F7-F9. Подобная система защищает двигатель от влаги, крупнодисперсной пыли и частиц размером 0,4 мкм. В составе атмосферного воздуха наибольшее количество частиц приходится на частицы с “промежуточным” размером около 0,25 мкм. Их называют частицами с наибольшей проникающей способностью или Most Penetrating Particle Size (MPPS). Фильтры общего назначения, упомянутые выше, не обладают достаточной эффективностью для улавливания частиц подобного размера. Вследствие чего, они проходят через систему фильтрации и попадают в тракт ГТУ [4].

Фильтры классов E10-E12, H13-H14, U15-U17 способны очистить воздух от любых примесей, распыленных в нем. В области энергетических ГТУ наибольшее распространение получили фильтры классов E10-E12 из-за своей относительно невысокой стоимости. За счет применения высокоэффективных фильтров ЕРА и НЕРА эксплуатирующим организациям удается значительно сократить скорость деградации ТЭП ГТУ. В результате сокращаются издержки связанные с перерасходом топлива, недопоставкой мощности, промывками ОК.

В исследовании [5] сравниваются 3 различные СФ, установленные в КВОУ ГТЭ-160 Затонской ТЭЦ ООО «БГК». До 2020 года, турбина эксплуатировалась с штатной СФ с фильтрами G2+G4+F9 классов очистки. После 2020 года, СФ была модернизирована до M6+E10. В 2023 году,

эффективность СФ была повышена за счет применения фильтра Е11 в качестве финишной очистки. В результате удалось отказаться от on-line промывок ОК, тем самым снижая эксплуатационные затраты. Сравнение эффективности различных СФ производится на основании изменения приведенной мощности и приведенного удельного расхода топлива в начале и конце периода исследования (табл. 1). Приведение мощности и расхода к нормальным условиям производится по методике, описанной в стандарте [6]. По результатам расчетов видно, что с повышением эффективности СФ, издержки, связанные с деградацией ТЭП ГТУ снижаются.

Таблица 1. Результаты расчета различных СФ

Параметр	Система фильтрации		
	G2+G4+F9	M6+E10	M6+E11
Число часов за период исследования	2959,0	2950,5	3576,0
Снижение приведенной мощности, МВт	2,299	0,602	0,842
Недовыработка мощности, МВт·ч	3400,61	887,87	1505,31
Упущенная прибыль из-за снижения мощности, руб	1700303,78	443934,42	752656,53
Перерасход топлива, м ³	466225,37	331325,02	255271,95
Издержки из-за перерасхода топлива, руб	2098014,15	1490962,61	1148723,79
Затраты на on-line промывки, руб	277150	292862	0,00
Суммарные издержки, руб	4075467,93	2227759,59	1901380,32
Суммарные издержки отнесенные к часу работы, руб/час	1377,31	755,05	531,71

Литература

1. Минпромторг оценил потребность в ГТУ большой и средней мощности до 2035 года в 42-80 штук [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://peretok.ru/news/engineering/19182/?ysclid=Iz9mjrf58n1987885080> (дата обращения: 01.04.2025).
2. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: под ред. С.В. Цанева. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 584 с., ил.
3. Марко Сантини, Джорджо Марчетти, Фиоренцо Джунтини, Кармен Суарес. Высокоэффективные воздухоочистительные системы для ГТУ / компания "GE OIL & GAS".
4. Макаркин Ю.А. Развитие систем фильтрации и применение высокоэффективных НЕРА фильтров / Е.О. Арахланов, А.Р. Богдан, В.Д. Буров, Быличкин В.И., Ю.А. Макаркин // Турбины и дизели. 2024. №3. С. 30-35.
5. Макаркин Ю.А. Влияние систем фильтрации воздуха ГТУ на её эксплуатационные характеристики / Н.П. Шевченко, А.Р. Богдан, В.Д. Буров, В.И. Быличкин, Ю.А. Макаркин // Турбины и дизели. 2024. №5. С. 52-58.
6. ГОСТ Р 55798-2013 (ИСО 2314:2009). Установки газотурбинные. Методы испытаний. Приемочные испытания. М.: Изд-во стандартов, 2015.

УДК 621.311.22

В.Д. БУРОВ, к.т.н., профессор,
В.Д. УЛАНОВ, студент,
О.В. НЕКРАСОВ, технический директор ООО «МЭП»

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, Красноказарменная улица, 14
E-mail: burovvd@mail.ru, UlanovVD@mpei.ru
Общество с ограниченной ответственностью «Мосэнергопроект» (ООО «МЭП»)
105066, г. Москва, ул. Спартаковская, д.2а, стр.2
E-mail: NekrasovOV@mep.ru

Семейство теплофикационных турбин Т-250/300-23,5

Аннотация. В данной работе рассмотрены пути модернизации теплофикационной турбины Т-250/300-23,5 на более современную Т-259/307-23,5, возможность замены энергоблока на новый с турбиной Т-295/335-23,5, а также новая модификация турбины Т-275/320-240, которая разрабатывается Уральским турбинным заводом.

Ключевые слова. Энергоблок, теплофикационная турбина, конструкторские отличия.

V.D. BUROV, Ph.D., Professor,
V.D. ULANOV, student,
O.V. NEKRASOV, technical director LLC «MEP»,

National Research University «MPEI»
111250, Moscow, Krasnokazarmennay st, 14
E-mail: burovvd@mail.ru, UlanovVD@mpei.ru
Limited Liability Company «MOSENERGOPROJECT» (LLC «MEP»)
105066, Moscow, Russian Federation, Spartakovskaya st., 2a bld, 2,
E-mail: NekrasovOV@mep.ru

Family of T-250/300-23,5 cogeneration turbines

Abstract. This paper examines the pathways for modernizing the T-250/300-23.5 cogeneration turbine to the more advanced T-259/307-23.5 model, explores the possibility of replacing the existing power unit with a new one equipped with the T-295/335-23.5 turbine, and introduces a new modification of the T-275/320-240 turbine currently under development by the Ural Turbine Works.

Key words: Power unit, cogeneration turbine, design differences.

На момент начала производства энергоблока на базе турбины Т-250/300-23,5 Уральского турбинного завода являлись самыми мощными паротурбинными теплофикационными блоками в мире. В период СССР на 11 крупных ТЭЦ в таких городах как Москва, Ленинград, Киев, Минск, Харьков было установлено 31 турбина, из них 19 в структуре ПАО «Мосэнерго». В 1967 г. турбина была разработана и поставлена на производство Уральским турбинным заводом. Первый энергоблок был

построен и введен в эксплуатацию в 1970 г на ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерг» в рамках третьей очереди.

Теплофикационная турбина Т-250/300-23,5 рассчитана для работы на сверхкритических параметрах пара, одна из немногих теплофикационных турбин с двумя регулируемыми отборами пара работающих с промежуточным перегревом пара. Парораспределение турбины – сопловое. Выполнена одновальной, четырехцилиндровой, а именно из цилиндра высокого давления (ЦВД), цилиндра среднего давления первой ступени (ЦСД-1), цилиндра среднего давления второй ступени (ЦСД-2), цилиндра низкого давления (ЦНД).

Основные характеристики турбины Т-250/300-23,5 представлены в табл. 1.

Таблица 1. **Характеристики турбины Т-250/300-23,5**

Давление свежего пара, МПа	23,5	
Температура свежего пара, °С	540	
Давление промперегрева, МПа	3,68	
Температура промперегрева, °С	540	
Номинальный расход свежего пара, т/ч	955	
Пределы регулирования давления в отборах, МПа	Верхний отопительный	Нижний отопительный
	0,06-0,20	0,05-0,15
Тепловая нагрузка, Гкал/ч	330	

Для замены энергоблока №9 ТЭЦ-22 было принято решение применить новую турбину Т-295/335-23,5.

Поставка турбины выполнена в 2016 г. а ввод в эксплуатацию в июне 2022 г. Новое основное оборудование было установлено в ячейку старого основного оборудования. В новой турбине были увеличены температура острого пара и пара промежуточного перегрева до 565 °С, а также расход пара в голову турбины: 1011 т/ч в номинальном режиме и 985 т/ч в конденсационном режиме. Увеличилось давление пара холодного промперегрева до 4,2 МПа и соответственно горячего промперегрева до 3,8 МПа. [1, 2]

В рамках модернизации произведены следующие конструктивные и технологические решения:

- Улучшенная конструкция клапанов и системы регулирования, что позволяет использовать условно дроссельное парораспределение.
- Удаление регулирующей ступени, что повысило эффективность работы турбины.
- Внедрение системы гидростатического подъема ротора, что повышает надёжность при пусках и остановках.
- Диафрагменные уплотнения, а также концевые уплотнения всех цилиндров выполнены сотового типа. Надбандажные уплотнения внутреннего корпуса ЦВД – осерадиальные, ЦСД-2 радиальные.

- По требованию заказчика была сохранена бездеаэрационная схема, но с заменой ПТН на ПЭН, что позволило значительно увеличить мощность за счет сокращения отбора.

- Предустановлено оборудование для подключения к интеллектуальной системе аналитики и удаленного мониторинга ПРАНА (от РОТЕК)

Основные характеристики турбины Т-295/335-23,5 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики турбины Т-295/335-23,5

Давление свежего пара, МПа	23,5	
Температура свежего пара, °С	565	
Давление промпрегрева, МПа	3,8	
Температура промпрегрева, °С	565	
Номинальный расход свежего пара, т/ч	1011	
Пределы регулирования давления в отборах, МПа	Верхний отопительный	Нижний отопительный
	0.06-0.20	0,05-0,15
Тепловая нагрузка, Гкал/ч	372,5	

По оценке «Системного оператора ЕЭС» (СО ЕЭС) в ближайшие годы прогнозируется рост электропотребления в московском регионе [3]. Для покрытия дефицита энерго мощностей в южной части энергосистемы Москвы рассматривается возможность модернизации 3 энергоблоков на ТЭЦ-23 и ТЭЦ-25 «ПАО Мосэнерго» с установкой в старых ячейках новых турбин Т-259/307-23,5 с улучшенными характеристиками: электрическая мощность увеличивается на 3,6 %; установленная тепловая мощность возрастет с 330 до 345 Гкал/час; Тепловая схема, параметры острого пара и компоновка турбины аналогичны Т-250/300-23,5.

Эта турбина сохраняет основные конструктивные особенности предшественницы, но имеет ряд улучшений:

- Произведен переход на систему автоматического регулирования турбины с заменой блоков регулирующих клапанов (стопорный плюс два регулирующих) с использованием в качестве рабочего тела вместо силовой воды трудновоспламеняемую жидкость типа Волтес с физическими свойствами схожими с турбинным маслом, с последующей установкой маслonaпорной станции высокого давления (МНУ ВД).

- Применение сотовых уплотнений

- Внедрение системы гидростатического подъема ротора, что повышает надёжность при пусках и остановах.

Основные характеристики турбины Т-259/307-23,5 представлены в табл. 3.

Таблица 3. **Характеристики турбины Т-259/307-23,5**

Давление свежего пара, МПа	23,5	
Температура свежего пара, °С	540	
Давление промперегрева, МПа	3,62	
Температура промперегрева, °С	540	
Номинальный расход свежего пара, т/ч	968	
Пределы регулирования давления в отборах, МПа	Верхний отопительный	Нижний отопительный
	0.089	0,044-0,196
Тепловая нагрузка, Гкал/ч	345	

В дальнейшем «Мосэнерго» рассматривает возможность установки по одному энергоблоку на ТЭЦ-25 и ТЭЦ-26 в новых главных корпусах на базе новой модификации турбины Т-275/320-240, которая разрабатывается Уральским турбинным заводом. Параметры свежего пара: давление – 23,5 МПа, температура – 540 °С. В тепловой схеме предполагается использовать электропривода питательных насосов в количестве двух штук, за счет этого выработанная электрическая мощность возрастает до 275 МВт в номинальном теплофикационном режиме и до 320 МВт в максимальном конденсационном режиме.

Литература

1. Буров В.Д., Уланов В.Д., Некрасов О.В., Теплофикационная турбина Т-295/335-23,5 для замены турбин Т-250/300-23,5. Материалы межд. науч.-техн. конф. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т. 11 «Теплотехника», Тридцать первая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2025. 1244 с., С. 969.

2. Буров В.Д., Некрасов О.В., Кожухарь С.Д. Реконструкция паросилового энергоблока с турбиной Т-250/300-240. Материалы межд. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии». Т. 11. «Теплотехника», Иваново, 2023. С. 46-48.

3. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, утвержденная распоряжением правительства РФ от 30.12.2024 года № 4153-Р

УДК 621.438.081

В.Д. БУРОВ, к. т. н., профессор,
М.А. МИХАЙЛИН¹, студент

Московский Энергетический Институт,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., д.14, стр. 1
E-mail: mikhailinma@gmail.com¹

Энергетические ГТУ на базе V94.2

Аннотация. В работе приведены результаты оценки развития энергетических газотурбинных установок (ГТУ) семейства V94.2, разработанные Siemens и их модификации, включая ГТЭ-160, MGT-70 и российские ГТЭ-160, ГТЭ-170.1/170.2.

Ключевые слова. ГТУ V94.2, Siemens, ГТЭ-160, MGT-70, ГТЭ-170.1, ГТЭ-170.2, газотурбинные установки, энергетика, модернизация, КПД, мощность

V.D. BUROV, PhD, Professor
M.A. MIKHAYLIN¹, student

Moscow Power Engineering Institute
111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14, Structure 1
E-mail: mikhailinma@gmail.com¹

Energy Gas Turbine Units based on V94.2

Abstract. This paper presents the results of an assessment of the development of energy gas turbine units (GTU) of the V94.2 family, developed by Siemens, and their modifications, including GTE-160, MGT-70, and the Russian GTE-160, GTE-170.1/170.2.

Key words: GTU V94.2, Siemens, GTE-160, MGT-70, GTE-170.1, GTE-170.2, gas turbine units, energy, modernization, efficiency, power.

Современная энергетика основана на технологиях преобразования различных природных источников энергии. Газотурбинные установки (ГТУ) играют ключевую роль в теплоэнергетике, обеспечивая высокую эффективность, надежность и гибкость эксплуатации. Одним из наиболее значимых семейств газовых турбин являются установки V94.2, разработанные компанией Siemens почти 40 лет назад и широко используемые по всему миру. ГТУ семейства V94.2 предназначалась для эксплуатации в энергосистемах с частотой 50 Гц. Они обеспечивали высокую удельную мощность при приемлемых экономических показателях, что позволило им занять значительную долю на мировом рынке.

Первоначальная версия турбины V94.2 имела номинальную мощность 150 МВт и электрический КПД около 34% [1]. С развитием технологий и совершенствованием конструктивных решений Siemens модернизировала установки, увеличивая их мощность и КПД. В 2001 году компания ОАО «Силовые машины» получила права на производство и реализацию данных турбин под маркой ГТЭ-160.

Газовая турбина SGT5-2000E

Сегодня Siemens на базе V94.2 выпускает ГТУ типа SGT5-2000E. Турбина оснащена 16-ступенчатым компрессором, четырехступенчатой турбиной и гибридными камерами сгорания. Она обладает высокой топливной гибкостью и может работать на различных типах газообразного и жидкого топлива. Её основные характеристики представлены в табл. 1 [2].

Таблица 1. **Технические характеристики SGT5-2000E**

Параметр	SGT5-2000E
Мощность*	198 МВт
Электрический КПД*	37,6%
Массовый расход выхлопных газов	558 кг/с
Температура выхлопных газов	536 °C
Выбросы NOx	≤ 50 мг/м ³
Количество ступеней компрессора	16
Количество ступеней турбины	4
Частота	50 Гц
Масса (с вспомогательным оборудованием)	189 т
Размеры (Длина×Ширина×Высота)	10,3×4,0×4,0 м

*Номинальная мощность в условиях ISO 2314

Газовая турбина MGT-70

Иранской фирмой MAPNA выпускается ГТУ MGT-70, которая является модернизированной версией ГТУ V94.2 [3].

Турбина получила усовершенствованную аэродинамику лопаток турбины и компрессора, более эффективную камеру сгорания с гибридными горелками с низким содержанием NOx и модернизированную систему охлаждения. Основные характеристики ГТУ MGT-70 представлены в табл. 2 [3].

Таблица 2. **Технические характеристики MGT-70**

Параметр	MGT-70(2)	MGT-70(3)
Мощность*	172 МВт	185 МВт
Электрический КПД*	34,6 %	36,3 %
Массовый расход выхлопных газов	535 кг/с	554 кг/с
Температура выхлопных газов	556 °C	544 °C
Выбросы NOx	25 ppmvd 15% O ₂	
Количество ступеней компрессора	16	
Количество ступеней турбины	4	
Частота	50 Гц	
Размеры (Длина×Ширина×Высота)	10,2×3,9×3,7 м	

*Номинальная мощность в условиях ISO 2314

Газовые турбины ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2

С 2018 года компания «Силовые машины» начала работы по разработке ГТУ ГТЭ-170.1 и ГТЭ-170.2 [4].

Турбины базируются на конструкции V94.2, но включают ряд усовершенствований, таких как повышенный КПД, улучшенная конструкция проточной части и модернизированные камеры сгорания.

Первые ГТУ ГТЭ-170.1 поставляются на Каширскую ГРЭС. Основные характеристики ГТЭ-170 представлены в табл. 3 [4].

Таблица 3. Технические характеристики ГТЭ-170

Параметр	ГТЭ–170.1	ГТЭ–170.2
Мощность*	155,3 МВт	170 МВт
Электрический КПД*	34,1%	35,1%
Массовый расход выхлопных газов	509 кг/с	535 кг/с
Температура выхлопных газов	538 °С	539 °С
Выбросы NOx	≤ 50 мг/м ³	
Частота	50 Гц	
Размеры (Длина×Ширина×Высота)	10,2×3,9×3,7 м	10,2×3,9×3,7 м

*Номинальная мощность в условиях ISO 2314

Заключение

В результате сравнения характеристик основных производителей ГТУ на базе V94.2 можно заметить, что ГТУ российского производства не сильно уступают по характеристикам представленным производителям, а именно компании Siemens и MAPNA.

Также есть перспектива развития данных газовых турбин, чтоб характеристики не уступали лидерам на рынке.

Основное преимущество установки газовых турбин российского производства является обеспечения надежности и доступности энергетического оборудования в условиях ограниченных поставок из-за международных ограничений. Эти технологии могут стать важным вкладом в энергетическую инфраструктуру России, обеспечивая эффективное и надежное производство электроэнергии.

Литература

1. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 584 с. ISBN 5-7046-0739-X.
2. Siemens Energy: официальный сайт. URL: <https://www.siemens-energy.com/>
3. MAPNA GROUP TUGA: официальный сайт. URL: <https://www.mapnaturbine.com/>
4. Силовые машины: официальный сайт. URL: <https://www.power-m.ru/>

УДК 621.311.238

ГО ЦЗИНЬФА, аспирант,
В.Д. БУРОВ, к.т.н., профессор,

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14
E-mail: GoT@mpei.ru

Газопоршневые установки из КНР для малой энергетики

Аннотация. Из-за санкций развитие малой энергетики в России было ограничено. В этой ситуации России необходимо развивать сотрудничества с Китайскими компаниями. В работе в основном рассказывается о китайских компаниях, производящих газопоршневые установки, и об их продукции

Ключевые слова: санкция, газопоршневые установки(ГПУ)

GUO JINFA, Postgraduate Student,
V.D. BUROV, PhD, Professor.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "NRU "MEI"
111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14
E-mail: GoT@mpei.ru

Gas-piston units from china for small-scale power generation

Abstract. The development of small-scale power generation in Russia has been constrained due to sanctions. In this situation, Russia needs to strengthen cooperation with Chinese companies. This paper primarily discusses Chinese companies manufacturing gas-piston units (GPUs) and their products.

Key words: sanctions, gas-piston units (GPUs)

Санкции привели к тому, что официальные поставки газопоршневых установок (ГПУ) из США и Европы в Россию практически полностью прекратились. Большинство из западных производителей (Caterpillar, MAN, MWM, Wartsila, Siemens и MTU) ушли с отечественного рынка. Поэтому 2022-2024 годы стали чрезвычайно сложными для малой энергетики в России.

В Российской Федерации не выпускаются в достаточном объеме надежные и экономические газовые двигатели в мощностном диапазоне от 400 кВт до 4000 кВт. 99 % всех двигателей в этом сегменте до недавнего времени импортировалось из-за рубежа. В создавшейся ситуации очевидным решением является развитие сотрудничества с азиатскими производителями, в первую очередь, с компаниями из Китая. При этом важно обеспечить не только поставку оборудования, но и его качественное обслуживание, со своевременной поставкой запасных частей.

Основными китайскими производителями газопоршневых двигателей для российского рынка являются компании «Jichai», «Weichai», «Yuchai», «HND», «HQP» и «Liyu» [1].

«Jichai» входит в состав Китайской национальной нефтяной корпорации. Основным направлением деятельности компании «Jichai» являются исследования, разработки и производство двигателей внутреннего сгорания, а также компрессоров и сопутствующего энергетического оборудования. При совместном сотрудничестве «Jichai» с Австрийским университетом и научно-исследовательским институтом AVL List GmbH, специализирующимся на двигателях большой мощности, было создано 9 разновидностей силового агрегата. В настоящее время линейка газопоршневых двигателей «Jichai» насчитывает несколько моделей мощностью от 300 кВт до 4000 кВт. Все модели мощностью от 400 кВт до 4000 кВт оснащены среднеоборотными двигателями с частотой вращения 1000 об/мин. Это значительно увеличивает их массу в 1,5-3 раза по сравнению с машинами аналогичной мощности на 1500 об/мин, в результате существенно снижается механический износ, возрастает надежность и срок службы двигателя. Важнее то, что «Jichai» может

самостоятельно производить и экспортировать оборудование в Россию, не подвергаясь санкциям со стороны европейских стран. Совместно с АО «Интертехэлектро» фирма «Jichai» ведут работы по организации совместного производства в г. Кургане[2,3].

«Weichai» – китайская государственная холдинговая группа. «Weichai» было основано совместное предприятие с российской компанией ПАО «КАМАЗ», занимающееся производством дизельных и газовых двигателей Baudouin (разработка модели – Франция). В сентябре 2020 года компания «КамАЗ-Weichai» запустила серийное производство дизельных и газовых двигателей. Номинальная единичная электрическая мощность предполагаемых к выпуску газопоршневых двигателей составляет от 380 до 1120 кВт (модель 6M33NG, 12M33NG, 16M33NG механической мощностью 380, 587, 765, 1280 кВт).

«Yuchai» занимается научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, производством, реализацией и обслуживанием дизельных и газопоршневых двигателей для электростанций серии G-Drive. Газопоршневые установки «Yuchai» оснащены надежной системой газ-контроля и обладают широким диапазоном применения, высокой надежностью, высокой эффективностью, экологичностью, низкими эксплуатационными расходами, при этом удовлетворяя потребности различных пользователей. «Yuchai» и разработчик и изготовитель энергетического оборудования «Альфа Балт инжиниринг» создадут СП по выпуску дизельных и газовых генераторов в Санкт-Петербурге. Объем инвестиций в проект составит около 5 млрд рублей.

«HND» обладает ведущими в мире технологиями производства средне-, высокоскоростных и мощных двигателей внутреннего сгорания (дизельных двигателей, газовых двигателей). В структуру продукции «HND» входят высокооборотные дизельные двигатели, среднеоборотные дизельные двигатели, газовые двигатели и полные комплекты оборудования. Газогенераторные установки охватывают диапазон от 50 кВт до 2000 кВт. Продукция получила сертификаты, одобренные многими обществами морского машиностроения, такими как CCS, ABS, BV, DNV, LR, RS и т. д., и экспортируется на зарубежные рынки.

«HQP» специализируется на исследованиях, разработке и производстве газопоршневых двигателей. Двигатели «HQP» соответствуют мировым стандартам качества, адаптивны и способны удовлетворить спрос на газопоршневое оборудование для предприятий российского рынка. Система управления ГПУ разработана совместно с Shanghai Aerospace General Aviation. Мощность газового двигателя составляет 1500–3500 кВт и может применяться на рынках производства электроэнергии, сжатия и механического привода. Продукция широко используется в природном газе, попутном нефтяном газе, шахтном газе, свалочном газе, промышленных выхлопных газах и различных газах с низкой взрывоопасностью.

ГПУ серии «Liyu» LY170 (900–2000кВт) обеспечивают эффективную и надежную электроэнергию для районов с повышенным спросом,

обеспечивая экономию средств и поддерживая чистую энергию для устойчивого будущего.

Вывод. В качестве альтернативного поставщика современного газопоршневого оборудования для российской малой энергетики может стать эти китайские компании, изготавливающие газопоршневые двигатели, имеющие высокий технологический уровень.

Литература

1. Каталог энергетического оборудования «Турбины и дизели» - 2024.
2. Сигидов Я.Ю., Кузнецов Д.А. На Курганском заводе комплексных технологий началась сборка ГПУ производства CNPC Jichai// Турбины и Дизели. 2024, №4. С.86-88..
3. Сигидов Я.Ю., Кузнецов Д.А., Сяоли Мэн. Совместное производство компаний «Интертехэлектро» и CNPC Jichai// Турбины и Дизели. 2025, №1. С.84-87.

УДК 681.586.67:621.311.25:621.311.22

А.В. ГУСАРОВ, к.т.н., ведущий инженер

АО «Атомэнергопроект»,
105005, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1
E-mail: avsvgt6063@mail.ru

Учет корреляционных связей между инструментальными погрешностями компонентов при оценке дисперсии инструментальной погрешности измерительного канала

Аннотация. Рассмотрена возможность учета корреляционных связей между инструментальными погрешностями компонентов измерительного канала при оценке дисперсии инструментальной погрешности канала для случая использования в качестве моделей компонентов безынерционных линейных и/или безынерционных нелинейных звеньев с линеаризованными статическими характеристиками преобразования.

Ключевые слова: измерительный канал, измерительный компонент, инструментальная погрешность, корреляционный момент, безынерционное звено, линейная (нелинейная) модель, оценка дисперсии.

A.V. GUSAROV, Candidate of Engineering, Principal Engineer

JSC « Atomenergoproekt»,
105005, Moscow, Bakuninskaya St., 7, build. 1
E-mail: avsvgt6063@mail.ru

Taking into account the correlation between the component instrumental errors for the variance estimation of the measuring channel instrumental error

Abstract. The possibility of taking into account the correlation between the component instrumental errors for the variance estimation of the measuring channel instru-

mental error for the case of using linear and/or non-linear inertia-free links with linearized static conversion characteristics as models of components is considered.

Key words: measuring channel, measuring component, instrumental error, correlation moment, inertia-free linear (non-linear) link, component linear model, variance estimation

Оценка дисперсии инструментальной погрешности измерительного канала (ИК) сопряжена с оценкой дисперсий инструментальных погрешностей компонентов канала и корреляционных моментов между погрешностями. Вопрос об учете в расчетах корреляционных связей между инструментальными погрешностями компонентов ИК чаще всего не «афишируется», просто предлагаются без всяких объяснений готовые формулы, либо данный вопрос решается на основе следующих, предварительно сделанных, предположениях (допущениях):

- погрешности компонентов ИК попарно «жестко» коррелированы с коэффициентами корреляции, равными по модулю 1;
- погрешности компонентов ИК попарно статистически независимы при равных 0 коэффициентах корреляции.

Покажем, что инструментальные погрешности компонентов ИК в рабочих условиях эксплуатации коррелированы.

Пусть имеется ИК (рис. 1), состоящий из N измерительных компонентов. Каждый n -ый компонент - безынерционное линейное или безынерционное нелинейное звено с оператором преобразования в виде реальной статической характеристики преобразования (РСХП)

$$x_n = f_n(x_{n-1}), \quad (1)$$

где x_n , x_{n-1} – соответственно значение и аргумент РСХП.

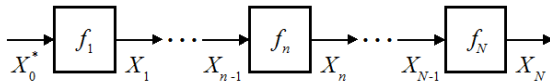


Рис. 1. Структурная схема ИК

На вход n -го компонента поступает величина X_{n-1} , преобразуемая компонентом в выходную величину X_n . Входной для первого компонента является X_0^* – истинное (действительное, текущее) значение измеряемой величины. Выходной для N -го компонента является величина X_N – результат измерения X_0^* при однократном наблюдении (или результат преобразования X_0^* в некоторую промежуточную величину

X_N). Требуется выяснить, являются ли инструментальные погрешности $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n, \dots, \Delta_N$ компонентов ИК коррелированными?

Движение n -го измерительного компонента ИК на рис. 1 описывается уравнением

$$X_n = f_n(X_{n-1}). \quad (2)$$

Положим, что для каждого n -го компонента известна номинальная статическая характеристика преобразования (НСХП)

$$x_n^* = f_n^*(x_{n-1}^*), \quad (3)$$

где x_n^*, x_{n-1}^* – соответственно значение и аргумент НСХП.

Запишем уравнение (2) для n -го “идеального” измерительного компонента – компонента, работающего без погрешностей:

$$X_n^* = f_n^*(X_{n-1}^*), \quad (4)$$

где X_{n-1}^*, X_n^* – соответственно входная и выходная величины n -го “идеального” компонента.

Дальнейшие выкладки проведем с использованием подхода [1], позволяющего ввести в правую часть (2) инструментальную погрешность компонента ИК (а в общем случае – любую составляющую). Для этого прибавим в (2) и вычтем из (2) слагаемое $f_n^*(X_{n-1}^*)$. Получим:

$$X_n = f_n^*(X_{n-1}^*) + \nabla_{\Sigma n} = X_n^* + \nabla_{\Sigma n}, \quad (5)$$

где

$$\nabla_{\Sigma n} = f_n(X_{n-1}) - f_n^*(X_{n-1}^*) \quad (6)$$

– инструментальная погрешность на выходе n -го компонента ИК в рабочих условиях эксплуатации.

Прибавим к правой части (6) и вычтем из нее $f_n^*(X_{n-1}^*)$. Получим:

$$\nabla_{\Sigma n} = \Delta_n + \nabla_n, \quad (7)$$

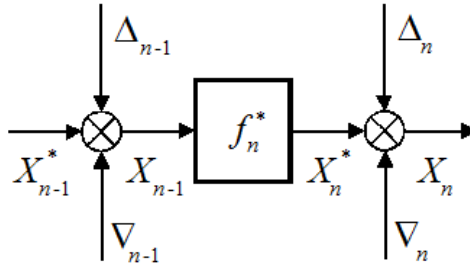
где

$$\Delta_n = f_n(X_{n-1}) - f_n^*(X_{n-1}^*) \quad (8)$$

– собственно инструментальная погрешность n -го компонента (рис. 2);

$$\nabla_n = f_n^*(X_{n-1}) - f_n^*(X_{n-1}^*) = f_n^*(X_{n-1}^* + \nabla_{\Sigma n-1}) - f_n^*(X_{n-1}^*) \quad (9)$$

– составляющая $\nabla_{\Sigma n}$, определяемая отличием X_{n-1} от X_{n-1}^* .

Рис. 2. Эквивалентная схема n -го измерительного компонента

Из (7) – (9) следует:

- погрешности Δ_n на входе в n -ый компонент не существует, т. к. она появляется на его выходе после прохождения X_{n-1} через n -ый компонент;
- в рабочих условиях эксплуатации ИК Δ_n определяется не только свойствами n -го компонента, но и свойствами X_{n-1} ;
- на входе любого n -го компонента (кроме 1-го) всегда присутствуют инструментальная погрешность Δ_{n-1} предыдущего компонента и составляющая ∇_{n-1} , определяемая преобразованными к выходу $(n-1)$ -го компонента инструментальными погрешностями $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{n-2}$;
- при поэлементной поверке (калибровке) ИК на вход n -го компонента (кроме 1-го) следует подавать не опорные значения X_{n-1} , равные заранее выбранным значениям диапазона измерений канала (как для 1-го компонента), а значения X_{n-1} , полученные при поверке (калибровке) предыдущего $(n-1)$ -го компонента.

Выполним линеаризацию (1), (3) и запишем (2), (4) для X_n, X_n^* , изменяющихся во времени случайным образом:

$$X_n = f_n(X_{n-1}) = f_n(m_{n-1} + \overset{\circ}{X}_{n-1}) = m_n + \overset{\circ}{X}_n \approx f_n(m_{n-1}) + k_n \overset{\circ}{X}_{n-1}; \quad (10)$$

$$X_n^* = f_n^*(X_{n-1}^*) = f_n^*(m_{n-1}^* + \overset{\circ}{X}_{n-1}^*) = m_n^* + \overset{\circ}{X}_n^* \approx f_n^*(m_{n-1}^*) + k_n^* \overset{\circ}{X}_{n-1}^*, \quad (11)$$

где $m_{n-1}, m_{n-1}^*, m_n, m_n^*$ – математические ожидания (МО) переменных $X_{n-1}, X_{n-1}^*, X_n, X_n^*$; символ “ $\circ$ ” над X – обозначение центрированной случайной величины (сечения случайного процесса);

$$k_n = df_n(x_{n-1})/dx_{n-1} \text{ при } x_{n-1} = m_{n-1}; \quad (12)$$

$$k_n^* = df_n^*(x_{n-1}^*)/dx_{n-1}^* \text{ при } x_{n-1}^* = m_{n-1}^* . \quad (13)$$

Подставим (10) – (11) в (2), (4) – (9). Опуская промежуточные выкладки, запишем формулу для инструментальной погрешности ИК:

$$\nabla_{\Sigma N} = \nabla_N + \Delta_N = \sum_{n=1}^N \nabla_n^N , \quad (14)$$

где

$$\nabla_N = \sum_{n=1}^{N-1} \nabla_n^N ; \quad (15)$$

$$\Delta_N = \nabla_N^N ; \quad (16)$$

∇_n^N – погрешность Δ_n , преобразованная последующими компонентами с номерами $n+1, n+2, \dots, N$ к выходу ИК, причем $\nabla_N^N = \Delta_N$, т. к. N -ый компонент является последним, и Δ_N после него не преобразуется.

С учетом деления погрешностей на систематические (далее это переменные Δ и ∇ с индексом “s”) и случайные центрированные (переменные Δ и ∇ с символом “o” сверху) можем записать, что

$$\nabla_{\Sigma N} = [\nabla_{\Sigma N}]_s + \overset{o}{\nabla}_{\Sigma N} , \quad (17)$$

где

$$[\nabla_{\Sigma N}]_s = [\nabla_N]_s + [\Delta_N]_s ; \quad (18)$$

$$[\nabla_N]_s = f_N^*(m_{N-1}^* + [\Delta_{N-1}]_s + [\nabla_{N-1}]_s) - f_N^*(m_{N-1}^*) ; \quad (19)$$

$$[\Delta_N]_s = f_N(m_{N-1}) - f_N^*(m_{N-1}^*) ; \quad (20)$$

$$\overset{o}{\nabla}_{\Sigma N} = \sum_{n=1}^N \overset{o}{\nabla}_n^N = \sum_{n=1}^{N-1} (\Delta_n \prod_{j=n+1}^N k_j^*) + \overset{o}{\Delta}_N ; \quad (21)$$

$$\overset{o}{\Delta}_n = \overset{o}{X}_{n-1} (k_n - k_n^*) = \begin{cases} \overset{o}{X}_0 (k_1 - k_1^*), n = 1; \\ (\overset{o}{X}_0 \prod_{j=1}^{n-1} k_j^*) (k_n - k_n^*), 1 < n < N; \\ (\overset{o}{X}_0 \prod_{j=1}^{N-1} k_j^*) (k_N - k_N^*), n = N, \end{cases} \quad (22)$$

а также

$$[\Delta_n]_S = f_n(m_{n-1}) - f_n^*(m_{n-1}) . \quad (23)$$

Для случая, когда все компоненты ИК – линейные безынерционные звенья со статическими характеристиками преобразования

$$f_n(x_{n-1}) = a_n + k_n x_{n-1} ; \quad (24)$$

$$f_n^*(x_{n-1}^*) = a_n^* + k_n^* x_{n-1}^* , \quad (25)$$

выражения для $[\nabla_{\Sigma N}]_S$ и $[\Delta_n]_S$ примут вид:

$$[\nabla_{\Sigma N}]_S = \sum_{n=1}^N [\nabla_n^N]_S = \sum_{n=1}^{N-1} ([\Delta_n]_S \prod_{j=n+1}^N k_j^*) + [\Delta_N]_S ; \quad (26)$$

$$[\Delta_n]_S = f_n(m_{n-1}) - f_n^*(m_{n-1}) = a_n - a_n^* + m_{n-1}(k_n - k_n^*) , \quad (27)$$

причем $m_0 = m_0^*$.

Формулы (14) – (23), (26), (27) показывают, как для безынерционных звеньев с линеаризованными и/или линейными РСХП и НСХП погрешность ИК $\nabla_{\Sigma N}$ связана с погрешностями компонентов ИК. Формулы (21), (22) позволяют наглядно объяснить наличие корреляционных связей между погрешностями Δ_n компонентов ИК, общей причиной возникновения которых в рабочих условиях эксплуатации ИК является X_0^* – случайный процесс на входе в ИК.

Введем в (21), (22) переменную t – время, заменив $\nabla_{\Sigma N}$, ∇_n^N , Δ_n , X_0^* соответственно на $\nabla_{\Sigma N}(t)$, $\nabla_n^N(t)$, $\Delta_n(t)$, $X_0^*(t)$. Для n -го и l -го компонентов ИК ($1 \leq n \leq N, 1 \leq l \leq N$) представим $\nabla_n^N(t)$ и $\nabla_l^N(t)$ в виде

$$\nabla_n^N(t) = X_0^*(t) k_{\nabla n} ; \quad (28)$$

$$\nabla_l^N(t) = X_0^*(t) k_{\nabla l} , \quad (29)$$

где

$$k_{\nabla n} = \begin{cases} (k_1 - k_1^*) \prod_{i=2}^N k_i^* , n = 1; \\ \prod_{j=1}^{n-1} k_j (k_n - k_n^*) \prod_{i=n+1}^N k_i^* , 1 < n < N; \\ \prod_{j=1}^{N-1} k_j (k_N - k_N^*) , n = N. \end{cases} \quad (30)$$

Формула для $k_{\nabla l}$ получается из (30) заменой n на l .

Погрешности $\Delta_n^N(t)$ и $\Delta_l^N(t)$, $\nabla_n^N(t)$ и $\nabla_l^N(t)$ существуют и статистически взаимодействуют, в т. ч. и в один и тот же (текущий) момент времени t . Полагая $X_0^*(t)$ нестационарным по МО и дисперсии случайным процессом, найдем дисперсии $\sigma^2[\nabla_n^N]$, $\sigma^2[\nabla_l^N]$ и корреляционный момент R_{nl} погрешностей $\nabla_n^N(t)$ и $\nabla_l^N(t)$ в момент времени t , дисперсию $\sigma^2[\nabla_{\Sigma N}]$ погрешности $\nabla_{\Sigma N}(t)$:

$$\sigma^2[\nabla_n^N] = M \left[[\overset{0}{\nabla}_n^N(t)]^2 \right] = \sigma^2[X_0^*] k_{\nabla n}^2; \quad (31)$$

$$\sigma^2[\nabla_l^N] = M \left[[\overset{0}{\nabla}_l^N(t)]^2 \right] = \sigma^2[X_0^*] k_{\nabla l}^2; \quad (32)$$

$$R_{nl} = M[\overset{0}{\nabla}_n^N(t) \overset{0}{\nabla}_l^N(t)] = \sigma^2[X_0^*] r_{X_0^*}(t, t) k_{\nabla n} k_{\nabla l}; \quad (33)$$

$$\sigma^2[\nabla_{\Sigma N}] = \sum_{n=1}^N k_{\nabla n}^2 \sigma^2[X_0^*] + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N R_{nm} \quad (34)$$

или

$$\sigma^2[\nabla_{\Sigma N}] = \sum_{n=1}^N k_{\nabla n}^2 \sigma^2[X_0^*] + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N \sigma^2[X_0^*] k_{\nabla n} k_{\nabla m}, \quad (35)$$

где $M[\dots]$, $\sigma[\dots]$ – соответственно МО и среднее квадратическое отклонение случайной величины (сечения случайного процесса в момент времени t);

$r_{X_0^*}(t, t)$ – нормированная корреляционная функция $r_{X_0^*}(t_1, t_2)$ процесса $X_0^*(t)$ при $t_1 = t_2 = t$, причем $r_{X_0^*}(t, t) = r_{X_0^*}(t_1, t_1) = r_{X_0^*}(t_2, t_2) = 1$ [2];

$\sigma^2[X_0^*] r_{X_0^*}(t, t)$ – корреляционная функция $R_{X_0^*}(t_1, t_2)$ процесса $X_0^*(t)$ при $t_1 = t_2 = t$.

Формулы (31) – (35) справедливы и для стационарных по дисперсии процессов $X_0^*(t)$, когда $r_{X_0^*}(t_1, t_2) = r_{X_0^*}(\tau)$, где $\tau = t_2 - t_1$; $r_{X_0^*}(\tau) = 1$ при $\tau = 0$.

Из (28), (29), (31) – (33) и (30), (33) следует, что все $R_{nl} = 0$ только в двух гипотетических для рабочих условий эксплуатации ИК случаях:

1. Измеряемая величина $X_0^*(t)$ – неслучайная функция t (все $r_{nl} = 0$).

2. $X_0^*(t)$ – случайная функция t , а свойства каждого измерительно-го компонента полностью совпадают со свойствами его идеализированного представления в виде совокупности нормированных метроло-

гических характеристик (т. е. при совпадении $f_n(x_{n-1})$ и $f_n^*(x_{n-1}^*)$), а для линейных компонентов - когда $k_n = k_n^*$, $k_n - k_n^* = 0$).

Момент R_{nl} можно определить как элемент корреляционной матрицы $\|R_{nl}\|$ системы случайных величин $\nabla_1^N(t)$, $\nabla_2^N(t)$, ..., $\nabla_n^N(t)$, ..., $\nabla_N^N(t)$. Тогда в (34), (35) слагаемое $2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N R_{nl} = 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N \sigma^2[X_0^*] k_{\nabla n} k_{\nabla l} -$ сумма элементов $\|R_{nl}\|$, не принадлежащих ее главной диагонали.

Поскольку $\sigma^2[X_0^*]$ и $r_{x_0^*}(t, t)$ положительны, то знак R_{nl} определяется знаками коэффициентов $k_{\nabla n}$, $k_{\nabla l}$, т. е.

$$\text{sgn}(R_{nl}) = \text{sgn}(k_{\nabla n} k_{\nabla l}) . \quad (36)$$

Знаки $k_{\nabla n}$, $k_{\nabla l}$ (см. (30)), зависят от знаков k_n , k_n^* , k_l , k_l^* и разностей $(k_n - k_n^*)$, $(k_l - k_l^*)$. Знаки $(k_n - k_n^*)$ и $(k_l - k_l^*)$, в свою очередь, определяются взаимным расположением $f_n(x_{n-1})$ и $f_n^*(x_{n-1}^*)$, причем $f_n(x_{n-1})$ или отдельный ее участок всегда будут находиться над или под $f_n^*(x_{n-1}^*)$. С течением времени расположение $f_n(x_{n-1})$ и $f_n^*(x_{n-1}^*)$ друг относительно друга может меняться. Вследствие этого знаки $(k_n - k_n^*)$, $(k_l - k_l^*)$ и, следовательно, знаки $k_{\nabla n}$, $k_{\nabla l}$, R_{nl} также могут меняться. С учетом сказанного запишем (35) в виде

$$\sigma^2[\nabla_{\Sigma N}] = \sum_{n=1}^N k_{\nabla n}^2 \sigma^2[X_0^*] + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N \text{sgn}(R_{nl}) \sigma^2[X_0^*] |k_{\nabla n} k_{\nabla l}| . \quad (37)$$

Формулы (1) – (37) демонстрируют упрощенное представление “механизма формирования” инструментальной погрешности ИК со структурной схемой на рис. 1. Пользоваться формулой (37) “неудобно”, т. к. в ней фигурируют m_0^* , $\sigma[X_0^*]$, $f_n(x_{n-1})$, k_n , которые в реальных условиях эксплуатации ИК в силу объективных причин не известны. Кроме того, не представляется возможным в реальных условиях определять значения $\text{sgn}(k_{\nabla n} k_{\nabla l})$ и контролировать смену этих значений вследствие изменения действительных метрологических характеристик компонентов ИК. Поэтому от (34) – (37) целесообразно перейти к следующим формулам:

$$\sigma^2[\nabla_{\Sigma N}] = \sum_{n=1}^N \sigma^2[\nabla_n^N] + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N R_{nl} ; \quad (38)$$

$$\sigma^2[\nabla_{\Sigma N}] = \sum_{n=1}^N \sigma^2[\nabla_n^N] + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N \text{sgn}(R_{nl}) \sigma[\nabla_n^N] \sigma[\nabla_l^N] , \quad (39)$$

где (с учетом (21), (22), (30))

$$\sigma[\nabla_n^N] = \begin{cases} \sigma[\Delta_n] \prod_{j=n+1}^N |k_j^*|, 1 \leq n \leq N-1; \\ \sigma[\Delta_N], n = N. \end{cases} \quad (40)$$

Формула для $\sigma[\nabla_l^N]$ получается из (40) заменой n на l .

В частном случае, когда все $f_n(x_{n-1})$ и $f_n^*(x_{n-1}^*)$ – возрастающие и строго монотонные в областях своего определения (соответственно все k_n и k_n^* положительны, а разности $(k_n - k_n^*)$, $(k_l - k_l^*)$ могут быть как положительными, так и отрицательными), функция

$$\text{sgn}(R_{nl}) = \text{sgn}[(k_n - k_n^*)(k_l - k_l^*)] \quad (41)$$

Формулы (39), (40) можно “адаптировать” к оценке дисперсии погрешности ИК по известным метрологическим характеристикам измерительных компонентов канала (например, по пределам допускаемых погрешностей компонентов). “Адаптацию” следует выполнять, руководствуясь принципом «оценки погрешности сверху» [3, 4].

Выводы.

1. В рабочих условиях эксплуатации инструментальная погрешность ИК определяется не только свойствами измерительных компонентов канала, но и свойствами измеряемой величины – случайного процесса на входе в ИК.

2. В формировании инструментальной погрешности канала “участвуют” как реальные, так и соответствующие номинальные метрологические характеристики измерительных компонентов канала.

3. Инструментальные погрешности измерительных компонентов канала в рабочих условиях эксплуатации попарно коррелированы. Общая причина корреляции погрешностей – случайный процесс на входе в канал (измеряемая величина). При случайном характере изменения во времени измеряемой величины погрешности компонентов некоррелированными быть не могут. Данное обстоятельство будет обуславливать отличие формул оценки дисперсии (границы) инструментальной погрешности ИК по метрологическим характеристикам компонентов ИК для условий поверки (калибровки) ИК (компонентов ИК) и рабочих условий эксплуатации ИК.

4. При использовании в качестве моделей измерительных компонентов канала безынерционных линейных звеньев и/или безынерционных нелинейных звеньев с линеаризованными РСХП и НСХП инструментальные погрешности компонентов ИК в один и тот же момент времени следует считать “жестко” коррелированными с коэффициентами корреляции, равными 1. Знак корреляционного момента между инструментальными погрешностями любых двух компонентов ИК при этом определяется знаками коэффициентов передачи компонентов, а также

расположением РСХП и НСХП каждого компонента относительно друг друга.

Литература

1. Цветков Э.И. Процессорные измерительные средства. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. 224 с.
2. Гмурман Е.Ф. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. 9-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.
3. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 282 с.
4. Гусаров А.В. К оценке границы инструментальной погрешности по пределам допускаемых значений составляющих// Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и тепло-технологии» (XIX Бенардосовские чтения). ФГБОУВО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2021. Т. 2. С. 206-212.

УДК 681.586.67:621.311.25:621.311.22

А.В. ГУСАРОВ, к.т.н., ведущий инженер

АО «Атомэнергoproject»,
105005, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1
E-mail: avsvgt6063@mail.ru

Выбор формул оценки инструментальной погрешности измерительного канала по пределам допускаемых погрешностей компонентов

Аннотация. Изложен подход к выбору формул оценки границ инструментальной погрешности измерительного канала по пределам допускаемых погрешностей компонентов для случая использования в качестве моделей компонентов безынерционных линейных и/или безынерционных нелинейных звеньев с линеаризованными статическими характеристиками преобразования.

Ключевые слова: измерительный канал, измерительный компонент, инструментальная погрешность, пределы допускаемой погрешности, безынерционное звено, линейная (нелинейная) модель, статическая характеристика преобразования, оценка границы погрешности.

A.V. GUSAROV, Candidate of Engineering, Principal Engineer
JSC « Atomenergoproect»,
105005, Moscow, Bakuninskaya St., 7, build. 1
E-mail: avsvgt6063@mail.ru

The choice of formulas for estimating the measuring channel instrumental error when using the maximum permissible errors of the channel components

Abstract. An approach is presented to the choice of formulas for estimating the instrumental error limits of the measuring channel according to the limits of permissible

errors of components for the case of using inertia-free linear and/or inertia-free nonlinear links with linearized static conversion characteristics as the component models.

Key words: measuring channel, measuring component, instrumental error, maximum permissible errors, inertia-free link, linear (non-linear) model, static characteristic of conversion, error estimation

Оценка границ инструментальных погрешностей измерительных каналов (ИК) по метрологическим характеристикам измерительных компонентов – одна из задач, наиболее часто решаемая в метрологической практике при проектировании, строительстве и вводе в эксплуатацию, при эксплуатации ТЭС и АЭС. Основные направления использования результатов оценки следующие:

- выбор конкретных измерительных компонентов ИК на стадии разработки измерительных систем вида «ИС-2» (классификация систем по ГОСТ Р 8.596-2002);
- проверка соответствия погрешностей ИК установленным нормам точности измерений;
- поэлементная поверка (калибровка) ИК;
- оценка точности определения результатов косвенных измерений;
- оценка точности определения технико-экономических показателей (ТЭП) энергетических блоков ТЭС и АЭС, станционных ТЭП.

Пусть имеется ИК со структурной схемой на рис. 1.

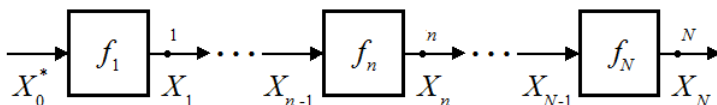


Рис. 1. ИК из N измерительных компонентов:

X_{n-1} , X_n – случайные процессы на входе и выходе n -го компонента ИК

с реальной (РСХП) $x_n = f_n(x_{n-1})$ и номинальной (НСХП) $x_n^* = f_n^*(x_{n-1}^*)$

статистическими характеристиками преобразования; x_{n-1} , x_{n-1}^* – аргументы

РСХП и НСХП; X_N – результат измерения текущего значения

X_0^*

Нижняя $\nabla_{\Sigma N}^H$ и верхняя $\nabla_{\Sigma N}^B$ границы доверительного интервала симметрично распределенной инструментальной погрешности $\nabla_{\Sigma N}$ измерения текущего значения технологического параметра X_0^* в момент времени t могут быть представлены как [1], [2]

$$\nabla_{\Sigma N}^H = [\nabla_{\Sigma N}]_s - k_{\Sigma N} \cdot \sigma[\nabla_{\Sigma N}] ; \nabla_{\Sigma N}^B = [\nabla_{\Sigma N}]_s + k_{\Sigma N} \cdot \sigma[\nabla_{\Sigma N}] , \quad (1)$$

где $[\nabla_{\Sigma N}]_s$ – систематическая составляющая $\nabla_{\Sigma N}$ (формулы оценки см. [2]);

$k_{\Sigma N}$ – квантильный множитель распределения $\nabla_{\Sigma N}$ при заданной доверительной вероятности;

$$\sigma[\nabla_{\Sigma N}] = \left(\sum_{n=1}^N \sigma^2[\nabla_n^N] + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N R_{nl} \right)^{0.5} \quad (2)$$

– оценка среднего квадратического отклонения (СКО) $\nabla_{\Sigma N}$ [2];

∇_n^N – инструментальная погрешность Δ_n n -го компонента, преобразованная компонентами с номерами $n+1$, $n+2$, ..., N к выходу ИК. Точки 1, ..., n , ..., N на рис. 1 – точки приложения Δ_1 , ..., Δ_n , ..., Δ_N ;

$$\sigma[\nabla_n^N] = \begin{cases} \sigma[\Delta_n] \prod_{j=n+1}^N |k_j^*|, & 1 \leq n \leq N-1; \\ \sigma[\Delta_N], & n = N; \end{cases} \quad (3)$$

$\sigma[\Delta_n]$ – СКО Δ_n ;

$$k_j^* = df_j^*(x_{j-1}^*)/dx_{j-1}^* \text{ при } x_{j-1}^* = m_{j-1}^*; \quad (4)$$

$m_{j-1}^* = M[X_{j-1}^*]$ – математическое ожидание (МО) процесса X_{j-1}^* на выходе $(j-1)$ -го компонента идеализированного ИК (канала, работающего без погрешностей и составленного из компонентов с НСХП), причем $m_0^* = M[X_0^*]$;

$R_{nl} = \sigma[\nabla_n^N] \sigma[\nabla_l^N] r_{nl}$ – корреляционный момент погрешностей $\nabla_n^N(t)$ и $\nabla_l^N(t)$ компонентов ИК с номерами n и l в момент времени t , r_{nl} – нормированный корреляционный момент $\nabla_n^N(t)$ и $\nabla_l^N(t)$;

$2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N R_{nl}$ – сумма R_{nl} , не принадлежащих главной диагонали корреляционной матрицы $\|R_{nl}\|$ системы случайных величин $\nabla_1^N(t)$, $\nabla_2^N(t)$, ..., $\nabla_n^N(t)$, ..., $\nabla_N^N(t)$.

Поскольку все $\sigma^2[\nabla_n^N]$ в (2) положительны, то при известных $\sigma[\nabla_n^N]$ значение $\sigma[\nabla_{\Sigma N}]$ будет определяться значением слагаемого

$$2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N R_{nl} = R_i^+ + R_i^-, \quad (5)$$

где R_i^+ и R_i^- – обозначения сумм всех положительных и всех отрицательных R_{nl} . Возможные варианты формулы (2) и условия, при которых варианты имеют место, приведены в табл. 1, где i – номер варианта.

Таблица 1. Варианты формулы (2)

i	$\sigma_i [\nabla_{\Sigma N}]$	№ п/п	Примечание
1	$(\sum_{n=1}^N \sigma^2 [\nabla_n^N] + R_1^+)^{0,5}$ или $\sum_{n=1}^N \sigma [\nabla_n^N]$	(6)	Все $R_{n1} > 0$, $r_{n1} = 1$. $R_1^- = 0$.
2	$(\sum_{n=1}^N \sigma^2 [\nabla_n^N] + R_2^+ - R_2^-)^{0,5}$	(7)	Есть $R_{n1} > 0$ и $R_{n1} < 0$, $0 < r_{n1} \leq 1$. $R_2^+ - R_2^- > 0$.
3	$(\sum_{n=1}^N \sigma^2 [\nabla_n^N])^{0,5}$	(8)	Все $r_{n1} = 0$, либо $R_3^+ - R_3^- = 0$.
4	$(\sum_{n=1}^N \sigma^2 [\nabla_n^N] + R_4^+ - R_4^-)^{0,5}$	(9)	Есть $R_{n1} > 0$ и $R_{n1} < 0$, $0 < r_{n1} \leq 1$. $R_4^+ - R_4^- < 0$.
5	$(\sum_{n=1}^N \sigma^2 [\nabla_n^N] - R_5^-)^{0,5}$	(10)	Все $R_{n1} < 0$, $ r_{n1} = 1$. $R_5^+ = 0$, $R_5^- = -R_1^+$.

Формулы в табл. 1 записаны в порядке уменьшения $\sigma_i [\nabla_{\Sigma N}]$ (уменьшения суммы $R_i^+ + R_i^-$) при известных $\sigma [\nabla_n^N]$, т. е.

$$\sigma_i [\nabla_{\Sigma N}] > \sigma_{i+1} [\nabla_{\Sigma N}], i = 1, 2, \dots, 4. \quad (11)$$

Формулы (1) – (10) теоретические. Применение их на практике, например, для рабочих условий эксплуатации ИК ИС-2 не представляется возможным, т. к. в этих условиях невозможно получать экспериментальные данные, необходимые для определения вида распределения $\nabla_{\Sigma N}$, распределений ∇_n^N , значений $k_{\Sigma N}$, $f_n(x_{n-1})$, m_{j-1}^* , $\sigma[\Delta_n]$, $\sigma[\nabla_n^N]$, R_{n1} , участвующих в записи (1) – (10). Вместо них приходится использовать предлагаемые изготовителями измерительных компонентов ИК нормируемые по ГОСТ 8.401-80 НСХП и пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей (без деления погрешностей компонентов на систематические и случайные).

Условия определения и нормирования характеристик погрешностей по ГОСТ 8.401-80 существенно отличаются от рабочих. Главное отличие – случайный характер изменения во времени X_0^* (а также и X_n).

Для “адаптации” (1) – (10) к рабочим условиям, для выбора и обоснования применения соответствующих формул расчета, воспользуемся, как в [3], принципом «оценки погрешности сверху» (ОПС) и неравенствами (11). Примем также во внимание [2], что в рабочих условиях

эксплуатации ИК для текущего момента времени t все нормированные корреляционные моменты

$$r_{nl} = 1, \quad (12)$$

а сами корреляционные моменты

$$R_{nl} = \text{sgn}(k_{\nabla n} \cdot k_{\nabla l}) \sigma[\nabla_n^N] \sigma[\nabla_l^N], \quad (13)$$

где

$$k_{\nabla n} = \begin{cases} (k_1 - k_1^*) \prod_{i=2}^N k_i^*, & n = 1; \\ (\prod_{j=1}^{n-1} k_j)(k_n - k_n^*) \prod_{i=n+1}^N k_i^*, & 1 < n < N; \\ (\prod_{j=1}^{N-1} k_j)(k_N - k_N^*), & n = N; \end{cases} \quad (14)$$

$$k_j = df_j(x_{j-1})/dx_{j-1} \text{ при } x_{j-1} = m_{j-1}; \quad (15)$$

m_{j-1} – МО процесса X_{j-1} на выходе $(j-1)$ -го компонента ИК. Формула для $k_{\nabla l}$ получается из (14) заменой n на l .

В частном случае, когда все $f_n(x_{n-1})$ и $f_n^*(x_{n-1}^*)$ возрастающие и строго монотонные в областях своего определения (соответственно все k_n , k_n^* положительны),

$$\text{sgn}(R_{nl}) = \text{sgn}[(k_n - k_n^*)(k_l - k_l^*)]. \quad (16)$$

Запишем формулу оценки СКО $\sigma_{\text{ИК}}$ инструментальной погрешности $\nabla_{\Sigma N}$ по значениям ∇_n^N приведенных к выходу ИК пределов допускаемых погрешностей компонентов канала, руководствуясь принципом ОПС [3]. Для этого определим оценку $\sigma[\nabla_n^N]$ как

$$\sigma^{**}[\nabla_n^N] = \nabla_n^N / \sqrt{3}. \quad (17)$$

Подставим (17) в (2). Получим:

$$\sigma_{\text{ИК}} = \left(\sum_{n=1}^N (\sigma^{**}[\nabla_n^N])^2 + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N R_{nl}^{**} \right)^{0.5}, \quad (18)$$

где

$$R_{nl}^{**} = \sigma_n^{**}[\nabla_n^N] \sigma_l^{**}[\nabla_l^N] r_{nl}. \quad (19)$$

Соответственно оценка модуля границы погрешности $\nabla_{\Sigma N}$

$$\nabla_{\text{ИК}}^{\text{ГР}} = k_{\text{Н}} \cdot \sigma_{\text{ИК}} . \quad (20)$$

Поскольку все $\sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}]$ в (18) положительны, то при известных $\sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}]$ значения $\nabla_{\text{ИК}}^{\text{ГР}}$ будут определяться значениями слагаемого

$$2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N R_{nl}^{**} = R . \quad (21)$$

По аналогии с табл. 1 составим табл. 2 возможных вариантов формулы (20).

Формулы в табл. 2 расположены в порядке уменьшения $\nabla_{\text{ИК}i}^{\text{ГР}}$ (уменьшения суммы R) при известных $\sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}]$, т. е.

$$\nabla_{\text{ИК}i}^{\text{ГР}} > \nabla_{\text{ИК}i+1}^{\text{ГР}}, i = 1, 2, \dots, 4. \quad (27)$$

Таблица 2. Варианты формулы (20)

i	$\nabla_{\text{ИК}i}^{\text{ГР}}$	№ п/п	Примечание
1	$k_{\text{Н}} \left[\sum_{n=1}^N (\sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}])^2 + R_1 \right]^{0.5}$ или $k_{\text{Н}} \sum_{n=1}^N \sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}]$	(22)	Все $R_{nl}^{**} > 0$, $r_{nl}=1$, $R_1 > 0$. Возможна только при всех $k_{\nabla n} > 0$.
2	$k_{\text{Н}} \left[\sum_{n=1}^N (\sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}])^2 + R_2 \right]^{0.5}$	(23)	Есть $R_{nl}^{**} > 0$ и $R_{nl}^{**} < 0$, $r_{nl}=1$. $R_2 > 0$. $R_2 < R_1$.
3	$k_{\text{Н}} \left[\sum_{n=1}^N (\sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}])^2 \right]^{0.5}$	(24)	Все $r_{nl} = 0$ или есть $R_{nl}^{**} > 0$ и $R_{nl}^{**} < 0$, все $r_{nl}=1$, но $R_3 = 0$.
4	$k_{\text{Н}} \left[\sum_{n=1}^N (\sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}])^2 - R_4 \right]^{0.5}$	(25)	Есть $R_{nl}^{**} > 0$ и $R_{nl}^{**} < 0$, $r_{nl}=1$. $R_4 < 0$.
5	$k_{\text{Н}} \left[\sum_{n=1}^N (\sigma^{**} [\nabla_n^{\text{N}}])^2 - R_5 \right]^{0.5}$ и ли $k_{\text{Н}} \sigma^{**} [\nabla_1^2] - \sigma^{**} [\nabla_2^2] $	(26)	Все $R_{nl}^{**} < 0$, $r_{nl}=1$. $R_5 < 0$. $ R_5 > R_4 $, $R_1 > R_5 $. Воз- можна только при $N = 2$ и $R_{12}^{**} < 0$.

Проведем анализ условий применения формул (22) – (26). Отметим, что для ИК с безынерционными нелинейными компонентами формулы (22) – (26) являются неточными вследствие отбрасывания нелинейных

членов разложения $f_n(x_{n-1})$ и $f_n^*(x_{n-1}^*)$ в ряд Тейлора (Макларена) при линеаризации. Кроме того, “неточность” (22)–(26), обусловлена следующими причинами:

- отличием моделей компонентов ИК (статические линейные и нелинейные звенья, для которых выполнены выводы формул) от реальных компонентов ИК;

- сделанными допущениями о равновероятном распределении центрированных ∇_n^N и нормальном распределении $\nabla_{\Sigma N}$ (следствие применения принципа ОПС, в результате чего для $\nabla_{\Sigma N}$ граница $\nabla_{ик}^{гр}$ получена как для центрированной случайной величины);

- использованием в расчетах значений $\nabla_n^П$, установленных для компонентов ИК с «запасом на старение» (следствие практики нормирования характеристик инструментальных погрешностей изготовителями СИ [4]).

Учитывая, что $\nabla_{\Sigma N}^H$ и $\nabla_{\Sigma N}^B$ не известны, условие применимости результатов оценки по (20) можно сформулировать следующим образом:

$$[\nabla_{\Sigma N}^H, \nabla_{\Sigma N}^B] \in [-\nabla_{ик}^{гр}, \nabla_{ик}^{гр}] , \quad (28)$$

или

$$\max[|\nabla_{\Sigma N}^H|, |\nabla_{\Sigma N}^B|] \leq \nabla_{ик}^{гр} , \quad (29)$$

где $\max[...]$ – функция выбора максимального из двух значений. Т. к.

$\max[|\nabla_{\Sigma N}^H|, |\nabla_{\Sigma N}^B|]$ тоже не известно, то следует учесть возможность неравенства

$$\max[|\nabla_{\Sigma N}^H|, |\nabla_{\Sigma N}^B|] > \nabla_{ик}^{гр} . \quad (30)$$

Мы не можем сказать, какое из неравенств (29) или (30) будет иметь место в текущий момент времени. Первый случай, когда имеет место (29), нас вполне бы устроил, т.к. интервал $[-\nabla_{ик}^{гр}, \nabla_{ик}^{гр}]$ «накрывает» действительный доверительный интервал $[\nabla_{\Sigma N}^H, \nabla_{\Sigma N}^B]$. Не исключен второй случай, когда имеет место (30), – метрологический отказ ИК. Возможна ситуация, при которой, один из случаев со временем будет приходить на смену другому.

Таким образом, имеется несколько вариантов формулы оценки границы $\nabla_{\Sigma N}$ – формулы (22) – (26). Какому варианту отдать предпочтение? Очевидно, тому, который будет давать наибольшее значение $\nabla_{ик}^{гр}$, в надежде, что даже в случае (30) значение $\nabla_{ик}^{гр}$ окажется не намного меньше $\max[|\nabla_{\Sigma N}^H|, |\nabla_{\Sigma N}^B|]$.

С позиций (12)–(16) в отношении формул (22)–(26) справедливы следующие положения:

1. Формула (22) дает наибольшее в сравнении с (23) – (26) значение $\nabla_{ик}^{рп}$. Формула имеет место, только при всех $r_{n1}=1$ и $k_{\nabla n} > 0$ (когда все k_n , k_n^* , $(k_n - k_n^*)$ положительны). При известных $\nabla_n^П$ (22) принимает вид

$$\nabla_{ик}^{рп} = (k_n / \sqrt{3}) \sum_{n=1}^N \nabla_n^П. \quad (31)$$

2. Использование формул (23), (25) невозможно из-за отсутствия сведений о $f_n(x_{n-1})$ и знаках $k_{\nabla n}$.

3. Формула (24) наилучшим образом подходит для условий поэлементной поверки (калибровки) ИК, когда переменные X_0^* , X_N^* , ..., X_{N-1}^* – последовательности известных постоянных (опорных) значений, компоненты ИК не взаимодействуют друг с другом (компоненты разъединены), изменение влияющих величин стабилизировано в узких пределах и не выходит за границы областей нормальных значений (дополнительные погрешности пренебрежимо малы). Кроме того, (24) – единственная из (22)–(26) формула, для которой знаки $k_{\nabla n}$ (знаки k_n , k_n^* , $(k_n - k_n^*)$) знать не нужно. При известных $\nabla_n^П$ (24) принимает вид

$$\nabla_{ик}^{рп} = (k_n / \sqrt{3}) \left[\sum_{n=1}^N (\nabla_n^П)^2 \right]^{0.5}. \quad (32)$$

4. Формула (26) дает наименьшее в сравнении с (22)–(25) значение $\nabla_{ик}^{рп}$. Формула имеет место только при $N = 2$. Если $N > 2$, то при всех $r_{n1} = 1$ и всех $k_{\nabla n} < 0$ она принимает вид (22), а при наличии хотя бы одной пары одной пары $k_{\nabla n}$ и $k_{\nabla l}$ с разными знаками – вид (23) или (25).

Общая для (22), (23), (25), (26) проблема – знаки $k_{\nabla n}$, определить которые возможно, только получив экспериментально $f_n(x_{n-1})$, что, как было отмечено выше, весьма проблематично. При продолжительном времени эксплуатации ИК количество положительных и количество отрицательных R_{n1} может меняться. Данное обстоятельство также говорит за то, что для рабочих условий эксплуатации ИК следует использовать (22), (31) в предположении, что все $k_{\nabla n}$ положительны.

Нормирование характеристик погрешностей по ГОСТ 8.401-80, как было отмечено выше, не предполагает деление инструментальных погрешностей компонентов на случайные и систематические. Вследствие этого формулы (17)–(32) условно справедливы для центрирован-

ных случайных погрешностей, у которых систематические составляющие отсутствуют. Естественно, возникает еще один вопрос: что получается при оценке $\nabla_{ик}^{гр}$ по значениям $\nabla_n^П$?

На рис. 2 в системе координат $\{\psi(\nabla), \nabla\}$ показан возможный вид функций плотностей распределения вероятностей (ФПРВ) $\psi(\nabla)$ для канала из двух компонентов. Инструментальная погрешность $\nabla_{\Sigma 2}$ канала включает в себя составляющие ∇_1^2 и ∇_2^2 . Кривая с наибольшей модой – действительная ФПРВ (красная кривая) с параметрами распределения $[\nabla_{\Sigma 2}]_s$ и $\sigma[\nabla_{\Sigma 2}]$. Остальные кривые – ФПРВ со СКО $\nabla_{ик i}^{гр}/k_H$ в качестве параметров гипотетических распределений. Значения $\nabla_{ик i}^{гр}$ (показаны на рисунке горизонтальными отрезками) определялись по (22) – (26) при доверительной вероятности 0.95 и $r_{12} = 1, 0.5, 0, -0.5, -1$.

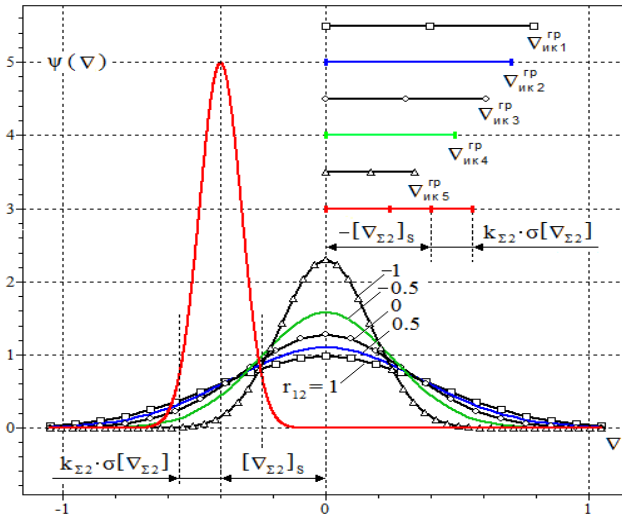


Рис. 2. Пояснения к формулам (22) – (26)

Рис. 2 показывает, что центры действительного и гипотетических распределений не совпадают (что также говорит об условном характере границ $\nabla_{ик 1}^{гр}$, $\nabla_{ик 2}^{гр}$, $\nabla_{ик 3}^{гр}$, $\nabla_{ик 4}^{гр}$, $\nabla_{ик 5}^{гр}$). Действительная ФПРВ погрешности $\nabla_{\Sigma N}$ смещена по оси абсцисс от начала координат на $[\nabla_{\Sigma N}]_s$. Интервал $[-\nabla_{ик 1}^{гр}, \nabla_{ик 1}^{гр}]$ “накрывает” интервалы с другими грани-

цами, в т. ч. и доверительный интервал $[-\nabla_{\Sigma N}^H, \nabla_{\Sigma N}^B]$ для действительного распределения.

Выводы.

1. Оценка границ инструментальной погрешности ИК по пределам допускаемых погрешностей компонентов канала носит условный характер. Условность оценок – следствие использования принципа ОПС при выводе формул оценки границ.

2. Формула оценки границы инструментальной погрешности ИК для рабочих условий эксплуатации канала отличается от формулы оценки границ для условий поверки (калибровки). Главная причина отличия – случайный характер изменения измеряемой величины во времени в рабочих условиях.

3. При оценке границ инструментальной погрешности ИК для рабочих условий коэффициенты передачи k_n , k_n^* компонентов и разности $(k_n - k_n^*)$ следует считать положительными, а инструментальные погрешности компонентов ИК - попарно коррелированными с нормированными корреляционными моментами, равными 1.

4. При оценке границ инструментальной погрешности ИК для условий поэлементной поверки (калибровки) ИК все инструментальные погрешности компонентов ИК следует считать попарно некоррелированными.

Литература

1. Гусаров А.В. Учет корреляционных связей в задачах управления и оценки точности измерений // Инф. сб. "Монтаж и наладка средств автоматизации и связи" / Вып. 5. М.: АО НПО "Монтажавтоматика", 1997. Вып. 5. С. 9 – 27.

2. Гусаров А.В. Учет корреляционных связей между инструментальными погрешностями компонентов при оценке дисперсии инструментальной погрешности измерительного канала // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXIII Бенардосовские чтения). ФГБОУВО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2025. Т. 2: Теплоэнергетика.

3. Гусаров А.В. К оценке границы инструментальной погрешности по пределам допускаемых значений составляющих // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI Бенардосовские чтения). ФГБОУВО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2021. Т. 2: Теплоэнергетика. С. 206–212.

4. Новицкий П.В., Зograф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1991, 304 с.

УДК 621.311.22

А.С. ЗИНОВЬЕВА, аспирант,
Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, д.т.н., профессор
С.Д. ГОРШЕНИН, к.т.н., доцент
А.А. БОРИСОВ, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Совершенствование оценки резервов тепловой экономичности ПГУ

Аннотация. Разработана методика расчета составляющих резерва тепловой экономичности оборудования парогазовых установок ТЭС. Проведена апробация методики применительно к условиям эксплуатации ПГУ-116. Показаны недостатки существующих нормативных подходов к оценке резервов тепловой экономичности парогазовых установок.

Ключевые слова: газотурбинная установка, котел-утилизатор, парогазовая установка, тепловая экономичность оборудования, резерв тепловой экономичности.

A.S. ZINOVIEVA, graduate student,
G.V. LEDUHOVSKY, Doctor of Engineering, professor
S.D. GORSHENIN, Candidate of Engineering,
A.A. BORISOV, Candidate of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Improving the assessment of reserves of thermal efficiency of combined cycle plants

Abstract. A methodology for calculating the components of the thermal efficiency reserve of combined-cycle gas turbine equipment at thermal power plants has been developed. The methodology has been tested in relation to the operating conditions of PGU-116. The shortcomings of existing regulatory approaches to assessing the thermal efficiency reserves of combined-cycle gas turbines have been shown.

Key words: gas turbine plant, waste heat boiler, combined cycle plant, thermal efficiency of equipment, thermal efficiency reserve.

Составляющие резерва тепловой экономичности (РТЭ) представляют собой выраженные в тоннах условного топлива за отчетный период перерасходы или экономию топлива из-за отклонения фактических значений отдельных показателей работы оборудования от их номинальных значений. Определение РТЭ является важнейшим этапом нормативного порядка оценки тепловой экономичности эксплуатируемых ТЭС [1].

По паротурбинным ТЭС методики расчета составляющих РТЭ глубоко проработаны и закреплены в нормативных документах энергетической отрасли. По парогазовым установкам (ПГУ), включая газотурбинные уста-

новки (ГТУ), котлы-утилизаторы (КУ) и паровые турбины ПГУ (ПТ ПГУ) нормативные документы, регламентирующие расчет РТЭ, содержат неточности и не охватывают исчерпывающего перечня составляющих, что затрудняет оценку тепловой экономичности таких установок.

В рамках настоящего исследования разработана методика расчета составляющих РТЭ применительно к ПГУ утилизационного типа с КУ без дожигания топлива. Основные расчетные зависимости разработанной методики получены на основе подхода, применяющегося для паротурбинных ТЭС, базируются на балансовых соотношениях по массе и энергии для отдельных элементов ПГУ и опубликованы в [2].

Выполнен анализ соответствия предложенной методики нормативным документам. Выявлено, что в настоящее время в нормативных документах федерального уровня требования к порядку расчета составляющих РТЭ ПГУ не установлены; единственным нормативным документом, регламентирующим такие расчеты, является Методика МТ-050-2 [3], распространяемая только на электростанции ПАО «Интер РАО». Сопоставление разработанной методики и Методики МТ-050-2 позволило выявить ряд присутствующих в данном нормативном документе неточностей и упрощений:

1) не учитывается теплосодержание топливного газа на входе в камеры сгорания ГТУ, что при наличии газодожимных компрессоров приводит к ошибке в расчете каждой из составляющих РТЭ ГТУ и КУ;

2) РТЭ КУ по показателю «Температура уходящих газов» фактически заменяется РТЭ по показателю «Потери тепла с уходящими газами», что не позволяет обоснованно интерпретировать результаты анализа тепловой экономичности КУ и ГТУ;

3) не учитываются особенности расчета РТЭ ПТ ПГУ по показателю «Удельный расход тепла брутто на выработку электроэнергии» для ПГУ, в которых отработавший в ПТ пар направляется в сетевой подогреватель, а для раздельного регулирования электрической и тепловой нагрузок энергоблока применяются охлаждающие сетевую воду суховоздушные градирни (СВГ);

4) ряд составляющих РТЭ вовсе не определен.

Указанные недостатки Методики МТ-050-2 препятствуют проведению всесторонней оценки технического состояния оборудования и уровня его эксплуатации.

Разработанная в рамках настоящего исследования методика расчета составляющих РТЭ апробирована с использованием эксплуатационных данных по ПГУ-116. Данный энергоблок выполнен по схеме « $2 \times \text{ГТУ} + 2 \times \text{КУ} + 1 \times \text{ПТ ПГУ}$ », а также оборудован СВГ и отдельным пиковым водогрейным котлом.

Расчеты выполнены ежемесячно за годовой период работы оборудования (рис. 1). На рисунке за каждый месяц в сопоставлении приведены значения РТЭ, определенные двумя способами: как сумма составляющих РТЭ по ГТУ, КУ и ПТ ПГУ, а также суммарный РТЭ ПГУ, рассчиты-

ваемый как разность фактического и номинального количеств сожженного топлива.

Результаты расчетов позволяют говорить об удовлетворительной сходимости баланса РТЭ: в целом за год суммарный РТЭ ПГУ отличается от суммы составляющих РТЭ ПГУ лишь на 14 т у.т. (порядка 1 %). Это подтверждает обоснованность разработанной методики расчета составляющих РТЭ ПГУ.

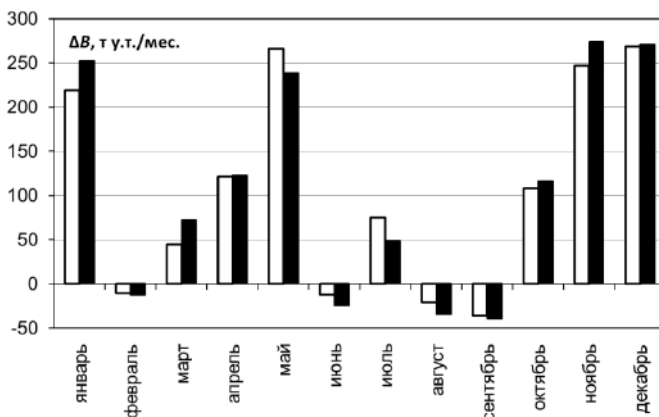


Рис. 1. Результаты расчета РТЭ по ПГУ-116:
белые столбцы – сумма составляющих РТЭ, черные столбцы – суммарный РТЭ по ПГУ

Предложенная методика расчета составляющих РТЭ ПГУ реализована в виде программного модуля, интегрируемого в разрабатываемый в ИГЭУ программный комплекс «ТЭС-Эксперт» [1, 4], который предназначен для анализа фактических, номинальных и нормативных показателей тепловой экономичности и оптимизации режимов работы оборудования ТЭС.

Литература

1. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. Иваново: ИГЭУ, 2015. 468 с.
2. Разработка методики расчета составляющих резерва тепловой экономичности парогазовых установок / Зиновьева А.С., Ледуховский Г.В., Зиновьева Е.В. [и др.] // Вестник ИГЭУ. 2024. Вып. 5. С. 5–13.
3. Методика «Формирование отчета энергопредприятия о тепловой экономичности оборудования и по проведению энергетического анализа»: МТ-050-2. АО «Интер РАО – Электрогенерация».
4. Программный комплекс «ТЭС-Эксперт»: опыт оптимизации режимов работы оборудования ТЭС / Е.В. Барочкин, А.А. Поспелов, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 4. С. 3–6.

УДК 621.311.22

А.С. ЗИНОВЬЕВА, аспирант,
Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, д.т.н., профессор
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор
Е.В. БАРОЧКИН, д.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Регуляризация материальных и энергетических потоков ГТУ с учетом неопределенности измерения расходов и теплофизических параметров теплоносителей

Аннотация. В рамках концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач сформулирована и решена задача совместного сведения материального и энергетического балансов ГТУ с учетом неопределенности измерения расходов и теплофизических параметров теплоносителей. Выполнена апробация предложенной методики для условий эксплуатации ГТУ типа GTX-100.

Ключевые слова: газотурбинная установка, тепловая экономичность оборудования, материальный баланс, энергетический баланс, некорректная задача, метод регуляризации.

A.S. ZINOVIEVA, graduate student,
G.V. LEDUHOVSKY, Doctor of Engineering, professor
V.P. ZHUKOV, Doctor of Engineering, professor
E.V. BAROCHKIN, Doctor of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Regularization of material and energy flows of gas turbine units taking into account the uncertainty of flow measurement and thermal-physical parameters of heat carriers

Abstract. Within the framework of Tikhonov's regularization concept, when solving ill-posed problems, the problem of joint reduction of the material and energy balances of a gas turbine unit was formulated and solved, taking into account the uncertainty of measuring the flow rates and thermal parameters of the coolants. The proposed methodology was tested for the operating conditions of a GTX-100 gas turbine unit.

Key words: gas turbine unit, thermal efficiency of equipment, material balance, energy balance, ill-posed problem, regularization method.

Первым этапом расчета фактических показателей тепловой экономичности и составляющих резерва тепловой экономичности оборудования ТЭС является сведение материального и энергетического балансов [1]. Данная задача относится к классу некорректных задач, перспек-

тивным подходом к решению которых является регуляризация Тихонова [2]. Ранее нами сформулированы и решены задачи материальных и энергетических потоков по результатам измерения контролируемых параметров применительно к оборудованию паросилового цикла [3], а также предложены скалярная [4] и векторная [5] постановки задачи для газотурбинных установок (ГТУ). Однако в случае с ГТУ все указанные варианты постановки задачи разработаны при неизменных значениях теплофизических характеристик теплоносителей, а регуляризации подвергались только их расходы и электрическая мощность. Учет неопределенности измерения теплофизических характеристик теплоносителей позволит дополнительно повысить степень обоснованности результата решения задачи.

Предложен следующий алгоритм решения задачи. Случайным образом заданное число раз m генерируются значения вектора искомых параметров $\mathbf{Y}\mathbf{Y} = [\mathbf{Y} \mathbf{Y}_1]$, включающего два вектора $\mathbf{Y}$ и $\mathbf{Y}_1$:

$$\mathbf{Y} = (B_{\text{КС}} \quad G_{1\text{К}} \quad G_{2\text{Т}} \quad N_{\text{ГТУ}})^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}_1 = \left(\begin{bmatrix} h_{\text{топл}} + Q_{\text{н}}^{\text{р}} \end{bmatrix} \quad h_{1\text{К}} \quad -h_{2\text{Т}} \quad -\frac{1}{\eta_{5\text{Т}}} \right)^T, \quad (2)$$

где $B_{\text{КС}}$, $G_{1\text{К}}$ и $G_{2\text{Т}}$ – расходы соответственно топлива в камеру сгорания, воздуха на входе в компрессор и продуктов сгорания на выходе из турбины, кг/с; $N_{\text{ГТУ}}$ – электрическая мощность ГТУ, МВт; индекс «Т» указывает на транспонирование матрицы; $h_{\text{топл}}$, $h_{1\text{К}}$, $h_{2\text{Т}}$ – энтальпия соответственно топлива, поступающего в камеру сгорания, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания за турбиной, МДж/кг; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, МДж/кг; $\eta_{5\text{Т}}$ определяется из соотношения $Q_5 + Q_{\text{эм}} + N_{\text{ГТУ}} = \frac{N_{\text{ГТУ}}}{\eta_{5\text{Т}}}$ и характеризует тепловые потери от наруж-

ного охлаждения элементов ГТУ и электромеханические потери ГТУ; здесь Q_5 и $Q_{\text{эм}}$ – мощность соответственно тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь ГТУ, МВт.

Вектор $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$ формируется с учетом метрологических ограничений:

$$Y_i \in [Y_i^{\min}, Y_i^{\max}], \quad (3)$$

где $Y_i^{\min}$ и $Y_i^{\max}$ – границы доверительного интервала существования действительного значения параметра, обусловленные номинальной погрешностью средства измерения (или экспертной оценки).

Рассчитывается значение целевой функции регуляризации:

$$F(\mathbf{Y}, \boldsymbol{\lambda}) = |\mathbf{A}\mathbf{Y}|^2 + |\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0)|^2 \Rightarrow \min, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\lambda}$ – диагональная матрица параметров регуляризации; $\mathbf{A}$ – известный матричный оператор модели; $\mathbf{Y}$ и $\mathbf{Y}_0$ – соответственно искомое регуляризованное решение по (1) и его априорная оценка, сформированная из измеренных значений параметров.

Матрица $\mathbf{A}$ формируется из элементов вектора $\mathbf{Y}_1$:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ \left[h_{\text{топл}} + Q_{\text{н}}^{\text{в}} \right] & h_{1\text{к}} & -h_{2\text{т}} & -\frac{1}{\eta_{5\text{т}}} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Диагональная матрица параметров регуляризации $\boldsymbol{\lambda}$ определяется в рамках предварительного решения задачи в векторной постановке согласно [5].

При многократном повторении генерации вектора $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$ выбирается минимальное значение целевой функции, которое и является численным решением задачи регуляризации материальных и энергетических потоков ГТУ с учетом неопределенности измерения расходов и тепловых физических параметров теплоносителей. Анализ результатов тестовых расчетов показывает, что с приемлемой для практических случаев точностью решение может быть найдено при числе сгенерированных вариантов $m = 10^3$.

Предложенный вариант формулировки и решения задачи апробирован с использованием данных по эксплуатации ГТУ типа GTX-100. Выявлено, что учет неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей позволяет получить регуляризованные значения показателей работы оборудования при совместном сведении материального и энергетического балансов ГТУ с дополнительным уменьшением невязок балансов: значение целевой функции регуляризации (4) в сравнении с ранее предложенными вариантами решения задачи [4, 5] уменьшилось в среднем на 7,4%. Кроме этого, рассматриваемый вариант постановки и решения задачи обеспечил достижение практически полного соответствия значений КПД брутто ГТУ, определяемых по прямому и обратному балансам, что дополнительно подтверждает обоснованность подхода.

Литература

1. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. Иваново: ИГЭУ, 2015. 468 с.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
3. Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин [и др.] // Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 72–80.

4. Методика совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок / Зиновьева А.С., Горшенин С.Д., Ледуховский Г.В. [и др.] // Вестник ИГЭУ. 2023. №. 1. С. 5-10.

5. Векторная постановка задачи совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок / Зиновьева А.С., Ледуховский Г.В., Жуков В.П. [и др.] // Вестник ИГЭУ. 2023. №. 5. С. 5-11.

УДК 621.311.22

С.А. ПАНКОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Оценка влияния отложений в проточной части паровой турбины на эффективность ее работы

Аннотация. Рассмотрено влияние отложений различных примесей, содержащихся в паре на эффективность работы турбинных ступеней паровой турбины. Проведены сравнительные расчеты КПД ступеней с «гладкими» профилями и ступеней с отложениями. Выполнена оценка интенсивности снижения КПД из-за отложений для различных групп ступеней.

Ключевые слова: паровая турбина, сопловые и рабочие лопатки, диафрагма, диск, уплотнения, коэффициент потерь энергии.

S.A. PANKOV, Candidate of Engineering, associate professor

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Assessment of the effect of deposits in the flow part of a steam turbine on its efficiency

Abstract. The influence of deposits of various impurities contained in steam on the efficiency of turbine stages of a steam turbine is considered. Comparative calculations of the efficiency of steps with "smooth" profiles and steps with deposits have been carried out. An assessment of the intensity of the decrease in efficiency due to deposits for various groups of steps has been performed.

Key words: steam turbine, nozzle and impeller blades, diaphragm, disc, seals, energy loss coefficient.

Состояние проточной части паровой турбины имеет значительное влияние на ее эффективность и надежность работы. Образование отложений вследствие выпадения из пара на лопатки турбин твердых осадков может существенно исказить рабочий процесс расширения

пара в турбине. При осаждении солей в каналах сопловых и рабочих решеток происходит перераспределение тепловых перепадов по ступеням турбины, в результате все ступени, как занесенные отложениями, так и чистые начинают работать в нерасчетном режиме.

Образование отложений особенно неблагоприятно для цилиндров высокого давления (ЦВД), который имеет наименьшие проходные сечения для потока пара и где вырабатывается наибольшая мощность на единицу площади поверхности лопаток. Отложения в проточной части паровой турбины снижают экономичность энергоблока, так как для поддержания заданной мощности приходится повышать расход пара на турбину повышая паропроизводительность котла и, соответственно, расход топлива.

Примеси, оседающие в проточной части турбины, принято разделять на легкорастворимые и труднорастворимые. К легкорастворимым относятся: соединения натрия (Na_2CO_3 ; Na_2SO_4 ; NaCl и др.); сернокислый кальций (CaSO_4); фосфаты (P_2O_5). Согласно исследованиям [1] легкорастворимые примеси, в первую очередь соединения натрия, выпадают на элементы проточной части турбины вблизи линии насыщения со стороны перегретого пара. Это лопаточный аппарат ступеней, работающих в зоне перехода из однофазного в двухфазное состояние пара.

К труднорастворимым соединениям относятся: окись кремния (SiO_2); окись железа (Fe_2O_3), а в турбинах сверхкритических параметров дополнительно окислы меди (продукты аммиачной коррозии латунных труб теплообменников). Эти отложения образуются приблизительно равномерно по всем ступеням проточной части турбин любых параметров в области перегретого пара. Но в первых ступенях ЦВД это наиболее заметно, так как площади сопловых и рабочих каналов минимальны, и величина отложений очень существенно влияет на экономичность и надежность турбоагрегата.

Экспериментальные исследования [2] показали, что нарушение начальной геометрии каналов турбинных решеток вследствие отложений солей приводит к резкому увеличению неоднородности поля скоростей за решеткой. Интенсивный рост профильных потерь энергии в решетке вызван повышением шероховатости поверхности лопаток и увеличением толщины профилей. В исследовании отмечено, что наиболее интенсивно потери возрастают с увеличением толщины отложений и в меньшей степени с увеличением степени шероховатости поверхности лопаток. На рис. 1 представлена зависимость приращения профильных потерь энергии $\zeta_{\text{пр}} / (\zeta_{\text{пр}})_0$ от коэффициента шероховатости поверхности – k/b , а в табл. 1 характеристики моделируемой шероховатости. Следует отметить, что рост шероховатости происходит одновременно с ростом толщины отложений. На рис. 2 представлена зависимость приращения профильных потерь энергии от относительной толщины отложений h/O с шероховатостью $k/b = 2,7 \times 10^{-3}$, а в табл. 2 характеристики моделируемых отложений.

Как видно из рис. 2 отложения примесей на поверхности лопаток приводит к заметному ухудшению экономичности работы турбины даже при незначительной толщине отложений. Отложения на поверхности профилей сопловой решетки толщиной 0,8 мм и относительной шероховатостью $2,7 \times 10^{-3}$ приводит к росту профильных потерь примерно в два раза, а при увеличении толщины отложений до 2 мм, рост потерь произойдет приблизительно в 3,5 раза.

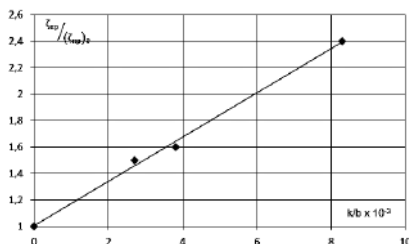


Рис. 1. Зависимость потерь от шероховатости

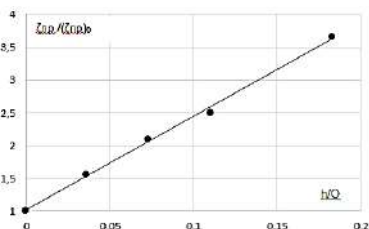


Рис. 2. Зависимость потерь от толщины отложений

Таблица 1. Характеристики моделируемой шероховатости

варианты	K, мкм	k/b
новый	10	$1,67 \times 10^{-4}$
1	162	$2,7 \times 10^{-3}$
2	228	$3,8 \times 10^{-3}$
3	498	$8,3 \times 10^{-3}$

Таблица 2. Характеристики моделируемых отложений

варианты	h, мм	h/O
1	0,42	0,036
2	0,85	0,073
3	1,27	0,11
4	2,12	0,183

Для оценки влияния отложений на эффективность работы турбинных ступеней были проведены расчеты для ЦВД турбины К-800-23,5. Отложения на лопатках регулирующей ступени с относительной толщиной $h/O=0,065$ приводят к снижению внутреннего КПД ступени на 15,5% (относительных), а при $h/O=0,2$ – снижение КПД на 46,5%. Отложения на лопатках первых пяти нерегулируемых ступеней в среднем приводят к снижению КПД ступеней в первом случае на 7,5%, во втором – на 22%. Влияние отложений на эффективность работы ступеней части среднего давления рассмотрено для первых трех ступеней ЧСД теплофикационной турбины. При относительной толщине отложений $h/O=0,2$ КПД понизился на 15%.

Литература

1. Влияние растворенных в паре примесей на образование коррозионно-агрессивной жидкой фазы в проточной части турбин / Мартынова О.И., Поваров О.А., Рабенко В.С., Семенов В.Н., Зайцев Н.А. Теплоэнергетика. 1984. №4.
2. Панков С.А. Аэродинамические характеристики турбинных решеток с технологическими и эксплуатационными нарушениями: диссертация кандидата технических наук: 05.04.12/ Моск. энерг. ин-т. Москва, 1989. 211 с.: ил.

УДК 621.311.22

Д.С. ФЕДОРОВ, аспирант,
Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, д.т.н., профессор
С.Д. ГОРШЕНИН, к.т.н., доцент
А.А. БОРИСОВ, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Методика расчета поправок к показателям тепловой экономичности ГТУ по данным эксплуатационных наблюдений

Аннотация. Разработана методика определения поправок к показателям тепловой экономичности ГТУ в составе нормативных энергетических характеристик по данным эксплуатационных наблюдений. Выполнена апробация предложенной методики на основе данных по турбоустановке типа SGT-800.

Ключевые слова: газотурбинная установка, тепловая экономичность оборудования, энергетическая характеристика, внешние факторы, фиксированные условия.

D.S. FEDOROV, graduate student,
G.V. LEDUHOVSKY, Doctor of Engineering, professor
S.D. GORSHENIN, Candidate of Engineering,
A.A. BORISOV, Candidate of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Methodology for calculating corrections to the thermal efficiency indicators of gas turbine units based on operational observation data

Abstract. A methodology for determining amendments to the thermal efficiency indicators of gas turbine units as part of the standard energy characteristics based on operational observations has been developed. The proposed methodology has been tested based on data from a SGT-800 type turbine unit.

Key words: gas turbine unit, thermal efficiency of equipment, energy characteristics, external factors, fixed conditions.

Важным этапом разработки нормативных энергетических характеристик оборудования ТЭС является определение поправок к основным и промежуточным показателям тепловой экономичности на отклонение значений внешних факторов от фиксированных условий. В большинстве случаев поправки принимаются по данным типовых энергетических характеристик (ТЭХ), а при их отсутствии определяются в ходе специально организованных тепловых испытаний оборудования [1]. Однако по газотурбинным установкам (ГТУ) ТЭХ отсутствуют, а определение ряда поправок в ходе испытаний в принципе невозможно из-за

ограничений по созданию необходимых условий работы оборудования в рамках активного эксперимента. Поэтому на практике по ГТУ поправки обычно принимают по расчетным данным завода-изготовителя оборудования, что нередко приводит к ошибкам при анализе показателей тепловой экономичности эксплуатируемого оборудования.

В рамках настоящего исследования разработана методика расчета поправок к показателям тепловой экономичности ГТУ по данным эксплуатационных наблюдений. Перечень поправок (то есть перечень влияющих факторов, на изменение которых определяются поправки) принимается по данным завода-изготовителя. В первом приближении поправки считаются линейными:

$$\Delta\Pi_{i,j} = K_{i,j} \left(\Phi_j^{(p)} - \Phi_j^{(ин)} \right), \quad (1)$$

где $\Delta\Pi_{i,j}$ – поправка к рассматриваемому i -му показателю, учитывающая его отклонение при изменении j -го влияющего фактора Φ_j от фиксированного значения $\Phi_j^{(ин)}$, принятого при разработке нормативной энергетической характеристики, до значения $\Phi_j^{(p)}$, соответствующего рассматриваемому режиму работы установки; $K_{i,j}$ – числовой коэффициент, учитывающий отклонение i -го показателя при изменении j -го влияющего фактора.

В свою очередь, для некоторого заданного режима работы ГТУ i -й показатель тепловой экономичности $\Pi_i^{(p)}$ определяется суммой его исходно-номинального значения $\Pi_i^{(ин)}$ и соответствующих поправок:

$$\Pi_i = \Pi_i^{(ин)} + \sum_{j=1}^m \Delta\Pi_{i,j}, \quad (2)$$

где m – количество факторов, влияние которых учитывается при определении показателя Π_i .

Для известных значений $\Pi_i^{(ин)}$ и $\Phi_j^{(ин)}$ задача определения коэффициентов $K_{i,j}$ по данным эксплуатационных наблюдений сводится к задаче минимизации отклонения $(\Pi_i - \Pi_i^{(ф)})^2$, где $\Pi_i^{(ф)}$ – фактическое значение показателя. Задача решается с использованием модели множественной линейной регрессии [2, 3]. При этом поправки $\Delta\Pi_{i,j}$, определяемые иным путем, например поправка на отработанный ресурс, которая не является линейной и рассчитывается по специальной методике, также должны быть учтены.

Методика апробирована на основе эксплуатационных данных по 536 режимам работы ГТУ типа SGT-800. Отдельные результаты расчетов сведены в табл. 1, где в качестве параметров Π_i приведены: тепловая мощность, подводимая в камеру сгорания ГТУ $Q_{КС}$; тепловая мощность потока дымовых газов ГТУ $Q_{2Т}$, коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за турбиной $\alpha_{2Т}$ и температура продуктов сгорания за турбиной $t_{2Т}$. В качестве факторов Φ_j рассматриваются: температура воздуха перед компрессором $t_{1К}$, относительная влажность воздуха $\phi_{нв}$, приведенная высота над уровнем моря $H_{ур}^{прив}$ (через неё учитывается влияние атмо-

сферного давления), перепад давлений на всасе компрессора $\Delta P_{1к}$, перепад давлений на выходе турбины $\Delta P_{2т}$, коэффициент мощности турбогенератора $\cos(\varphi)$ и отработанный ресурс $T_{рес}$. Через $f(N)$ обозначено наличие зависимости от электрической мощности ГТУ.

Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов $K_{i,j}$

Фактор Φ_j , единица измерения	Исходно-номинальное значение фактора $\Phi_j^{(ин)}$	Значения коэффициента $K_{i,j}$, учитывающего влияние фактора Φ_j на параметр Π_i			
		Параметры Π_i			
		$Q_{кк}$	$Q_{2т}$	$t_{2т}$	$\alpha_{2т}$
$t_{1к}$, °C	15,5	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$4,55 \cdot 10^{-2}$	$5,78 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$
$\Phi_{нв}$, %	60	$-3,45 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$-5,53 \cdot 10^{-3}$	$-4,68 \cdot 10^{-4}$
$H_{уп}^{прив}$, м	0	$-2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$-3,73 \cdot 10^{-3}$	$-4,52 \cdot 10^{-5}$
$\Delta P_{1к}$, кПа	$\Delta P_{1к}^{(ин)} = f(N)$	1,753	1,514	-4,149	$4,62 \cdot 10^{-2}$
$\Delta P_{2т}$, кПа	$\Delta P_{2т}^{(ин)} = f(N)$	1,541	1,674	-4,785	$7,77 \cdot 10^{-2}$
$\cos(\varphi)$, ед.	0,99	$-1,38 \cdot 10^{-1}$	-1,237	—	—
$T_{рес}$, тыс. ч	70,8	$f(T_{рес})^*$	$-2,09 \cdot 10^{-2}$	$-1,39 \cdot 10^{-1}$	—

*Примечание. Поправка на отработанный ресурс к $Q_{кк}$ не является линейной, определена по методике завода-изготовителя

Точность полученной математической модели ГТУ SGT-800, включающей исходно-номинальные зависимости показателей работы оборудования от нагрузки и комплект поправок к ним на отклонение значений внешних факторов от фиксированных условий, характеризуется математическим ожиданием разницы значений КПД брутто ГТУ, рассчитанных по прямому и обратному балансам, на уровне 0,09% со среднеквадратическим отклонением 0,36%. Это подтверждает возможность использования предложенной методики расчета поправок при нормировании показателей тепловой экономичности ГТУ, а также для верификации математических моделей, основанных на энергетических характеристиках оборудования и используемых в системах оптимизации режимов работы оборудования тепловых электрических станций.

В рамках дальнейших исследований для повышения точности модели предполагается развить предложенную методику путем учета возможного нелинейного характера поправок.

Литература

1. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. Иваново: ИГЭУ, 2015. 468 с.
2. Корн Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1. Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

УДК 621.311.22

С.Д. ГОРШЕНИН, к.т.н., доцент
Е.Д. ГИЛЬМУТДИНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет,
153003 г. Иваново, Рабфаковская улица, 34
E-mail: gsd1985@yandex.ru, mr.egor225@mail.ru

Моделирование режима работы деаэратора ДП-65 при сниженном рабочем давлении

Аннотация. В статье приведены результаты моделирования режима работы деаэратора питательной воды ДП-65 струйно-барботажного типа при сниженном рабочем давлении. Описаны способы повышения его массообменных характеристик.

Ключевые слова: деаэрация, деаэратор ДП-65, струйный отсек, барботажный непроточный лист, эффект деаэрации.

S.D. GORSHENIN, Candidate of Engineering Sciences,
E.D. GILMUTDINOV, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya street, 34
E-mail: gsd1985@yandex.ru, mr.egor225@mail.ru

Simulation of the DP-65 deaerator operation mode at reduced operating pressure

Annotation. The article presents the results of modeling the operating mode of the DP-65 feed water deaerator of the jet-bubbling type at a reduced operating pressure. The methods of increasing its mass transfer characteristics are described.

Key words: deaeration, DP-65 deaerator, jet compartment, non-bubbling bubbling sheet, deaeration effect.

Термический деаэратор ДП-65 ТЭЦ сахарного завода в г. Елец работает в составе тепловой схемы турбоустановки типа SST-300 и служит для деаэрации и утилизации тепла следующих потоков теплоносителей: производственный конденсат, вторичный пар РНП, химически очищенная вода для подпитки цикла. Греющей средой служит вторичный пар расширителя непрерывной продувки, а также пар коллектора собственных нужд. Характеристика потоков теплоносителя, направляемых в деаэратор, соответствующая характерному режиму работы ТЭЦ, приведена в табл.1.

Конструктивно колонка деаэратора ДП-65 относится к струйно-барботажному типу и включает в себя один струйный и один барботажный отсеки. Диаметр колонки составляет 1,3 м. Высота струйного отсека составляет 0,5 м, перфорация струеобразующей тарелки включает в себя комплекс отверстий диаметром 4 мм. Основным элементом бар-

ботажного отсека является непровальный барботажный лист, перфорированный 592 отверстиями диаметром 4 мм. Барботаж в деаэрационном баке не предусмотрен.

Таблица 1. Характеристика потоков, направляемых в деаэратор ДП-65

Наименование потока теплоносителя	Наименование показателя, размерность			
	Расход, т/ч	Температура, °С	Давление, кгс/см ²	С _{О₂} , мкг/дм ³
химически очищенная вода для подпитки цикла	9,2	99	-	8000
Производственный конденсат	132	119		130
Непрерывная продувка котла	2,6	170		0
Греющий пар	-	190		0
Питательная вода	139	130		120

По причине того, что установленные на ТЭЦ питательные насосы не рассчитаны перекачку деаэрированной воды с температурой выше 135 °С, деаэратор фактически работает в непроектном режиме при пониженном рабочем давлении, которое не превышает 3 кгс/см². Это обстоятельство, а также высокое содержание кислорода в подпиточной воде являются возможными причинами того, что ТЭЦ работает с постоянным нарушением требований по содержанию растворенного кислорода в питательной воде (120 мкг/дм³ при нормативе 10 мкг/дм³). При увеличении расхода подпиточной воды из бака запаса обессоленной воды резко увеличивается содержание кислорода за деаэратором и, соответственно, содержание углекислоты.

Для определения эффективности удаления кислорода из воды в струйных и барботажных элементах колонки в соответствии с рекомендациями [1, 2] был выполнен поверочный расчет деаэратора. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 подтверждает гипотезу о том, что вероятной причиной ухудшения интенсивности массообмена является работа деаэратора при пониженном давлении. Снижение эффективности удаления растворенного кислорода составляет около 15%. При этом выявлено, что возврат к проектному давлению пара в деаэраторе не позволит обеспечить нормативное качество питательной воды по растворенному кислороду на уровне 10 мкг/дм³.

Причиной является недостаточность принятых конструктивных решений при работе на ХОВ с высокой концентрацией растворенного кислорода.

Обеспечение нормативной концентрации растворенного кислорода в питательной воде можно добиться путем внедрения следующих мероприятий:

- использование деаэрационных установок, предвключенных основному деаэратору на потоке химически очищенной воды, например, центробежно-вихревого типа;
- организация барботажа в деаэраторном баке.

Таблица 2. Результаты моделирования режима работы деаэратора ДП-65

Наименование потока	Наименование показателя, размерность			
	Расход, т/ч	Температура, °С	CO ₂ , мг/дм ³	Эффективность удаления кислорода, %
Вход в колонку (средневзвешенные значения)	143,8	117,7	642,8	77,2 / 92,2*
Выход из струйного отсека колонки	145,6 / 151,5*	122,4 / 154,4*	535,0 / 580,1*	
Выход из барботажного отсека колонки	146,4 / 152,4*	128,7 / 158,7*	369,5 / 142,1*	
Выход из деаэраторного бака	146,4 / 152,4*	128,7 / 158,7*	146,3 / 50,4*	

* - расчётные значения при работе деаэратора при проектном давлении

Оценочные расчеты показывают, что организация барботажа в деаэраторном баке позволит увеличить эффект дегазации по кислороду в баке до 97,7 % [3], тем самым добиться нормативного качества воды по растворенному кислороду, как при проектном, так и при сниженном рабочем давлении пара в деаэраторе.

Литература

1. Оликер, И.И. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях / И.И. Оликер, В.А. Пермьяков. Л.: Изд-во «Энергия», 1971. 185 с.
2. РТМ 108.030.21-78 Расчет и проектирование термических деаэраторов.
3. Ледуховский, Г.В. Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Ледуховский Григорий Васильевич. Иваново, 2008. 226 с.

УДК 621.311.226: 621.313.333

М.Ю. ЗОРИН, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: zorin@ivenser.com

Выбор оптимальной схемы для ПГУ-325

Аннотация. Разработана методика комплексного подхода к термодинамической оценке различных схем деаэрирования питательной воды для утилизационных ПГУ. Показано, что наиболее оптимальной является схема с деаэрацией

воды распылительной головкой, установленной в барабане низкого давления котла-утилизатора ПГУ.

Ключевые слова: деаэратор, котел-утилизатор, газовая турбина, паровая турбина, схема.

M.Y. ZORIN, Candidate of Technical Sciences, assistant professor

Ivanovo State Power Engineering University1

53003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: zorin@ivenser.com

Selection of the optimal scheme for PGU-325

Abstract. The technique of an integrated approach to the thermodynamic evaluation of various schemes deaerating feedwater for utilizing UCG. It is shown that the optimal scheme is a de-aeration of water spray head mounted in the drum of the recovery boiler PSU low pressure.

Key words: a deaerator, a heat recovery boiler, a gas turbine, a steam turbine, circuit.

В настоящее время отечественная и зарубежная энергетика активно развивается по пути создания утилизационных парогазовых установок (ПГУ). Главными преимуществами таких ПГУ по сравнению с традиционными паротурбинными установками (ПТУ) являются: высокая экономичность (КПД $\eta_{\text{ПГУ}} = 52 - 55\%$); малые капитальные вложения; меньшая потребность в охлаждающей воде; низкие вредные выбросы; высокая маневренность. Утилизационные ПГУ требуют установки котлов-утилизаторов (КУ), в которых уходящими газами ГТУ генерируется пар одного или двух давлений для ПТУ. На территории России устанавливаются ГТУ как отечественного, так и зарубежного производства. Эти ГТУ имеют высокие показатели по надежности и экономичности. Котлы-утилизаторы устанавливаются, в основном, отечественного производства.

Паротурбинные подстройки (КУ, ПТУ) к ГТУ имеют более низкие параметры пара в сравнении с традиционными существующими конденсационными турбинами. Однако, вопрос предотвращения кислородной коррозии металла остается актуальным и для них.

Кислородная коррозия металла трубопроводов и оборудования (КУ, ПТУ) является наиболее опасной, так как она проявляется в виде язвин и может привести к выходу оборудования из строя. Чтобы устранить это явление, необходимо осуществить процесс удаления из воды растворенных в ней агрессивных газов. Наибольшее распространение получил термический способ деаэрации воды, в котором растворимость в воде газов с повышением ее температуры уменьшается, а при температуре, равной температуре кипения, агрессивные газы почти полностью удаляются из воды. Их содержание в воде после деаэрации не превышает 7-10 мкг/л. Система регенерации в тепловой схеме ПГУ упрощена, поэтому перед нами встал ряд вопросов: какая система

деаэрации питательной воды будет самой эффективной и рациональной, к какому отбору паровой турбины подключить деаэратор и какое давление поддерживать в нем?

Для ПГУ-325 нами были рассмотрены семь вариантов деаэрации воды в тепловой схеме:

1. установлен деаэратор Д-0,02 МПа, из которого вода насосом подается в барабаны высокого (БВД) и низкого давления (БНД) КУ; а сепарат ЦВД сливается в конденсатор паровой турбины;
2. установлен тот же Д-0,02 МПа, а сепарат ЦВД идет в него;
3. установлен деаэратор Д-0,12 МПа, а сепарат ЦВД паровой турбины идет в конденсатор;
4. применен Д-0,02 МПа с одним питательным насосом (ПН) для БНД, а сепарат ЦВД поступает в конденсатор; второй ПН после БНД подает воду в БВД;
5. та же схема 4, но сепарат ЦВД идет в деаэратор;
6. установлен деаэратор Д-0,12 МПа; слив сепарата ЦВД направлен в Д-0,12 МПа, который имеет один ПН; второй ПН подает воду из БНД в БВД;
7. деаэрация воды осуществляется в барабане низкого давления специальной головкой распылительного типа.

Из проведенных расчетов было получено, что схема ПГУ-325 по варианту 5 (см. рис. 1) имеет наивысший КПД ($\eta_{\text{пгу}}=52,16\%$) из рассмотренных с первой по шестую схем с деаэратором. Самой лучшей оказывается схема с деаэрацией воды в барабане НД котла КУ. КПД достигает $\eta_{\text{пгу}}=53,015\%$ (рис.2).

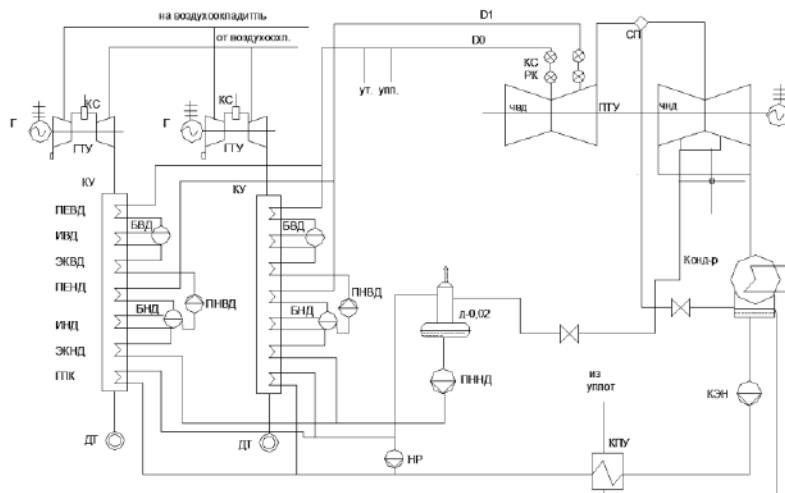


Рис. 1. Тепловая схема ПГУ (схема "связанная" с деаэратором Д-0,02 МПа и сливом дренажа из сепаратора в конденсатор)

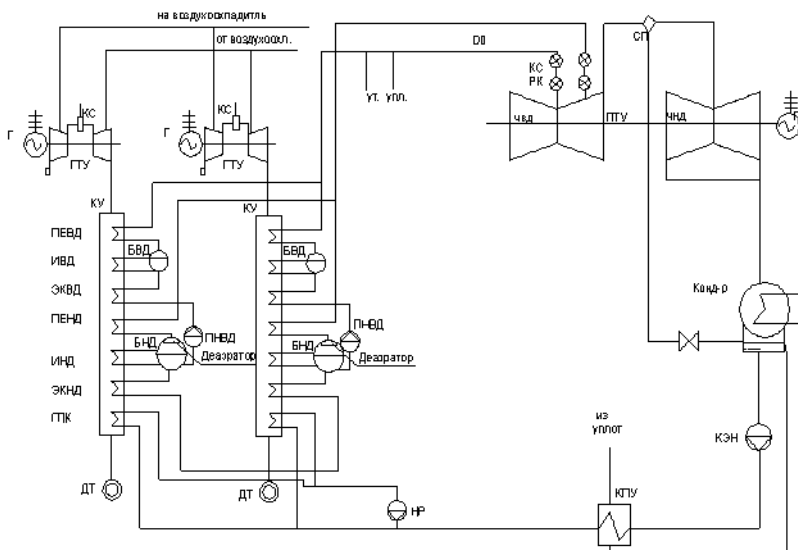


Рис. 2. Тепловая схема ПГУ-325 со встроенным в барабан деаэратором

Специальная распылительная головка в БНД может быть расположена в любом месте барабана. Таким образом, ввиду значительно большего преимущества в экономичности наиболее целесообразно применять деаэрацию воды по варианту 7 (рис.2).

УДК 621.165

П.А. МИНЕЕВ¹, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
Email: pasha.mineevr@ya.ru¹

Анализ базовых принципов моделирования турбоустановок с использованием нейросетевых технологий

Аннотация. В работе выполнен анализ принципов моделирования турбоустановок с использованием нейросетевых технологий, составлен алгоритм создания нейросетевой модели, разработана нейросетевая модель турбоустановки К-1000-60/3000

Ключевые слова: турбоустановка, нейросетевое моделирование, искусственный интеллект

P.A. MINEEV¹, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University

53003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Email: pasha.mineevr@ya.ru¹

Analysis of the turbine plant modeling basic principles using neural network technologies

Abstract. The paper analyzes the principles of modeling turbine installations using neural network technologies, an algorithm for creating a neural network model is compiled, and a neural network model of the K-1000-60/3000 turbine is developed.

Key words: turbine plant, neural network modeling, artificial intelligence

Постановка задачи.

Моделирование работы турбоустановок является актуальным вопросом в связи с необходимостью решения большого числа задач, которые не могут быть рассмотрены на объекте, находящемся в реальной эксплуатации. К таким задачам можно отнести проблемы оптимизации и надежности оборудования. При этом, повышение надежности и эффективности работы оборудования, в том числе турбоустановок, является важной составляющей, как государственных [1], так и частных производственных [2], перспективных программ, так как это способно обеспечить бесперебойную подачу электроэнергии потребителю (промышленным предприятиям и частным потребителям) и, с течением времени, увеличить мощности производств.

Нейросетевые (НС) модели активно внедряются в различные производственные процессы. В энергетике это, как правило, транспорт электрической и тепловой энергии и аспекты распределения электрической и тепловой нагрузки между потребителями [3].

На практике можно создать НС модель любого оборудования при наличии набора численных показателей, отражающих происходящие в нем физические процессы. Главными преимуществами такого типа моделей является высокая скорость расчета, точность расчета, как правило, сопоставимая с точностью приборов учета, установленных на производстве, а также содержание внутри информации об особенностях каждого конкретного объекта. К ограничениям можно отнести возможность использования их только в диапазоне эксплуатационных параметров [4]. Также в качестве недостатка можно представить неопределенность работы алгоритма таких моделей.

Целью работы является анализ базовых принципов НС моделирования турбинного оборудования электростанций путем выполнения следующих задач:

1. разработка алгоритма НС моделирования турбоустановки;
2. применение разработанного алгоритма на находящейся в эксплуатации турбоустановке.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в возможности применения разработанного алгоритма для моделирования любой турбоустановки.

Практическая значимость – в использовании НС модели для целей эксплуатации: анализ энергетической эффективности работы турбоустановок, составление режимных характеристик и т.д.

Результаты исследования.

На первом этапе необходимо произвести выбор целевых функций. Целевая функция – это определенный параметр, как правило, расчетный, который максимально отражает в текущем исследовании либо эффективность, либо надежность работы турбоустановки. В качестве показателей надежности могут быть использована, например, частота отказов; эффективности – удельный расход условного топлива (УРУТ), удельный расход тепла на турбоустановку (УРТ), удельный расход пара на турбоустановку (УРП), удельный расход условного ядерного горючего (УРУЯГ) и т.д. [5]

Второй этап включает в себя выбор влияющих параметров на целевые функции. Для этих целей могут быть использованы методы факторного и кластерного анализа [4, 6].

Далее производится выбор способа обучения и типа нейронной сети. Существуют два способа обучения: с учителем и без учителя. В настоящем исследовании обучение «с учителем», то есть с известными значениями целевых функций является предпочтительным, так как данный процесс обучения занимает значительно меньше времени и выходные данные понятны, как для исследователя, так и для персонала, использующего в последствии данную модель. При выборе типа нейронной сети следует определить структуру: однослойный персептрон, многослойный персептрон, нейронная сеть с радиальными базисными функциями и т.д., - метод обучения: градиентного спуска, сопряженных градиентов и др., - а также функцию активации (функция, преобразующая входные данные в выходные в нейроне): сигмоидальная, гиперболическая, экспоненциальная и др.

На четвертом этапе разрабатывается алгоритм обучения нейронной сети в соответствии с выбранными характеристиками на предыдущем этапе и производится обучение. При этом число эпох (число циклов обучения) определяется минимумом ошибки НС модели.

Окончательным является процесс валидации модели на данных, не участвовавших в обучении, но находящихся в тех же диапазонах изменения. Также может быть проведена процедура верификации при наличии разработанной модели турбоустановки с другой структурой (например, математической модели, использующей набор дифференциальных уравнений).

Преимуществом разработанной модели также будет визуальный интерфейс для упрощения взаимодействия оператора и программы.

Обобщенный алгоритм разработки НС модели турбоустановки представлен на рис. 1.

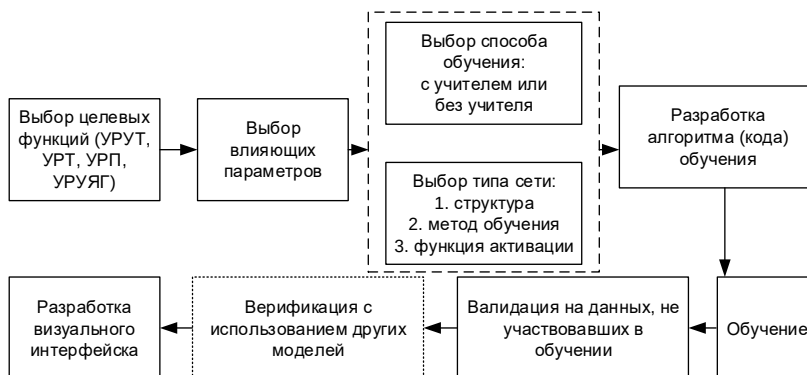


Рис. 1. Обобщенный алгоритм разработки НС модели турбоустановки

Согласно алгоритму, представленному на рис. 1, разработана НС модель турбоустановки К-1000-60/3000. Данная модель лежит в основе «Программы для определения показателей эффективности паротурбинной установки К-1000-60/3000»[7]. Визуальный интерфейс представлен на рис. 2.

Принцип работы программного комплекса (ПК) состоит в следующем: исходные данные в виде варьируемых и прочих влияющих параметров могут быть заполнены в ручную или автоматически из систем электростанции. После активации кнопки «Запустить работу нейронной сети» производится расчет и отображение целевых функций.

С использованием данного программного комплекса также сформированы обоснованные нормы потребления энергии в виде зависимостей от мощности (в диапазоне от 1023 до 1072 МВт) показателей УРТ (10700-11400 кДж/(кВт-ч)), УРП (5,7-6,2 кг/(кВт-ч)) и УРУТ (360-390 г у.т./((кВт-ч)). Зависимость – линейная, тренд – при увеличении мощность все показатели снижаются.

Анализ полученных результатов.

В ходе исследования проведен анализ базовых принципов разработки НС моделей турбоустановок.

При этом создан универсальный алгоритм разработки НС модели любой турбоустановки (рис. 1) от этапа выбора целевых функций до создания готового программного комплекса.

С использованием предложенного алгоритма разработан программный комплекс, позволяющий определять УРТ, УРП, УРУТ и КПД. Данный программный комплекс позволил составить обоснованные нормы потребления энергии.

Нейросетевая модель паротурбинной установки К-1000-60/3000

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ТУРБИНЫ
NEURAL NETWORK MODEL OF THE TURBINE**Варьируемые параметры**
Variable parameters

Положение ЦРК LRV position	66,7	%
Температура пара на входе ЦВД Steam outlet HPC temperature	274	°C
Температура ЦВ на выходе из К CW outlet C temperature	21,56	°C
Давление в К C pressure	4,45	кПа
Давление пара ПП SSP steam pressure	5,63	МПа
Расход пара на ПП SSP steam flow rate	651,5	т/ч
Положение РУ 2 ПНД-2 LV position	30,6	%
Давление НСС-1 SDP-1 position	1,73	МПа
Давление НСС-2 SDP-2 position	0,44	МПа
Давление ОК КЭН-2 CEP-2 pressure	1,835	МПа
Расход пара на ЦВД HPC flow rate	5471,4	т/ч
Расход пара на ЦНД LPC flow rate	3901,5	т/ч
Расход пара в конденсатор C flow rate	3175,6	т/ч
Расход пара на ПВД-7 HPR-7 flow rate	352,1	т/ч
Расход пара на ПВД-6 HPR-6 flow rate	326,4	т/ч
Расход пара на Д-7 D-7 flow rate	181	т/ч
Расход пара на ПНД-5 LPH-5 flow rate	274,6	т/ч
Расход пара на ПНД-4 LPH-4 flow rate	162	т/ч
Расход пара на ПНД-3 LPH-3 flow rate	158,1	т/ч
Расход пара на ПНД-2 LPH-2 flow rate	233,5	т/ч
Расход пара на ПНД-1	172,3	т/ч

Электрическая мощность
Electrical power

Электрическая мощность	1066	МВт
Температура ОК за ПНД-3 LPH-3 MC temperature	99,2	°C
Температура ОК перед ПНД-4 LPH-4 MC temperature	99,9	°C
Температура ОК перед ПНД-5 LPH-5 MC temperature	120,6	°C
Температура ОК перед Д-7 D-7 MC temperature	155,2	°C
Температура ПВ перед ПВД-6 HPR-6 FW temperature	165,8	°C
Температура ПВ за ПВД-6 HPR-6 FW temperature	190,9	°C
Температура за ПВД-7 HPR-7 FW temperature	215,05	°C
Температура на ПГ SG FW temperature	221,625	°C
Давление ПВ на ПГ SG FW pressure	7,045	МПа
Температура в коллекторе упл Temperature in the seal collector	156,8	°C
Частота ЦН-1 CWP-1 frequency	279	об/мин
Частота ЦН-2 CWP-2 frequency	279	об/мин
Частота ЦН-3 CWP-3 frequency	278	об/мин
Частота ЦН-4 CWP-4 frequency	279	об/мин

Запустить работу нейронной сети
Start the neural network operation

	Нейросеть	Расчет	кг
УРП на ЭЭ SSC	5,7442	5,7432	кВт-ч
УРТ на ЭЭ SHC	10667,5	10667,9	кДж
КПД эл схемы	33,75	33,75	%
УРП на ЭЭ SCCF	0,364	0,364	кг у.т.

Отобразить результаты теплового
расчета на схеме
Display the calculation results

Рис. 2. Фрагмент визуального интерфейса НС модели

Ключевым преимуществом НС модели является скорость расчета, что позволяет внедрять основанные на них программные комплексы на производстве в режиме реальной эксплуатации: расчет может производиться одновременно с записью данных приборов учета в системах электростанций при минимальном потреблении вычислительных ресурсов.

Перспективным направлением развития таких моделей и программных комплексов является разработка дополнительного функционала в виде автоматизированного процесса оптимизации процесса: создание надстройки – программы-помощника, позволяющей производить определенные вычисления для поиска оптимума значений входных параметров в каждый конкретный момент времени.

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. N 1473 "Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности".
2. Паспорт Программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года. - Москва, 2021.
3. Шумилова, Г.П. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур / Н.Э. Готман, Т.Б. Старцева. Сыктывкар: КНУ УрО РАН, 2008. 77 с.
4. Горбунов, В.А. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок / ФГБОУ ВПО «ИГЭУ В.И. Ленина». Иваново, 2011. 476 с.
5. Минеев, П.А. Определение критериев оптимизации работы второго контура АЭС с реакторами типа ВВЭР / П.А. Минеев, В.А. Горбунов, М.Н. Мечтаева // Международный журнал информационных технологий и энергетической эффективности. Т.9. №8, 2024. С.143-148.
6. Горбунов, В.А. Кластерный и факторный анализ в процессе промышленного эксперимента на Калининской АЭС / В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева, П.А. Минеев // XIII семинар вузов по теплофизике и энергетике: тезис докл. Нижний Новгород, 2023. С.252-254.
7. Патент № 2025617497 Россия, Программа для определения показателей эффективности паротурбинной установки К-1000-60/3000: заявл. 13.03.2025: опубл. 26.03.2025 / П.А. Минеев, В.А. Горбунов.

УДК 621.165

П.А. МИНЕЕВ¹, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
Email: pasha.mineevr@ya.ru¹

К вопросу оптимизации работы турбоустановок

Аннотация. В исследовании представлен обзор существующих и перспективных способов оптимизации работы турбоустановок электростанций

Ключевые слова: турбоустановка, оптимизация, энергетическая эффективность

P.A. MINEEV¹, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University
53003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Email: pasha.mineevr@ya.ru¹

On the issue of turbine plant optimization

Abstract. The study provides an overview of existing and promising ways to optimize the operation of turbine power plants.

Key words: turbine plant, optimization, energy efficiency

Постановка задачи.

Повышение КПД турбоустановки посредством режимных изменений подразумевает оптимизацию работы отдельных систем или турбоустановки в целом. Согласно [1] оптимизация является процессом, при котором происходит расчет вариантов режимов работы оборудования с использованием различных алгоритмов (методов) с целью определения оптимального («хорошего» или наиболее экономически-обоснованного) режима работы. При этом данные методы осуществляются применительно к математической модели рассматриваемой системы.

В данном случае невозможно отрицать работу автоматической системы управления (АСУ) на электростанции, так как для нее и только посредством нее возможно проведение оптимизационных мероприятий, как для проектируемых вновь электростанций посредством разработки и отладки АСУ, так и для находящихся в эксплуатации электростанций путем настройки систем АСУ в случае необходимости.

Проверка необходимости настройки АСУ является достаточно сложной задачей, которая может быть осуществлена, в первую очередь, персоналом электростанции, проводящим технико-экономические расчеты [2] (данная необходимость может быть обнаружена, например, в случае резкого увеличения эксплуатационных расходов электростанции), и только потом с использованием алгоритмов оптимизации. Однако, при достаточном уровне исследовательского интереса в направлении повышения энергетической эффективности оборудования электростанций, находящихся в эксплуатации, могут быть разработаны новые оптимизационные методы, позволяющие увеличить КПД и вследствие этого снизить эксплуатационные расходы до существенно больших уровней.

В связи с представленными тезисами целью исследования является обзор традиционных и новых методов оптимизации тепломеханического оборудования электростанций для их дальнейшего использования в существующих моделях, разработанных на базе кафедры АЭС ИГЭУ [3, 4].

Результаты исследования.

Оптимизация тесно связана с проблемами принятия решений. Согласно Р.Л. Кини парадигма принятия решений включает в себя:

1. Предварительный анализ, основанный на размышлении, который мог бы быть использован для решения актуальной задачи, если бы решения принимал человек самостоятельно без использования вычислительных ресурсов.

2. Структурный анализ, в котором лицо, принимающее решение, (ЛПР) анализирует, что оно может предпринять из ряда вариантов. В настоящем исследовании задачи ЛПР, связанные с анализом, должен выполнять программный комплекс с использованием представленных далее оптимизационных алгоритмов.

Процедура оптимизации установившегося режима работы энергосистемы согласно [5] включает в себя:

«1. оптимальное распределение активной и реактивной мощностей между генерирующими источниками. ...;

2. оптимальный выбор включенных в работу агрегатов ...;

3. оптимальное назначение оперативного резерва мощности в энергосистемы;

4) выбор оптимальной схемы энергосистемы;

5) оптимальное регулирование частоты и напряжений» [5, с.65].

При этом «в ряде случаев рассматривается распределение мощностей не между станциями, а между отдельными агрегатами» [5, с.66]. Таким образом, предложенный алгоритм с некоторыми корректировками может быть использован и для оптимизации работы турбоустановки на электростанции локально.

Вопросы оптимизации в энергетике в СССР возникла при реализации плана и преимущественно относились к поиску наивыгоднейшего распределения тепловой и электрической нагрузки между электростанциями. В своих работах Веников В.А. и Горушкин В.И. выделяют такие методы оптимизации [5], как:

1. прямые методы оптимизации (методы, не требующие представления значений целевых функций в явном виде),

2. метод Лагранжа (итерационный метод),

3. градиентный метод (метод, позволяющий найти минимум функции с использованием вектора частных производных, показывающего направление роста функции).

Также большое число оптимизационных алгоритмов, направленных на поиск глобального минимума/максимума целевой функции, было разработано в последнее время. К ним можно отнести:

1. генетический алгоритм;

2. метод динамического программирования;

3. метод Белмана.

Генетический алгоритм является адаптацией эволюционной теории Ч. Дарвина в двоичной кодировке с оценкой пригодности популяций и последующими мутациями для достижения желаемого результата.

Особенность метода динамического программирования заключается в разбиении задачи на шаги с последующим постепенным поиском оптимума целевой функции. Метод Белмана также является динамическим методом с использованием одноименного уравнения:

$$\frac{\max}{u \in U} \left[\frac{\partial \omega(t, x)}{\partial t} f(t, x, u) - g(t, x, u) \right] = 0,$$

где u – вектор-функция управления из пространства управления U ,
 t – время, x – вектор-функция состояния системы.

В исследованиях зарубежных ученых [6] также рассматриваются такие современные методы, как:

1. оптимизация с использованием нейронных сетей;

2. поиск «с запретами» (Tabu Search);

3. оптимизация по рою частиц.

Нейросетевая оптимизация преобразует решение задачи оптимизации в точку равновесия (или равновесное состояние) нелинейной динамической системы и преобразует критерий оптимальности в энергетические функции для динамических систем. Благодаря своей параллельной вычислительной структуре и динамической эволюции такой подход превосходит традиционные методы оптимизации [6].

Алгоритм поиска «с запретами» в основном используется для решения задач комбинаторной оптимизации. Этот метод итеративного поиска, который использует гибкую память. Этот подход позволяет эффективно обходить локальные минимумы и исследовать области, выходящие за пределы локального минимума [6].

Оптимизация по рою частиц – это метод анализа роев, основанный на социальной динамике и коллективном поведении, наблюдаемом в организованных группах. Алгоритм использует популяцию индивидуумов для исследования перспективных областей пространства поиска. В этом контексте популяция называется роем, а отдельные особи – частицам [6].

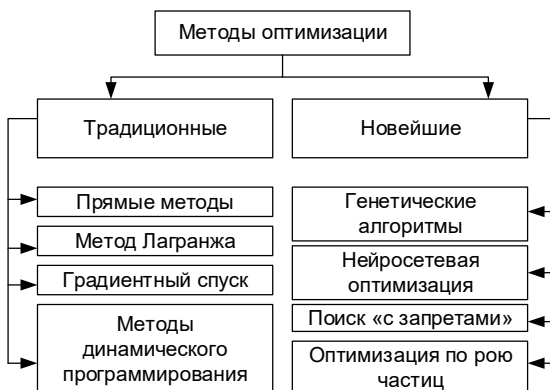


Рис 1. Основные методы оптимизации

Анализ полученных результатов.

В ходе исследования определено восемь основных методов оптимизации (рис. 1), использующихся на сегодняшний день. Наиболее перспективными для целей оптимизации турбоустановок с использованием моделей турбоустановок, разработанных в ИГЭУ [3, 4], являются генетический алгоритм и нейросетевая оптимизация за счет того, что они обладают высокой скоростью вычисления (важный аспект в случае внедрения программных комплексов в режиме реальной эксплуатации) и исключают попадание функции в локальные минимумы/максимумы.

Литература

1. Веников, В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В.А. Веников, В.Г. Журавле, Г.А. Филиппова. М.: Энергоиздат, 1981 г. 464 с.
2. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 4 октября 2022 г. №1070 Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации и о внесении изменений в приказы Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. № 757, от 12 июля 2018 г. № 548.
3. Горбунов, В.А. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению турбопитательными насосами Калининской АЭС / В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева, П.А. Минеев // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. Обнинск, 2024. №3. С.125-140.
4. Патент № 2025617497 Россия, Программа для определения показателей эффективности паротурбинной установки К-1000-60/3000 : заявл. 13.03.2025 : опубл. 26.03.2025 / П.А. Минеев, В.А. Горбунов.
5. Веников, В.А. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов / В.А. Веников, В.И. Горушкин, И.М. Маркович и др. // Высшая школа. Москва, 1973. 320 с.
6. Jizhong Z. Optimization of Power System operation. USA, 2009. 603 p.

УДК 620.9: 658.264: 697.43

А.Е. БАРОЧКИН, д.т.н., доцент
Н.Т. МАНИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет,
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: manin.nick-man@yandex.ru

Техническое состояние тепловых сетей

Аннотация. Статья посвящена инструментальному исследованию и сборе статистики по повреждаемости квартальных тепловых сетей в т.ч. котельных в пределах города Иваново Ивановской обл.

Ключевые слова: тепловые сети, повреждения, исследование шурфовок труб.

A.E. BAROCHKIN, PhD,
N.T. MANIN, student

Ivanovo State Power Engineering University
53003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: manin.nick-man@yandex.ru

Technical condition of heating networks

Abstract. The article is dedicated to an instrumental study and collection of statistics on damage to quarterly heating networks, including boiler houses, in the city of Ivanovo, Ivanovo region..

Key words: heating networks, damages, investigation of pipe pits.

В целях комплексного определения основных технико-экономических показателей работы тепловых сетей в межсезонный, летний и зимний период определена проведен комплексный анализ путём исследования

показаний приборов учета и результатов методов исследования физического износа – путём шурфования.

Объект исследования – городские тепловые сети. Располагаемые тепловые сети – магистральные условного диаметра 316мм и протяжённостью 41 713,4м, квартальные условного диаметра 108мм и длиной 615 793,4м, из которых 586 711,3м труб отопления однострунного исполнения и 29 082,1м горячего водоснабжения. В итоговом значении - 657 506,8м для всей теплосети в однострунном исполнении.

Средний возраст тепловых сетей на 2025 год – 46 лет, что выше нормативного срока службы в 30 лет. Так, 80% длины тепловой сети смонтировано до 1980. Это отражается на повреждаемости как в процессе эксплуатации, так и во время гидроиспытаний. Динамика оценивается линейной и возрастающей с 2019 года по 2023 г (приведен в таблице). Особенно активно наблюдается в некоторых районах города с высоким уровнем грунтовых вод (например, в Московском микрорайоне).

На рис.1 изображена статистика повреждаемости по источникам с 2019г. до 2023г. Стоит отметить, что существует ряд источников, на которых повреждений не наблюдалось вовсе. На большинстве видно положительную динамику в сторону увеличения повреждаемости с каждым годом. Это увеличение зависит от количества, которое было замечено в начале наблюдения. Стоит отметить, что аварии во время регламентных гидроиспытаний не отмечены на диаграмме. Это значит, что ремонтные работы в межсезонный период выполнены по регламенту.



Рис. 1. Диаграмма аварий в отопительный сезон на тепловых сетях, относящихся к источникам теплоснабжения

Табл. 1 отражает соотношение аварий при гидроиспытаниях к авариям во время работы в отопительный период, которые в том числе растут линейно относительно всего периода наблюдений.

Таблица 1. **Сводные данные по повреждениям на тепловых сетях за 2019-2023 годы**

Год	Количество отказов в тепловых сетях в отопительный период	Количество отказов в тепловых сетях в межотопительный период без учета ГИ	Количество отказов в тепловых сетях в период ГИ	Количество отказов в тепловых сетях за год
2019	193	11	233	437
2020	154	1	236	391
2021	221	8	162	391
2022	236	2	217	455
2023	318	10	246	574

Вывод. С каждым годом аварийность увеличивается. Существуют сети, на которых не случилось аварий в рассмотренный период. Общая тенденция объясняется тем, что нормативный срок службы влияет на аварийность. Разработан план по системной и последовательной реконструкции тепловой сети для повышения надёжности и качества теплоснабжения. Продлению срока эксплуатации такие сети не подлежат.

Литература

1. СП 124.13330.2012 Свод правил. Тепловые сети.
2. Постановление Правительства РФ от 22.02.2012 N 154 «О требованиях к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения».
3. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

УДК 621.928

С.И. ШУВАЛОВ, д.т.н.,
А.А. ВЕРЕНИН, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
E-mail: ShuvalovS@rambler.ru

Влияние конструктивных и режимных параметров на эффективность разделения в центробежных классификаторах с плоской зоной

Аннотация. В работе приводится оценка параметра эффективности классификации при расчете кривой разделения по формуле Плитта в зависимости от

относительной высоты центробежной зоны разделения, диаметра классификатора и массовой концентрации пыли в зоне разделения.

Ключевые слова: классификатор, центробежная зона, эффективность разделения, массовая концентрация пыли.

S.I. SHUVALOV, Doctor of Sciences,
A.A. VERENIN, Postgraduate.

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34.
E-mail: ShuvalovS@rambler.ru

Influence of design and mode parameters on separation efficiency in centrifugal classifiers with a flat zone

Abstract. The paper provides an estimate of the classification efficiency parameter in the calculation of the separation curve according to the formula of Platt, depending on the relative height of the centrifugal separation zone, the diameter of the classifier and the mass concentration of dust in the separation zone.

Key words: classifier, centrifugal zone, separation efficiency, dust mass concentration.

Процесс классификации частиц по размерам определяется балансовыми соотношениями между входящим в классификатор потоком частиц различной крупности (исходным продуктом) и потоками преимущественно более мелких частиц (мелкий продукт разделения) и преимущественно более крупных частиц (крупный продукт разделения). Так как по своей сущности разделение частиц по размерам является случайным процессом, то балансовые соотношения должны быть дополнены указанием вероятности попадания частиц определенного размера δ в мелкий или крупный продукты разделения в виде статистической функции распределения. Применительно к процессу классификации функция распределения $F(\delta) = \varphi_\delta(\delta)$ называется кривой парциальных выносов, кривой парциальных осаджений или кривой разделения Тромпа. Вероятность попадания частицы размером δ в тот или иной продукт зависит от конструкции классификатора и режима его работы и рассчитывается по дисперсному составу продуктов разделения [1,2].

Для прогнозирования работы классификационной системы необходимо указать конкретные значения кривой разделения, для чего желательно иметь аналитическое выражение кривой. В работе [3] показано, что для различных типов классификаторов наилучшую аппроксимизацию экспериментальных данных обеспечивает формула Плитта [4]:

$$\varphi_\delta(\delta) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\delta}{\delta_{\text{гр}}}\right)^{ks}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{гр}}$ – граничный размер разделения, соответствующий размеру частиц, для которых вероятность попадания в мелкий и крупный про-

дукты одинакова и равна $\varphi_{\delta}(\delta_{гр}) = 0,5$; ks – параметр распределения, зависящий от конструкции классификатора и режима его работы.

Параметр ks определяет наклон кривой разделения при $\delta = \delta_{гр}$

$$\frac{d\varphi_{\delta}(\delta_{гр})}{d\delta} = -\frac{ks}{4} \quad (2)$$

и тем самым отражает эффективность процесса классификации: при большем значении ks кривая разделения обеспечивает более полное выделение кондиционных частиц в соответствующие продукты разделения и меньшее загрязнение их некондиционными частицами. В этой связи параметр ks может рассматриваться в качестве показателя эффективности конструкции классификатора.

Экспериментальные исследования моделей классификаторов и промышленных аппаратов показали, что для центробежного классификатора с плоско-противоточной зоной разделения, общий вид которого

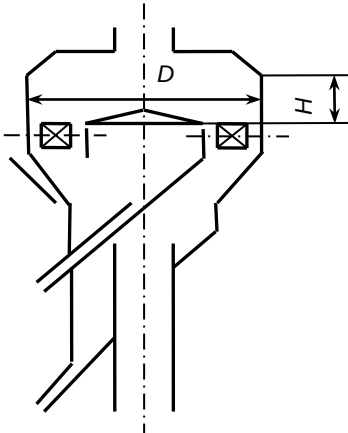


Рис.1. Конструкция классификатора с плоско-противоточной зоной разделения

приведен на рис.1, эффективность разделения (параметр ks) зависит от нескольких факторов, главными из которых являются относительная высота гоны разделения $\frac{H}{D}$ и концентрация пыли в зоне разделения μ .

Максимальная эффективность данной конструкции классификатора, соответствующая параметру $ks = 2,7$ [5], сохраняется в достаточно широких границах. Экспериментальные исследования, выполненные на моделях сепараторов диаметрами 400 и 800 мм Д.В. Тупицыным [6], показали, что в диапазоне $\frac{H}{D} = 0,25 - 0,45$ эффективность

разделения может быть обеспечена на уровне не ниже $ks = 2,7$. При увеличении относительной высоты центробежной зоны разделения вследствие отклонения траекторий газа и частиц от противоточной схемы параметр ks снижается и в диапазоне $\frac{H}{D} = 0,45 - 1,0$ может быть аппроксимирован линейной зависимостью

$$ks = 3,6 - 2 \cdot \frac{H}{D}. \quad (3)$$

Снижение эффективности разделения вследствие рикошета частиц от верхней крышки классификатора при уменьшении высоты зоны

близко к линейной зависимости, и в диапазоне $\frac{H}{D} = 0,10 - 0,25$ может быть аппроксимировано формулой

$$ks = -0,425 + 25 \cdot \frac{H}{D} - 50 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^2 \quad (4)$$

Увеличение концентрации пыли в зоне разделения во всех случаях приводит к снижению эффективности разделения, но при $\mu < \mu_{кр} = 0,56 + 0,1 \cdot D$ этим влиянием можно пренебречь.

Увеличение концентрации пыли выше критического значения приводит к снижению параметра ks приблизительно в следующей зависимости

$$ks = ks_0 \cdot \frac{\mu_{кр}}{\mu}. \quad (5)$$

Здесь величина ks_0 оценивается по формулам (3) и (4) в соответствии с относительной высотой центробежной зоны разделения.

Приведенные зависимости рекомендуются использовать при расчете процесса разделения в центробежных классификаторах с помощью кривой разделения, представленной в виде (1).

Литература

1. Ушаков С.Г., Зверев Н.И. Инерционная сепарация пыли. М.: Энергия, 1974. 168 с.
2. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. 160 с.
3. Шувалов С.И., Новосельцева С.С., Жуков В.П. Обоснование выбора зависимости, используемой для аппроксимации кривой разделения Тромпа// Вестник ИГЭУ, 2018, №6, с.15-23.
4. Plitt L.R. The analysis of solid-solid separations in classifiers// The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 1971, № 4, p.42-47.
5. Шувалов С.И. Получение тонкодисперсных порошков в системах пылеприготовления с аэродинамическими классификаторами// Химическая промышленность, 1992, т.69, №8, с.59-63.
6. Тупицын Д.В. Оптимизация аэродинамического режима процесса вихревой классификации при тонком фракционировании порошков. Дисс. ... канд. техн. наук. Иваново, ИЗИ, 1985. 161 с.

УДК 371.693

А.Л. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., доцент
Е.Ю. ГРИГОРЬЕВ к.т.н., доцент
А.И. КИСЕЛЕВ к.т.н., доцент
В.А. БУДАНОВ к.т.н., доцент
А.П. ШЕСТАКОВ студент

Ивановский государственный энергетический университет
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34
E-mail: pgt.tren@ispu.ru

Тренажерные системы подготовки персонала тепловых цехов ТЭС

Аннотация. В работе приведены основополагающие положения разрабатываемых тренажеров котло-турбинных цехов тепловых электрических станций.

Ключевые слова: тренажер, математическая модель, котло-турбинный цех, тренировка.

A.L. VINOGRADOV, Ph.D.,
E.Yu. GRIGOREV, Ph.D.,
A.I. KISELEV, Ph.D.,
V.A. BUDANOV, Ph.D.,
A.P. SHESTAKOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
53003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: pgt.tren@ispu.ru

Simulator systems for training personnel of thermal power plant heating shops

Annotation. The paper presents the fundamental principles of the developed simulators for boiler-turbine shops of thermal power plants.

Key words: simulator, mathematical model, boiler-turbine shop, training.

Учебно-научным центром тренажеров в теплоэнергетике ИГЭУ (УНЦТЭ) разработан и внедрён [1] целый ряд тренажёров для энергоблоков различных типов и мощности, сжигающих все виды топлива и имеющих в своём составе самое разное оборудование.

В настоящий момент вопрос о необходимости непрерывной тренажерной подготовки персонала энергопредприятий не вызывает никаких споров.

Доля аварий и нарушений по вине персонала достигает 15%, а некоторые эксперты называют 40% аварий по вине операторов как реальный показатель для энергоблоков 200-1200 МВт.

Тренажерная подготовка открывает возможности разыгрывания на математических моделях, положенных в основу тренажера, самых разнообразных ситуаций

Разработанные тренажеры УНЦТЭ отвечают ряду очень жестких требований:

Комплексность - возможность подготовки персонала в полном объеме его профессиональной деятельности как индивидуально, так и в составе смены.

Вариативность – возможность изменения инструктором количество рабочих мест тренажера, так и изменение всей конфигурации тренажера.

Мобильность - ПО тренажера легко устанавливается обслуживающим персоналом без помощи Разработчика в неограниченном количестве копий (внутри предприятия) для обеспечения его пропускной способности и доступности.

Контролируемость – тренажер включает в свой состав развитое автоматизированное рабочее место (АРМ) инструктора, позволяющее планировать и управлять процессом подготовки (например, вводить отказы оборудования) и способы оценивания результатов тренировок.

Адекватность - по составу, динамике, виду и функциям интерфейса, технологическим нюансам и т.д. тренажеры максимально приближены к оборудованию реального оборудования-прототипа и условиям управления им.

Математические модели, используемые в тренажерах, соответствуют таким требованиям как [2]:

Полнота – математическая модель охватывает все оборудование энергопредприятия, от работы которого зависит качество ведения режима.

Всережимность - математическая модель позволяет обучаемому работать во всём диапазоне нагрузок и режимов реального оборудования-прототипа как в условиях нормальной эксплуатации, так и в нештатных и аварийных ситуациях.

Неразрывность - способность модели обеспечить непрерывную работу тренажера во всем диапазоне нагрузок и при любых воздействиях в режиме «свободного полёта» без каких-либо перескакиваний, искусственных переходов, перезагрузки тренажера.

Точность - должна быть такой, при которой тренажер можно использовать для проведения на нем исследований работы оборудования и отладки алгоритмов управления в различных режимах (в том числе АСУ, системы регулирования, контроллеров).

Адекватность - реакция модели на все возможные события должна быть аналогична реакции энергоблока-прототипа.

Масштабируемость - должна предоставлять возможность работы как в реальном времени, так и позволять ускорять/замедлять процессы, а также их остановки (заморозки).

В состав тренажера входит развитый **АРМ-инструктора** (автоматизированное рабочее место инструктора).

АРМ-инструктора [3] обеспечивает возможность:

- оперативного контроля за ходом тренировки и, при необходимости, вмешательства в процесс;

- администрирования контингента обучаемых, инструкторов, ответственных лиц, состава, сроков тренировок, индивидуальных заданий, формы и состава протокола и т.д.;

- осуществлять изменение масштаба времени работы модели.

На этапе внедрения тренажерного комплекса на предприятии проходит целый ряд испытаний с контролем выполнения работ эксплуатационным персоналом, что дает полное представление о разрабатываемом продукте и дает возможность внести корректировки на более ранних стадиях.

- **Автономные испытания (предварительные).** Осуществляется проверка соответствия разрабатываемого продукта техническому заданию в части валидации схем, объем моделирования, качество отображаемой информации, проверка результатов расчета параметров на различных режимах.

- **Опытная эксплуатация.** Согласно программе осуществляется проверка работоспособности тренажерного комплекса, в частности мат. модели на нестационарных режимах работы оборудования (разгрузка, останов, пусковые операции и т.д.). Проверяется возможность ввода отказов оборудования, корректность работы системы оценки.

- **Приемо-сдаточные испытания** по сути являются финальными испытаниями где окончательно проверяется функциональность тренажера, корректность мат.модели, разработанные сценарии пусковых и противоаварийных тренировок.

Таким образом, предприятие получает возможность не просто контролировать ход создания тренажерного комплекса, но и участвовать в его разработке напрямую внося корректировки на всех стадиях выполнения проекта.

Литература

1. Взгляд на состояние современного отечественного тренажеростроения на основе опыта разработки / А.Л. Виноградов, А.И. Киселев // Вопросы разработки многоцелевых тренажеров: сборник докладов научно-технической конференции, 22 апреля 2021 г., г. Москва. М.: ОАО «ВТИ». 2021. С.48 – 54

2. Разработка математических моделей при создании компьютерных тренажеров для эксплуатационного персонала газотурбинных установок / А.Л. Виноградов, А.И. Киселев, А.А. Краснов // Состояние и перспективы развития электротехнологии. Международная научно-техническая конференция (XVII Бенардосовские чтения), 29 мая 2013 г., г. Иваново: Материалы конференции. т.2. Иваново: ООО "ПресСто". 2013. С.51–52

3. Автоматизированное рабочее место инструктора полномасштабного компьютерного тренажера / А.Л. Виноградов, В.А. Буданов, Р.Ю. Шлёнкин, К.Н. Лукьянова // Вопросы разработки многоцелевых тренажеров: сборник докладов научно-технической конференции, 22 апреля 2021 г., г. Москва. М.: ОАО «ВТИ». 2021. С.35–41

УДК 621.438

Е.Ю. ГРИГОРЬЕВ, к.т.н., доцент
И.Р. НЯМБА, аспирант.

Ивановский государственный энергетический университет
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34, оф Д-105
E-mail: pgt.tren@ispu.ru

Оценка потенциала применения энергосберегающих технологий в дожимных компрессорах в составе энергоблока ПГУ

Аннотация. В работе дана технико-экономическая оценка применения адсорбционно холодильных установок при применении их для повышения энергоэффективности дожимных компрессоров в составе блока ПГУ.

Ключевые слова: дожимной компрессор, газотурбинная установка, парогазовая установка, сжатие газа

E.Yu. GRIGOREV, Ph.D.,
I.R. NYAMBA, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, st. Rabfakovskaya, 34, office B-105
E-mail: pgt.tren@ispu.ru

Evaluation of the potential for using energy-saving technologies in booster compressors as part of a combined cycle power unit

Annotation. The paper provides a technical and economic assessment of the use of adsorption refrigeration units when used to improve the energy efficiency of booster compressors as part of a combined cycle gas turbine unit.

Key words: booster compressor, gas turbine unit, combined cycle plant, gas compression

В ряде случаев при строительстве энергоблоков парогазовых установок давлений в существующие магистральные газопроводы природного газа бывает недостаточно для организации подачи топлива в газотурбинную установку. В этом случае применяют дожимные компрессорные установки, которые естественно могут значительно снижать коэффициент полезного действия блока ПГУ с учетом затраты на собственные нужды [1].

Оценочно для энергоблока ПГУ-325 на номинальной мощности 325 МВт с двумя газотурбинными установками на основе ГТД-110М (рис. 1) производства ПАО «НПО «Сатурн» мощность ДКС при повышении давления газа с давления в магистрали 3 бар, до 15 бар (требуемого для надежной работы камеры сгорания) составляет 4,2 МВт. Что составляет 1,2 % от мощности всего энергоблока.

В термодинамике широко известен метод организации ступенчатого сжатия в компрессорах с промежуточным охлаждением рабочего тела. Увеличение ступеней сжатия с промежуточным охлаждением ведет к

приближению процесса сжатия газа к изотермическому, по сути процессу с минимально возможной работой сжатия [2].

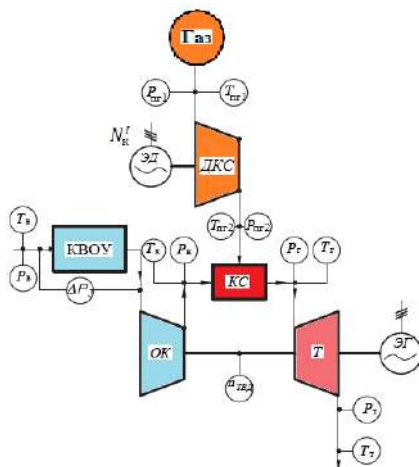


Рис. 1. Схема простой ГТУ с одноступенчатым сжатием природного газа в ДКС перед камерой сгорания

В соответствии с рекомендациями разделительное давление для двухступенчатого сжатия выбирают на уровне среднего давления между начальным и конечным при сжатии. В условиях рассматриваемой задачи это 9 бар.

При двухступенчатом сжатии с промежуточным охлаждением до начальной температуры оценочно потребляемая мощность ДКС составляет 3,7 МВт, что дает выигрыш в 400 кВт по сравнению со схемой ДКС без промежуточного охлаждения, то есть потребляемая мощность ДКС снижается примерно на 10%.

Второй важной задачей является организация отвода теплоты при сжатии, выбор схемы и оценка технико-экономического эффекта

Применительно к тепловой схеме ПГУ-325 были рассмотрены 2 метода отвода теплоты при промежуточном сжатии (рис. 2):

1. Использование Адсорбционно-холодильной машины (АБХМ), которые показывают положительный технико-экономический эффект при применении их для охлаждения воздуха в КВОУ ГТУ (рис. 2.а);

2. Использование технической воды для охлаждения в теплообменнике охлаждения (ТО), наиболее простой способ организации теплосъема во вспомогательном оборудовании энергоблока (рис 2.б).

Балансовые расчеты показывают, что АБХМ потребляет значительную мощность (до 2,5 МВт) и не является энергетически эффективным методом снятия тепла, в отличие от, например, организации охлаждения воздуха в КВОУ ГТУ.

Оценка применения водяного теплообменника показывает, что при начальной температуре технической воды 25°C , потребляемая мощность насоса для обеспечения требуемого расхода технической воды не превышает 75 кВт. Таким образом применение схемы с промежуточным водяным теплообменником оказывается целесообразным.

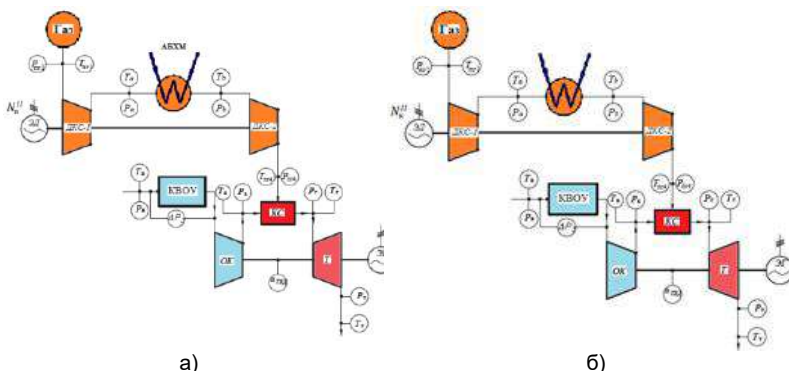


Рис. 2. Схема организации двухступенчатого сжатия природного газа в ДКС с промежуточным охлаждением: в а – АБХМ, б – ТО

Литература

1. Цанев, С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов; под ред. С.В. Цанева. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 584 с
2. Рабенко, Владимир Степанович. Термодинамические циклы газотурбинных установок [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.С. Рабенко; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». Электрон. данные. Иванов: Б.и., 2008

УДК 621.321

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент,
А.Ю. ЖОЛОБОВА, ассистент,
Н.В. БУШУЕВА, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Анализ потребности в химических реагентах для схем обессоливания воды на ТЭС и АЭС на базе установки обратного осмоса

Аннотация. Выполнен технологический расчет и анализ основных схем обессоливания воды на базе обратного осмоса в широком диапазоне изменения минерализации исходной воды, определена потребность в химических реагентах.

Ключевые слова: ТЭС, водоподготовка, установка обратного осмоса, технологический расчёт, потребность в реагентах

E.N. BUSHUEV, Doctor of Technical Sciences,
A.Yu. ZHOLOBOVA, assistant
N.V. BUSHUEVA, senior lecturer

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Analysis of the need for chemical reagents for water desalination schemes at thermal and nuclear power plants based on a reverse osmosis unit

Annotation. A technological calculation and analysis of the main schemes for water desalination based on reverse osmosis in a wide range of changes in the mineralization of the source water was carried out, and the need for chemical reagents was determined.

Key words: Thermal power plant, water treatment, reverse osmosis plant, process calculation, need for reagents

Обессоленная вода для подпитки основного контура ТЭС и АЭС может быть получена с использованием различных технологий водоподготовки и схемных решений. Для выбора оптимальной схемы водоподготовительной установки (ВПУ) нужно иметь представление об уровнях значений показателей её работы для возможных к рассмотрению технологий обессоливания при различных исходных данных (качестве исходной воды и производительности установки).

Был выполнен расчет и анализ следующих перспективных схем ВПУ:

1) схемы обессоливания на базе установки обратного осмоса (УОО) с последующим дообессоливанием на Н-ОН-ступени и традиционной предочисткой (осветлители и насыпные механические фильтры);

2) схемы обессоливания на базе УОО и ультрафильтрации с дообессоливанием на Н-ОН-фильтрах;

3) схемы обессоливания на основе интегрированных мембранных технологий (установок ультрафильтрации и двухступенчатого обратного осмоса);

4) схемы химического обессоливания по противоточной технологии АПКОРЕ с двухслойным ОН-анионитным фильтром;

5) схемы термического обессоливания на базе испарителей мгновенного вскипания (ИМВ) с предварительной обработкой на карбоксильном Н-катионитном фильтре.

Первые из рассмотренных схем являются наиболее широко используемыми техническими решениями на основе УОО [1]. Последние две схемы являются наиболее перспективными схемами для технологий химического и термического обессоливания [2].

Для численного анализа выделенных схем обессоливания использовалась компьютерная программа «ПРОЕКТ ВПУ» [2, 3], которая позволяет проводить полный технологический расчет ВПУ, определять основные технологические, экологические и технико-экономические показатели. Был выполнен многовариантный расчет в широком диапазоне изменения минерализации исходных вод по анионам сильных кислот ($[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-]$) от 0,35 до 15 мг-экв/дм³. В качестве базовой воды была принята вода реки Урал, а остальные воды получены путём уменьшения (увеличения) пропорционально всех показателей качества. Расчет проводился при одинаковой производительности ВПУ, которая составляла 350 м³/ч.

Необходимые исходные данные для технологического расчета были взяты из нормативной и справочной литературы.

В рассмотренных схемах обессоливания используются различные химические реагенты и с различным расходом. Без учёта специфики используемых при водоподготовке химических реагентов, показателем потребности во вспомогательных ресурсах был принят суммарный суточный расход 100%-ых реагентов.

На рис. 1 представлена полученная расчетная зависимость суммарной среднесуточной потребности в 100%-х химических реагентах от схемы обессоливания и минерализации исходной воды. Анализ результатов показывает, что для всех рассмотренных схем суммарная потребность в химических реагентах увеличивается с повышением минерализации обрабатываемой воды.

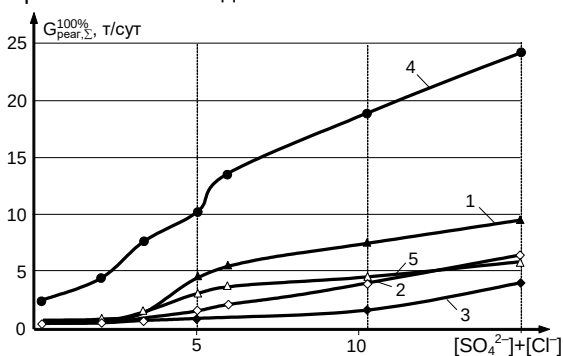


Рис. 1. Зависимость суммарной среднесуточной потребности в 100%-х реагентах от схемы обессоливания и минерализации исходной воды ($[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-]$, мг-экв/дм³):

1–5 – нумерация схем в соответствии с принятой нумерацией

Схемы обессоливания на основе УОО имеют существенные преимущества по сравнению с технологиями химического обессоливания, и характеризуются наименьшей потребностью в реагентах, в связи с тем, что

основная часть ионов при водоподготовке удаляется малореагентным методом. Эффект по снижению расхода реагентов сильно зависит от используемой схемы подготовки исходной воды перед УОО для предотвращения образования осадков на поверхности мембран и технологии дообессоливания пермеата. Хотя в таких схемах используется большой набор реагентов (коагулянт, гипохлорит натрия, метабисульфит натрия и т.д.), но расход этих реагентов небольшой, т.к. большинство реагентов дозируются в обрабатываемую воду с небольшой дозой.

Среди рассмотренных схем наименьшей потребностью в химических реагентах для обессоливания воды обладает схема интегрированных мембранных технологий (схема №3). Схема обессоливания на базе УОО с использованием на стадии предочистки осветлителей, характеризуется значительным расходом извести, которая используется для умягчения и снижения общей щёлочности воды перед УОО.

Схема термического обессоливания, содержащая ИМВ (схема №5) близка по количеству используемых реагентов к схемам на базе УОО.

Вывод: схемы обессоливания на базу УОО характеризуются низким расходом используемых химических реагентов, количеством сбрасываемых солей со сточными водами, однако эти схемы требуют высокие эксплуатационные и капитальные затраты, большие объёмы воды на собственные нужды.

Литература

1. Жадан А.В. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / А.В. Жадан, Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина // Новости теплоснабжения. 2013. № 7. С. 8-14.
2. Ларин, Б.М. Анализ существующих технологий водоподготовки на тепловых электростанциях / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, М.Ю. Опарин, Н.В. Бушуева // Энергосбережение и водоподготовка. М.: 2002. № 2. С. 11-19.
3. Бушуев, Е.Н. Использование компьютерной программы «ПРОЕКТ ВПУ» для проведения технологического расчета и анализа технологий обессоливания воды на ТЭС и АЭС / Е.Н. Бушуев Е.Н., А.Ю. Жолобова // Вестник ИГЭУ. 2024. №. 4. С. 5-14.

УДК 621.321

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент,
А.Ю. ЖОЛОбОВА, ассистент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Анализ основных технологий подготовки исходной воды для установки обратного осмоса при водоподготовке на ТЭС

Аннотация. Выполнен анализ наиболее часто используемых при водоподготовке на ТЭС и АЭС технологий подготовки исходной воды для установки обратного осмоса с целью предотвращения образования на поверхности мембран

минеральных осадков. Проведено их сравнение по используемым при этом ресурсам.

Ключевые слова: ТЭС, водоподготовка, установка обратного осмоса, технологический расчёт, предотвращение образование осадков

E.N. BUSHUEV, Doctor of Technical Sciences,
A.Yu. ZHOLOBOVA, assistant

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Analysis of the main technologies for preparing source water for a reverse osmosis unit for water treatment at thermal power plants

Annotation. The analysis of the most frequently used technologies for preparing source water for a reverse osmosis unit in water treatment at thermal power plants and nuclear power plants was carried out in order to prevent the formation of mineral deposits on the membrane surface. They were compared by the resources used.

Key words: Thermal power plant, water treatment, reverse osmosis plant, process calculation, prevention of sediment formation

При проектировании водоподготовительных установок (ВПУ) на ТЭС и АЭС в схемах обработки воды предусматривают ступени очистки на базе мембранных методов и, прежде всего обратного осмоса [1]. Одним из важных вопросов, решаемых при проектировании и эксплуатации установки обратного осмоса (УОО) является выбор рациональной технологии обработки исходной воды для предотвращения образования на поверхности мембраны минеральных осадков (CaCO_3 , CaSO_4 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и SiO_2).

Проведённый анализ технической литературы позволил выявить следующие основные технологии обработки исходной воды перед УОО с целью предотвращения образования осадков жёсткости [2]:

- 1) подкисление серной кислотой;
- 2) добавление антискалянта;
- 3) умягчение на прямоточном Na-катионитном фильтре;
- 4) умягчение на противоточном Na-катионитном фильтре;
- 5) умягчение на H-карбоксильном фильтре;
- 6) умягчение части исходной воды перед УОО на противоточном Na-катионитном фильтре;
- 7) умягчение части исходной воды перед УОО на H-карбоксильном фильтре.

С использованием компьютерной программы «ПРОЕКТ ВПУ» [1] был выполнен технологический расчёт ВПУ с использованием указанных технологий подготовки исходной воды перед УОО. В ходе расчета определялись технологические, экологические и технико-экономические показатели её работы.

На показатели работы ВПУ на базе УОО значительно влияют схемы предочистки исходной воды и дообессоливания пермеата. Расчёт проводился для схемы водоподготовки, которая включает установки ультраfiltrации и обратного осмоса, с дообессоливанием на Н-ОН-ионитной ступени работающей по технологии АПКОРЕ.

Номинальная производительность рассчитываемых схем ВПУ была принята равной $200 \text{ м}^3/\text{ч}$. В связи с тем, что рассматриваемые мероприятия оказывают влияние на различные составляющие образования осадка CaCO_3 , расчет выполнялся для двух природных вод. В качестве первой воды была принята вода реки Вятка, которая характеризуется преобладанием общей щелочности над общей жесткостью. Вторая вода – вода реки Урал, в которой наоборот, общая жесткость превышает общую щелочность.

Расчёт проводился при следующих значениях гидравлических КПД УОО: 55, 70, 75 и 80%. Низкий гидравлический КПД (55%) обеспечивался однокаскадной схемой УОО без подмеса, более высокие значения показателя (70, 75 и 80%) – за счет применения двухкаскадной схемы.

На рис. 1 представлена расчётная зависимость удельных затрат на ресурсы (химические реагенты, речную воду, на тепловую энергию) [3] при обессоливании природной воды от гидравлического КПД УОО при различных видах предварительной обработки воды перед УОО. Наибольшую долю затрат даёт тепловая составляющая, связанная с количеством теплоты сбрасываемых со сточными водами.

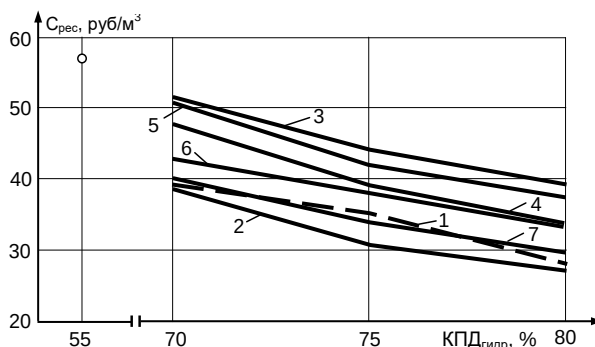


Рис. 1. Зависимость удельных затрат на ресурсы требуемые на обработку исходной воды перед УОО от вида обработки и степени выхода пермеата (КПД_{гидр}):

1–7 – номера схем подготовки в соответствии с принятой нумерацией

Анализ результатов численного исследования показывает, что при низком гидравлическом КПД УОО без реагентной обработки работа ВПУ является более затратной, чем при работе УОО с более высоким выходом пермеата при обработке исходной воды. С повышением гид-

равлического КПД хотя и для ряда рассматриваемых вариантов увеличивалась потребность в реагентах, но суммарные затраты на ресурсы уменьшаются.

Реагентные методы обработки воды характеризуются меньшими потребностями в ресурсах по сравнению с методами, основанными на ионном обмене. Наименьшей потребностью в ресурсах характеризуется ВПУ при обработке исходной воды перед УОО антискалянтом. Однако этот метод подготовки воды имеет ряд ограничений по применению [2].

Прямоточное Na-катионирование характеризуется наибольшей потребностью в реагентах. При этом ионный обмен наиболее надёжный способ предотвращения образования отложений соединений катионов жёсткости на поверхности мембраны. В целях снижения расхода реагентов на регенерацию следует использовать противоточные технологии ионного обмена.

Схемы с частичной обработкой исходной воды на противоточных Na-катионитных и H-карбоксильных фильтрах перед УОО имеют преимущества над схемами, где весь водный поток подвергается ионированию. При этом величина эффекта зависит от доли расхода воды, подаваемой помимо фильтров. Поэтому, можно рекомендовать, при наличии такой возможности, подвергать обработке на ионитном фильтре только часть исходной воды перед УОО.

Литература

1. Бушуев, Е.Н. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, А.В. Жадан // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. Вып. 1. С. 8–14.
2. Бушуев Е.Н. Технология обессоливания воды на ТЭС на основе мембранных методов: Учеб. пособие / Е.Н. Бушуев, Н.В. Бушуева // ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2017. 144 с.
3. Бушуев, Е.Н. Использование компьютерной программы «ПРОЕКТ ВПУ» для проведения технологического расчета и анализа технологий обессоливания воды на ТЭС и АЭС / Е.Н. Бушуев Е.Н., А.Ю. Жолобова // Вестник ИГЭУ. 2024. №. 4. С. 5-14.

УДК 621.311

Е.А. КАРПЫЧЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: karpuchev3108@bk.ru

Сравнение установок предварительной очистки воды с развитой системой обезжелезивания шлама

Аннотация. Проведена технологическая оценка работы установок предварительной очистки воды на базе метода коагуляции с использованием принципов

ально различного оборудования. Выполнено сравнение экономических и удельных технологических параметров работы установок предварительной очистки воды с развитой системой обезвоживания шлама.

Ключевые слова: коагуляция, шламовые воды, декантация, кек, технико-экономические параметры.

E.A. KARPUCHEV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: karpuchev3108@bk.ru

Comparison of water pre-treatment plants with an advanced system sludge dewatering

Abstract. A technological assessment of the operation of water pretreatment plants based on the coagulation method using fundamentally different equipment has been carried out. A comparison of the economic and specific technological parameters of the operation of water pretreatment plants with a developed sludge dewatering system has been performed.

Key words: coagulation, sludge waters, decantation, cake, technical and economic parameters.

Выполнено сравнение технико-экономических показателей водоподготовительных установок с низким коэффициентом воды на собственные нужды, предназначенных для производства осветленной воды.

Источником водоснабжения установки № 1 является река Кама. Обработка воды осуществляется путем коагуляции сульфатом алюминия с флокулянтom Praestol 2530TR в двух осветлителях Actiflo производительностью 750 м³/ч и осветление на четырех безнапорных каркасно-засыпных механических фильтрах производительностью 517 м³/ч.

Источником водоснабжения установки № 2 является река Яйва. Обработка воды осуществляется путем коагуляции полиоксихлоридом алюминия Аква-Аурат 30 с флокулянтom Praestol 650 TR на шести баках-отстойниках со встроенными тонкослойными сепараторами производительностью 55 м³/ч и осветления на шести напорных механических фильтрах производительностью 52,4 м³/ч.

Показатели качества исходной воды реки Кама и реки Яйва, а также требования к качеству фильтрованной воды приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 необходимо отметить, что обе установки работают в условиях отсутствия подогрева исходной воды, это накладывает отпечаток на скорость процесса коагуляции и интенсивность хлопьеобразования. В первом случае технологическая эффективность коагуляционной обработки воды достигается за счет низкой скорости подъемного движения воды в тонкослойном сепараторе – менее 0,46 м/ч, а во втором случае – за счет использования микропеска, являющегося центром образования твердой фазы при коагуляции и утяжелителем на этапе отстаивания воды в осветлителе Actiflo. Кроме того, вода р. Яйва

отличается повышенными значениями основных загрязнителей, таких как взвешенные вещества, окисляемость, массовая концентрация соединений железа (в пересчете на Fe), которые в течение года существенно изменяются.

Таблица 1. **Требования к качеству исходной и осветленной воды**

Показатель	Установка 1 (р. Кама)	Установка 2 (р. Яйва)
<i>Исходная вода</i>		
Массовая концентрация взвешенных веществ, мг/л	от 2,0 до 20,0	от 4,0 до 300,0
Окисляемость (ПО), мгО/л	от 5,3 до 10,6	менее 22,0
Щелочность, мг-экв/л	от 0,7 до 1,8	менее 4,0
Массовая концентрация соединений железа (в пересчете на Fe), мг/л	от 0,32 до 2,05	от 0,32 до 2,68
pH ₂₅	от 7,3 до 8,1	от 7,0 до 8,1
Температура, °С	от 1 до 20	от 1 до 20
Цветность, °Pt-Co	от 18,5 до 60,5	н/н
<i>Осветленная вода</i>		
Массовая концентрация взвешенных веществ, мг/л	менее 2,0	менее 20,0
Окисляемость (ПО), мгО/л	менее 5,0	менее 15,0
Щелочность, мг-экв/л	от 0,3 до 1,5	менее 4,0
Массовая концентрация соединений железа (в пересчете на Fe), мг/л	менее 0,3	менее 1,0
pH ₂₅	от 6,5 до 7,5	от 6,5 до 8,5
Цветность, °Pt-Co	менее 8,0	н/н

Существенно отличается и качество вырабатываемой осветленной воды, в первом случае – это целлюлозно-бумажная промышленность и пожарно-питьевое использование, во втором случае – производство минеральных удобрений.

Глубина переработки сточных вод на первом этапе обеспечивается за счет сбора и накопления шламовых вод в резервуарах. Шламовые воды установки № 1 осветляются в илоуплотнителе с использованием флокулянта, а на установке № 2 – после дополнительной реагентной обработки осветляются на флотаторах.

Общей особенностью схем является – глубокая переработка сгущенного шлама предочистки на декантерных центрифугах с использованием флокулянтов. В виде отходов образуется кек с влажностью не более 75 %, который затем может компактно утилизировать или использовать в сельском хозяйстве в качестве удобрения.

В табл. 2 приведены сравнительные данные работы двух установок, рассчитанные на максимальную производительность.

Следует отметить, что в рассматриваемых схемах удельный расход воды на собственные нужды существенно ниже, чем у классической пред-

варительной очистки (осветлитель со взвешенным слоем и механические фильтры) – (2,5 – 3,0) %. Особенно выгодно выделяется установка № 1, представленная более технологичными осветлителями Actiflo.

Таблица 2. **Сравнение технико-экономических параметров схем ВПУ**

Параметр	Установка 1	Установка 2
Производительность, м ³ /ч	1500	250
Часовой расход воды на с.н., м ³ /ч	3,450	2,215
Удельный расход воды на с.н., %	0,23	0,89
Удельный расход реагентов при максимальной производительности: кг/ч		
- натр едкий (технический)	58,35	-
- микропесок (фракция менее 150 мкм)	5,4	-
- натрия гипохлорит (раб. раств. 8 г/л)	1,98	0,066
- кислота серная (техническая)	39,75	-
- коагулянт (в пересчете на Al ₂ O ₃)	27,3 (СА)	1,66 (ПОХА)
- флокулянт гранулированный	1,142	0,423
Удельные затраты на реагенты, руб./м ³	6,48	1,66

Примечание: СА – сульфат алюминия; ПОХА – полиоксихлорида алюминия.

Что же касается экономических критериев, то более выгодным вариантом является установка № 2. Причиной этого является меньший перечень реагентов, применяемых на установках, в частности в отличие от Actiflo не используется дорогой микропесок, а в виду высокого щелочного резерва воды р. Яйва не требуются реагенты для подщелачивания/подкисления.

Вывод. В целом применение развернутых схем обезвоживания и утилизации шлама, на примере представленных установок, могут обеспечить ежегодную экономию воды химическим цехом от 5 781 руб./год до 56 764 руб./год с 1 м³ проектной или фактической производительности ВПУ по осветленной воде.

УДК 621.321

А.Б. ЛАРИН¹, д.т.н., профессор
Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор
К.В. ЗОТОВА², аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: yaandy_81@mail.ru ¹, ks.zotova@bk.ru ²

Изменение водородного показателя pH с ростом температуры в слабощелочной среде водного теплоносителя ТЭС

Аннотация. Питательная вода и конденсат пара котлов высокого давления, блоков СКД и котлов-утилизаторов блоков ПГУ представляют собой глубоко

обессоленную воду и имеет щелочную реакцию среды из-за добавления в контур щелочных агентов (чаще – аммиак). Показатель pH нормируется и строго поддерживается на оптимальном уровне. Однако, контроль pH производится в охлажденных пробах и нормируется значение, приведенное к 25°C. Но с ростом температуры (следовательно, и при охлаждении) изменяется диссоциация растворенных веществ и самой воды, что непосредственно влияет на молярную концентрацию ионов водорода. По этой причине, имея щелочное значение pH в охлажденной пробе конденсата пара, при фактической температуре насыщенного пара может идти кислотная коррозия из-за низкого значения водородного показателя. Для расчета pH при рабочих параметрах водного теплоносителя необходимо знать множество величин, в том числе константы диссоциации растворенных веществ. В работе получена зависимость изменения значений pH с ростом температуры в моно-растворе аммиака при условии бесконечного разбавления.

Ключевые слова: котельные установки, водно-химический режим, питательная вода, расчет значений pH, зависимость pH от температуры

A.B. LARIN¹, doctor of technical sciences, professor

B.M. LARIN, doctor of technical sciences, professor

K.V. ZOTOVA², postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: yaandy_81@mail.ru ¹, ks.zotova@bk.ru ²

Change of pH-value with increasing temperature in the slightly alkaline medium of the water coolant thermal power plant

Abstract. Feed water and steam condensate from high-pressure boilers, Super Critical Power Plants and waste-heat boiler of combined-cycle plant are highly demineralized water and have an alkaline reaction of the medium due to the addition of alkaline agents (more often ammonia) to the circuit. The pH value is normative and maintained at an optimal level. However, the pH is monitored in cooled samples and the value at temperature of 25°C is normative. But with increasing temperature of water coolant (and therefore with cooling it), the dissociation of solutes and water are changes, which directly affects the molar concentration of hydrogen ions. Thus, for cooled steam condensate sample at temperature 25 c the pH value is alkaline, but at operating temperature of saturated steam the pH value can be acid and acid corrosion may occur. In the article dependence of the change of pH values with increasing temperature in an ammonia mono-solution under the condition of infinite dilution is obtained.

Key words: boiler installations, water-chemical regime, feed water, calculation of pH values, dependence of pH from temperature.

Питательная вода и конденсат пара котлов представляют собой сильноразбавленные растворы дозируемых в них реагентов. Остаточные концентрации солей (в пересчете на NaCl) сравнительно малы, и для оценки pH при рабочих параметрах теплоносителя существенного вклада в его значения не вносят [1]. Щелочной агент дозируется в воду с целью связывания угольной кислоты и поддержания pH на нормативном уровне. В условиях ведения ВХР для котлов высокого давления ТЭС,

блоков СКД и ПГУ к добавочной и питательной воде предъявляются строгие требования, обеспечивающие высокое нормативное качество пара. Угловая кислота в таких условиях полностью отсутствует, а pH поддерживается на уровне $9,1 \pm 0,1$. В этом случае можно рассматривать питательную воду и конденсат пара как сильно разбавленный раствор аммиака.

Аммиак имеет высокий коэффициент распределения между водой и насыщенным паром (3,23), что говорит о том, что он практически полностью улетает в пар и вместе с ним конденсируется [2]. Кроме того, с ростом температуры диссоциация аммиака подавляется, то есть его щелочные свойства ослабевают. Исходя из данных зависимости константы диссоциации аммиака (рис. 1) и воды (рис. 2) от температуры, можно выразить и рассчитать молярные концентрации гидроксид-иона и водород-иона (pH) по уравнениям (1) - (3) [3,4]. Результаты расчета pH при рабочих параметрах на линии насыщения приведены в табл. 1.

$$pH = -\log C_{H^+} = 14 + \log C_{OH^-} \quad (1)$$

$$K_d(C_{H^+})^3 + (K_w + K_d C_{NH_4OH})(C_{H^+})^2 - K_w K_d C_{H^+} = K_w^2 \quad (2)$$

$$\alpha \cdot C_{OH^-}^{-2} + \alpha \cdot K_d \cdot C_{OH^-} - K_d \cdot C_0 = 0 \quad (3)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{C_{NH_4^+}}{C_{OH^-}} = 0,8$$

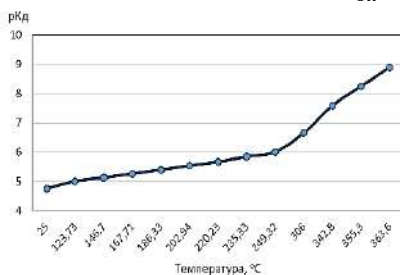


Рис. 1 Зависимость константы диссоциации аммиака от температуры на линии насыщения

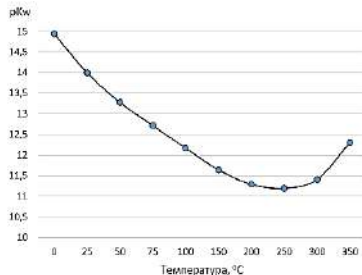


Рис. 2 Изменение значения ионного произведения воды с ростом температуры на линии насыщения

Таблица 1. Результаты расчета pH при рабочих параметрах на линии насыщения по уравнениям (1)-(3) при концентрации аммиака $2 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³

Значение pH по методике	Температура, °C								
	25	123	168	203	235	306	343	355	363
[3]	9,71	7,53	6,98	6,66	6,41	6,15	6,09	6,08	6,16
[4]	9,75	7,58	7,03	6,71	6,46	6,18	6,06	5,97	5,93
δ(pH)	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,11	0,23

Как видно из табл. 1, с ростом температуры при наличии подщелачивающего агента (аммиака) pH уходит в область кислых значений из-за изменения степени диссоциации аммиака и воды. Обе методики расчета показывают хорошую сходимости в диапазоне температур 25–343 °С и пригодны для расчета pH в моно-растворе аммиака с погрешностью, не превышающую погрешность измерений pH-метра. В зоне околокритических параметров теплоносителя расхождение результатов расчета увеличивается до 0,23 единиц pH, что является существенным и требует доработки методики расчета.

Литература

1. Щербаков, В. Н. Электролитические свойства растворов аммиака и кондуктометрический контроль качества теплоносителя ТЭС при высоких температурах и давлениях / В. Н. Щербаков, Г. А. Власков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. 2013. Т. 13, № 7/8 (75). С. 140–147.
2. Тяпков В.Ф. Использование аминов для коррекции водно-химического режима второго контура на АЭС с ВВЭР / Тяпков В.Ф., Петрова Т.И., Дяченко Ф.В., Бородастов А.К. // Атомная энергия, Т. 120, Вып. 6, стр. 336-340.
3. Wrigt, J. M., et al. The Behaviour of Electrolytic Solutions at Elevated Temperatures as Derived from Conductance Measurements. WAPD — TM — 204, June, 1961.
4. Ларин, А. Б. Расчет значений pH при рабочих параметрах теплоносителя второго контура АЭС с ВВЭР / А. Б. Ларин, Б. М. Ларин, К.В. Зотова // Вестник ИГЭУ. 2026. Вып. 6. С. 15–22.

УДК 621.311

А.Б. ЛАРИН, д.т.н., профессор
Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Состояние, проблемы и развитие технологии водного теплоносителя на АЭС

Аннотация. Состояние и проблемы технологии водного теплоносителя энергоблоков АЭС обострились, с одной стороны, со старением действующего оборудования, с другой стороны – с вводом новых энергоблоков 1200 МВт и проектированием блоков ВВЭР-СКД. Монография, написанная с участием авторов, содержит опубликованные в открытой печати материалы по водоподготовке, водно-химическому режиму (ВХР) и химическому контролю действующих и перспективных энергоблоков АЭС. Содержит методику и результаты расчета показателя pH.

Ключевые слова: энергоблоки АЭС, водно-химический режим, технологии и химический контроль.

A.B. LARIN¹, doctor of technical sciences, professor
B.M. LARIN¹, doctor of technical sciences, professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Status, problems and development of water coolant technology at NPP

Annotation. The state and problems of the water coolant technology of NPP power units have worsened, on the one hand, with the aging of existing equipment, on the other hand, with the commissioning of new 1200 MW power units and the design of VVER–SKD units. The monograph, written with the participation of the authors, contains materials published in the open press on water treatment, water-chemical regime (VCR) and chemical control of existing and prospective NPP power units. It contains the methodology and the results of calculating the pH value.

Key words: NPP power units, water and chemical regime, technologies and chemical control.

Наряду с традиционными энергоблоками ВВЭР-1000 на АЭС РФ введены в эксплуатацию блоки ВВЭР-1200, изучаются возможности перехода на сверхкритические параметры. Утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» предусматривает «создание нового поколения водо-водяных энергетических реакторов со сверхкритическими параметрами пара и регулируемым спектром нейтронов».

Водно-химический режим АЭС является одним из важнейших факторов, влияющих на надежную, безопасную эксплуатацию АЭС. На всем протяжении жизненного цикла эксплуатации АЭС остается актуальной проблема создания и поддержания таких физико-химических свойств теплоносителей, которые бы предотвращали коррозионные повреждения конструкционных материалов оборудования и образования отложений на его поверхностях.

Цельный ряд федеральных норм и правил в области использования атомной энергии регламентирует отдельные требования к ВХР АЭС и системам его поддержания. К системам поддержания водно-химического режима относятся установки и мероприятия по очистке водного теплоносителя, дозированию реагентов, обеспечению технологического и химического контроля состояния воды и пара энергоблоков АЭС. Названные и другие аспекты ВХР отражены в монографии авторов [1].

Монография состоит из трех частей, характеризующих основные процессы, аппараты и методы контроля водного теплоносителя на АЭС: водоподготовка – процессы и аппараты подготовки добавочной воды основного и вспомогательного контуров; водно-химический ре-

жим – процессы и режимы дозирования реагентов с целью снижения (предотвращения) отложений и коррозии оборудования энергоблоков; химический контроль ВХР – процессы, методы и устройства контроля качества воды и пара в рамках нормативных требований СТП.

В монографии изложены как устоявшиеся решения, так и некоторые спорные вопросы развития технологии водного теплоносителя, в частности, в отношении области применения мембранных технологий в водоподготовке, отдельных характеристик ВХР перспективных энергоблоков ВВЭР-СКД, методов контроля показателя рН_г при фактических параметрах рабочей среды.

Проведенные исследования мембранных элементов с открытым напорным каналом показали, что предлагаемая конструкция мембранного элемента позволяет увеличить удельную производительность мембранных элементов и скорость движения обрабатываемой воды в напорных каналах без увеличения их гидравлического сопротивления.

Для ведения нейтрального бескоррекционного ВХР в энергетическом режиме эксплуатации реакторной установки ВВЭР-СКД предлагается принять нормы питательной воды, приведенные в табл.

Таблица. Рекомендуемые нормы качества питательной воды для опытного образца ВВЭР-СКД

Показатель или содержание	Значение
удельная электропроводимость	0,10-0,15мкСм/см
показатель рН	7,0-7,5
растворенный кислород	не более 10 мкг/кг
соединения натрия	не более 5 мкг/кг
хлорид-ион	не более 2 мкг/кг
кремниевая кислота	не более 15 мкг/кг
соединения железа	не более 5 мкг/кг
общий органический углерод	не более 200 мкг/кг

Нормы удельной электропроводимости, показателя рН и растворенного кислорода в таблице соответствуют глубокообессоленной, нейтральной воде с чрезвычайно низкой электропроводностью, при которой обеспечивается надежная пассивация стали. Значение рН реакторной воды устанавливается из соображений коррозионной устойчивости конструкционных материалов.

Скорость коррозии определяется физико-химическими свойствами водной среды, соприкасающейся с металлом. Кислотно-щелочное равновесие (величина рН) в водном теплоносителе является одним из показателей, характеризующих эти свойства. Величина рН при нормальной (рН₂₅) и рабочей (рН_г) температурах не совпадают в связи с изменением степени диссоциации различных примесей и самой воды.

При упаривании в парогенераторе агрессивные свойства рабочей среды нарастают и создают реальную угрозу повреждения коллекторов

и трубопроводов (трубной системы 08X18H10T), поскольку сталь 12ГНМФА коллектора и в кислой области подвержена коррозионному растрескиванию гораздо больше, чем в нейтральной или слабощелочной среде. В этой связи очевидна необходимость введения в регламент химического контроля ВХР контроль величины pH_г и введения коррекционной обработки котловой воды при отклонении этого показателя в кислую среду.

В работе представлена методика и результаты расчетного определения показателя pH_г в условиях рабочей среды второго контура АЭС с ВВЭР [2].

Литература

1. Ларин, А.Б., Состояние, проблемы и развитие технологии водного теплоносителя на АЭС: монография / А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, В.Ф. Тяпков, Е.Б. Юрчевский; под общей редакцией Ларина Б.М. Иваново: ФГБОУВО ИГЭУ, 2024. 372 с.

2. Ларин, А.Б. Расчет значений pH_г при рабочих параметрах теплоносителя второго контура АЭС с ВВЭР / А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, К.В. Зотова // Вестник ИГЭУ. 2024. №6. С.15-22.

УДК 621.311

Е.Г. УХАЛОВА, ст. преподаватель
А.Б. ЛАРИН, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: lena.uxalova@mail.ru

Исследование содержания органических веществ в технологических водах электростанций

Аннотация. Применение аминоксодержащих реагентов обеспечивает защиту поверхностей нагрева энергетического оборудования, а также конденсаторов и паропроводов от протекания коррозии как в процессе эксплуатации оборудования, так и в стояночных режимах. В настоящее время на большинстве энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 России реализуется аммиачно-этаноламинный водный режим второго контура. Концентрация аммиака в питательной воде должна быть на уровне 1500 мг/дм³ и более, ЭТА – 400-600 мг/дм³. Реализация названных мероприятий по сравнению с традиционным аммиачным ВХР вызывает увеличение объема химического контроля и требует его оптимизации.

Ключевые слова: АЭС с ВВЭР; водно-химический режим (ВХР) второго контура; химический контроль этаноламинного ВХР; расчетное определение pH по измерениям удельной электропроводности.

E.G. UKHALOVA, senior lecturer;
A.B. LARIN, DHD, Professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: lena.uxalova@mail.ru

Investigation of organic content substances in process waters power plants

Abstract. The use of amino-containing reagents protects the heating surfaces of power equipment, as well as condensate and steam pipelines from corrosion both during operation of the equipment and in parking conditions. Currently, most of the power units of the VVER-1000 NPP in Russia are implementing an ammonia-ethanolamine second-circuit water regime. The concentration of ammonia in the feed water should be at the level of 1,500 micrograms/dm³ or more, THIS is 400-600 micrograms/dm³. The implementation of these measures in comparison with traditional ammonia HCV causes an increase in the volume of chemical control and requires its optimization.

Key words: Nuclear power plants with VVER; water-chemical regime (VCR) of the second circuit; chemical control of ethanolamine VCR; calculated determination of pH by measurements of specific electrical conductivity.

Исследования проводились сотрудниками МЭИ, ВНИИАЭС, ИГЭУ на различных электростанциях с целью оценки уровня содержания органических веществ в технологических водах ТЭС и АЭС и применимости международных показателей ТОС на российских электростанциях в условиях гидразин-аммиачного ВХР. В разных сочетаниях использовались следующие приборы и анализаторы:

- анализатор общего органического углерода (ТОС);
- ионный жидкостной хроматограф (ИЖХ);
- кондуктометр и рН-метр.

Исследования проводились по следующей методике. На работающем оборудовании отбирались пробы воды и конденсата в стеклянные колбы с притертой пробкой. Пробы охлаждались до 5÷7 °С и в термостатированном боксе переправлялись в химическую лабораторию, где проводился анализ на ионном жидкостном хроматографе Dionex 4000i. Метод ионной жидкостной хроматографии может быть использован для определения концентрации отдельных веществ органических соединений в водном теплоносителе и использоваться на атомных электростанциях России. Применение метода на ТЭС ограничивается высокой стоимостью анализаторов и трудностью использования для оперативного химического контроля. Жидкостная хроматография оказалась востребованной для анализа состава и концентраций анионов неорганических (хлориды, сульфаты) и органических (фториды, ацетаты) соединений в технологических водах АЭС, включая обессоленную воду, питательную воду и пар парогенераторов энергоблоков АЭС с ВВЭР.

Исследования качества обессоленной воды на ВПУ шести электростанций с измерениями ТОС и удельной электропроводности (χ) показали, что в диапазоне $\chi = 0,25 \pm 1,0$ мкСм/см, содержание ТОС обнаружено в пределах от 180 мкгС/дм³ до 1000 мкгС/дм³. Подробные исследования качества турбинного конденсата (ТК), питательной воды (ПВ) и острого пара (ОП) на энергоблоках с блочной обессоливающей установкой дали следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1. Результаты измерений удельной электропроводности Н-катионированной пробы (χ_n , мкСм/см) и ТОС (мкгС/дм³) на энергоблоках

Объект	ТК		ПВ		ОП	
	χ_n	ТОС	χ_n	ТОС	χ_n	ТОС
1	0,28	260	0,25	200	0,26	160
2	0,12	95	0,10	85	0,13	80

Худшее качество водного теплоносителя энергоблока СКД ТЭЦ с турбиной Т-250 (табл. 1, поз. 1) по сравнению с аналогами блока СКД ГРЭС с турбиной К-300 (поз. 2) было отнесено к поступлению в тракт конденсата сетевых подогревателей на блоке ТЭЦ. Сравнение значений ТОС с зарубежными нормами:

- добавочная вода – 300 мкгС/дм³;
- питательная вода – 200 мкгС/дм³;
- острый пар – 100 мкгС/дм³

показывает возможность получения качества водного теплоносителя, соответствующего зарубежным нормам на энергоблоках АЭС и ТЭС.

Исследование на ТЭЦ-22 «Мосэнерго» проводились с использованием анализатора «АТОС», кондуктометра и ионного хроматографа «Стайер». Результаты измерений ТОС и удельной электропроводности в обессоленной (добавочной) воде блоков СКД (после ФСД ХВО и после фильтров АII – анионитных фильтров второй ступени) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты измерения ТОС и удельной электропроводности в обессоленной (добавочной) воде блоков СКД на ТЭЦ-22

№ измер.	А-II №1		ФСД №1	
	ТОС, мкгС/дм ³	χ , мкСм/см	ТОС, мкгС/дм ³	χ , мкСм/см
1	296	1,18	868	0,25
2	298	1,18	870	0,26
3	309	1,17	872	0,26
4	310	1,15	871	0,27
5	315	1,12	872	0,27

Данные показывают уменьшение удельной электропроводности при фильтрации воды через ФСД до нормативных значений ($<0,3$ мкСм/см), однако дают увеличение ТОС от нормативных 300 мкгС/дм³ до 870 мкгС/дм³, что может быть отнесено к выносу ранее сорбированной

органики вследствие длительного фильтроцикла фильтров смешанного действия. В целом, результаты обследования показали, что при значительном содержании общего органического углерода в добавочной воде, в среднем до 600 мкгС/дм^3 , в конденсате его содержание не превышало 200 мкгС/дм^3 , а в питательной воде и паре энергоблоков не превышало 100 мкгС/дм^3 . Результаты, полученные анализом проб на ионном хроматографе, показали, что содержание органических соединений по тракту энергоблоков незначительно.

В настоящее время на большинстве энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 России реализуется аммиачно-этаноламинный водный режим второго контура. Авторами проведен анализ состояния аммиачно-этаноламинного водно-химического режима второго контура двух энергоблоков [1]. В результате исследований показано, что возможен оперативный контроль показателя pH, суммарной концентрации аммиака и ЭТА в питательной воде и паре ПГ и концентрации ЭТА в «котловой воде» парогенератора по измерениям удельной электропроводности охлажденных проб (прямой и Н-катионированной). Такой контроль может выполняться автоматическим отечественным анализатором «Лидер-АПК», производимым «НПП «Техноприбор» (г. Москва).

Литература

1. Ларин, А.Б. Химический контроль органических веществ по водопаровому тракту энергоблока / А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, Е.Г. Ухалова, Л.Н. Хрипкина // Вестник ИГЭУ. 2024. № 6. С. 6-24.

УДК 621.311

Н.А. ЕРЕМИНА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: zavkaf_xxte@ispu.ru

Импортозамещение ионообменных смол на АЭС

Аннотация. Проведен анализ результатов опытно-промышленных испытаний отечественной марки ионообменных смол, а также результатов технологического расчета схемы химводоочистки с использованием ионитов марки «ТОКЕМ».

Ключевые слова: атомная электрическая станция, входной контроль, эксплуатационный контроль, иониты, катионит, анионит, разделяемость ионитов.

N.A. EREMINA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zavkaf_xxte@ispu.ru

Analysis of changes in environmental legislation, problematic issues

Abstract. An analysis of the results of pilot industrial tests of a domestic brand of ion exchange resins, as well as the results of the technological calculation of a chemical water purification scheme using TOKEM brand ion exchangers, was carried out.

Key words: nuclear power plant, incoming inspection, operational inspection, ion exchangers, cation exchanger, anion exchanger, ion exchanger separability

В рамках программы импортозамещения ионообменных смол АО «Концерн Росэнергоатом» в 2023 г. на Калининской АЭС началась замена импортных ионообменных смол в установках химводоочистки на смолы отечественного производства [1]. На первом этапе проведены опытно-промышленные испытания новых марок ионообменных смол отечественного производства на установке с противоточной технологией ионирования UP.CO.RE. Замещение импортных ионообменных смол является актуальной проблемой для АЭС России из-за ряда факторов:

- зарубежные поставки ионообменных смол оказались в уязвимом положении из-за санкций, геополитических изменений и нестабильности рынков;

- внедрение отечественных ионитов сможет обеспечить соответствие специфическим требованиям, получить продукцию высокого качества и адаптировать под конкретные задачи;

- отечественные иониты могут привести к новым технологиям, которые улучшат производительность и эффективность обработки воды.

Для применения в системе противоточной регенерации в зажатом слое UP.CO.RE ООО ПО «ТОКЕМ» разработал новые марки ионообменных смол, которые внесены в «Перечень ионитов, разрешенных к применению на АЭС»:

- сильнокислотный катионит ТОКЕМ 140 NRC (в H-форме);
- слабоосновный анионит ТОКЕМ 340 NRC;
- сильноосновный анионит ТОКЕМ 841 NRC (в OH- и в Cl-формах);
- инертный материал ТОКЕМ PPE NRC.

На Калининской АЭС в 2023 г. с участием АО «ВНИИАЭС» в течение 5 месяцев проводились исследования входных и эксплуатационных характеристик ионитов ТОКЕМ, а также испытания на разделяемость ионитов, используемых в схеме подготовки воды для основного цикла в двухслойном анионитном фильтре.

По результатам входного контроля, проводимого водно-химической лабораторией Калининской АЭС, было выявлено полное соответствие указанных ионитов производства ООО ПО «ТОКЕМ» требованиям РД ЭО 1.1.2.25.0161-2009 [2] и практически полное совпадение с результатами контроля ионитов Dow Chemical, применяемых в настоящее время в схеме UP.CO.RE.

По результатам эксплуатационного контроля, проводимого в рамках опытно-промышленных испытаний АО «ВНИИАЭС», было выявлено, что для катионитов и анионитов марки ТОКЕМ в фильтрах UP.CO.RE:

- величина фильтроциклов и перепад давления на фильтрах в период работы сопоставимы с показателями фильтров, загруженными ионитами Dow Chemical;

- качество воды на выходе фильтров сопоставимо с фильтрами, загруженными ионитами Dow Chemical;

- качество регенерации, суммарный объем воды на регенерацию, а также объем воды на отмывку перед включением в работу сопоставимо с фильтрами, загруженными ионитами Dow Chemical;

- суммарный расход воды на регенерацию анионитного фильтра на 30 % больше для ионитов марки ТОКЕМ, что обусловлено повышенным расходом на отмывку после регенерации;

- расход воды отмывку перед включением в работу для анионитов марки ТОКЕМ до сопоставимых параметров в два раза выше, чем для ионитов Dow Chemical.

После окончания опытно-промышленных испытаний были отобраны пробы ионитов, и вновь был проведен эксплуатационный контроль их физико-химических показателей. По результатам контроля сделаны следующие выводы:

- результаты измерений физико-химических показателей ионитов марки ТОКЕМ и Dow Chemical сопоставимы и находятся в пределах допустимых измерений;

- для анионитного фильтра с послойной загрузкой наблюдается повышенное содержание слабоосновного анионита ТОКЕМ-340 NRC в сильноосновном анионите ТОКЕМ-841 NRC в нижней части (21,5 %), что в два раза больше аналогичного показателя для смол Dow Chemical (9,8 %).

Повышенное перемешивание слабоосновного и сильноосновного анионитов может привести к наблюдаемому увеличению расхода воды на отмывку фильтра, а впоследствии к повышению концентрации кремнекислоты на выходе фильтра. Необходима доработка слабоосновного анионита ТОКЕМ-340 NRC в части уменьшения насыпной плотности для улучшения условий перемешивания.

По результатам испытаний на разделяемость анионитов для их дальнейшего использования в фильтре с послойной загрузкой можно сделать следующие выводы:

- иониты марки ТОКЕМ-840 Cl и ТОКЕМ-320Y(M) (в Cl-форме), ТОКЕМ-841 Cl и ТОКЕМ-320Y(M) (в Cl-форме) не разделяются, смесь выглядит однородной;

- качество разделения ионитов марки ТОКЕМ-840 OH и ТОКЕМ-320Y(M) OH, ТОКЕМ-841 OH и ТОКЕМ-320Y(M) OH близко к качеству разделения ионитов Dow Chemical в Cl-форме;

- ТОКЕМ-841 Cl и ТОКЕМ-340 (в Cl-форме), ТОКЕМ-841 OH и ТОКЕМ-330 OH хорошо разделяются как в товарной форме, так и после регенера-

ции, видна четкая граница. Визуально поведение данной пары анионитов аналогично поведению Amberlite HPR 4200 Cl и Amberlite HPR 9500.

Таким образом, для проведения дальнейших опытно-промышленных испытаний в анионитном фильтре с послойной загрузкой можно рекомендовать пару ионитов марки TOKEM-841 и TOKEM-340.

Проведенные теоретические расчеты установки UP.CO.RE с импортными и российскими ионитами показали схожие результаты по основным технологическим показателям.

Таким образом, учитывая, что по результатам и входного, и эксплуатационного контроля предлагаемые иониты марки TOKEM показали сопоставимые физико-химические и технологические характеристики, фильтры, загруженные ионообменными смолами ООО ПО «TOKEM» остаются в работе на химводоочистке до окончания срока службы с периодическим дополнительным контролем перемешивания сильноосновного и слабоосновного анионитов в фильтре с послойной загрузкой; включение в «Перечень ионитов, разрешенных для применения на АЭС» слабоосновного анионита TOKEM 340 NRC не рекомендовано.

Литература

1. На Калининской АЭС успешно завершилось опробование отечественных марок ионообменных смол в рамках программы импортозамещения. Пресс-релиз. Режим доступа: <https://atommedia.online/2023/12/29/na-kalininskoj-aes-uspeshno-zavershilo/>

2. РД ЭО 1.1.2.25.0161-2009. Требования к входному и эксплуатационному контролю ионообменных смол для атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором

УДК 543.6

Л.Н. ХРИПКОВА, к.х.н., доцент,
Е.Г. УХАЛОВА, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет
Г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: iveco.67@mail.ru

Особенности компетенции аналитический контроль в чемпионате ATOMSKILLS 2025

Аннотация. Статья посвящена освещению компетенции Аналитический контроль в чемпионатном движении Atomskills. Описаны соревновательные модули, сложности выполнения, роль экспертов наставников.

Ключевые слова: Atomskills, лабораторный химический анализ, эксперт наставник.

L.N. KHRIPKOVA., Ph.D., Associate Professor,
E.G. UKHALOVA., senior lecturer.

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: iveco.67@mail.ru

Features of the competence analytical control in the ATOMSKILLS championship 2025

Abstract. The article is devoted to the coverage of the Analytical Control competence in the Atomskills championship movement. The competitive modules, the complexity of implementation, the role of expert mentors are described.

Key words: Atomskills, laboratory chemical analysis, expert mentor.

Atomskills – грандиозное соревнование мастерства и профессионализма, проводимое Государственной корпорацией Росатом. «У нас самый большой конкурс профессионального мастерства на планете, который проходит как огромный праздник труда»- так сказал Алексей Евгеньевич Лихачев – генеральный директор Госкорпорации "Росатом" на рабочей встрече с Владимиром Владимировичем Путиным. И это не просто слова, это масштабное мероприятие, участником которого стать не так просто. Чемпионат проводится с 2016года, и последние два года он включает в себя две ЛИГИ – профессиональную и студенческую. На чемпионате представлены 44 компетенции. Компетенции, в прямом смысле, это умение применять знания на практике. И множество компетенций, которые представлены на чемпионате Atomskills дают возможность соревноваться и показывать непосредственное применение своих знаний и опыта в одном модуле.

В настоящей статье мы расскажем об очень интересной компетенции, о трудоемкой и насыщенной различными навыками, речь пойдет о компетенции Аналитический контроль (Лабораторный химический анализ). Данная компетенция охватывает широкий спектр специальностей и профессий, связанных с Аналитическим контролем в разных отраслях промышленности. На разных предприятиях Госкорпорации «Росатом» представлены рабочие и специалисты, работающие по профессиям: лаборант химического анализа, лаборант спектрального анализа, лаборант радиохимического анализа, лаборант физико-химик, инженер-химик, инженер-радиохимик, инженер спектрального анализа, научный сотрудники и др.

Специалист в области «Аналитического контроля» («Лабораторного химического анализа») в основных сферах профессиональной деятельности должен знать: основные законы химии; основы аналитической химии; основы метрологии; химические и физические свойства природных и промышленных материалов; устройство и правила эксплуатации оборудования и приборов; нормативную и техническую до-

кументацию, относящуюся к контролю состава и свойств материалов с использованием химических и физико-химических методов анализа.

Подготовка к чемпионату, апробирование методик, которые становятся известны за месяц до проведения чемпионата, это большая и сложная работа, требующая от студента собранности, изучения нормативных документов и большого количества времени для освоения и тренировки методик.

В этом году студенту необходимо было продемонстрировать свои навыки в решении трех модулей (по сравнению с прошлым годом, один модуль). Время выполнения модуля три часа. За это время необходимо показать умения выполнять химический эксперимент, правила пользования химической посудой, умение пользоваться аналитическими весами и приборами для проведения фотометрического, потенциометрического и кондуктометрического количественного определения содержания того или иного вещества.

Кроме этого, участнику необходимо оформить письменный протокол проведённого эксперимента, построить необходимые графики или рассчитать по формулам и физико-химическим законам сколько вещества находится в зашифрованной пробе.

Важным элементом в оформлении является представление результатов измерения с учетом погрешности, которую необходимо представлять в соответствии с ГОСТ Р 8.984-2019 «Государственная система обеспечения единства измерений. Внутренний контроль качества измерений в области использования атомной энергии».

Модуль А: Фотометрический метод анализа. «Фотометрическое определение массовой концентрации ионов меди (II) в технологических растворах электрохимического производства». Настоящая методика распространяется на технологические растворы электрохимического производства, и устанавливает процедуру измерений массовой концентрации (далее – МК) ионов меди (II) в присутствии ионов железа (III).

В этом модуле необходимо было определить в анализируемой пробе количество ионов меди в присутствии ионов железа с помощью прибора фотозелктроспектрометра.

Модуль В. Потенциометрический метод анализа. «Методика измерений массовой доли натрия фосфорнокислого однозамещенного 2-водного потенциометрическим методом».

Сущность метода состояла в определении натрия фосфорнокислого однозамещенного 2-водного основано на потенциометрическом титровании гидроокисью натрия до резкого изменения значения pH в диапазоне 9,00–9,20.

Модуль С. Кондуктометрический метод анализа. «Методика определения содержания смеси меди и цинка в растворе серной кислоты кондуктометрическим методом».

Сущность метода состоит в определении электропроводности растворов в ходе протекания химической реакции. Результата модуля –

это количественное представление содержания ионов меди и ионов цинка в анализируемой пробе.

Модули студенческой лиги – это упрощенные модули профессиональной лиги.

В этом году на чемпионате в Студенческой лиге соревновались 7 участников: 3 студента из вузов и 4 студента колледжей. Надо отметить, что все участники хорошо владеют техникой анализа, умением обрабатывать полученные данные в программном пакете MS Excel. Определить победителя было не легко. Но, победители все же были.

Эксперты наставники – это, в основном, преподаватели данного учебного заведения участник, которого представлен на чемпионате. Правда, два участника имели эксперта наставника отраслевого.

На чемпионате в Студенческой Лиге было три соревновательных дня. Каждый день участник выполнял один модуль. Выполнение модуля сопровождалось пристальным вниманием экспертов, которые следили за каждым шагом и действиями участника. Надо заметить, что в данной компетенции результат модуля – это не конечный продукт, это численное представление количественного определения вещества. В связи с этим, навыки выполнения анализа напрямую связаны с точностью и тщательностью его выполнения. Поэтому и выполнение модуля проходит в напряженной обстановке.

Эксперту необходимо заметить все точности и неточности в выполнении анализа, чтобы выставить баллы за проведенный модуль. В этом году эксперты наставники студенческой лиги и эксперты наставники профессиональной лиги объединились вместе и участвовали в оценке проведения модуля одним коллективом. Считаю, что данная практика не вполне оправдана, поскольку уровень владения техникой анализа профессионалов и студентов различен. В связи с этим, подход к оценке умений и навыков студента, у которого лабораторного практикума в вузе было 56ч, должен быть дифференцирован и объективен. Кроме того, участие экспертов наставников в проверке оформления протоколов участников должно быть обязательным. В этом году, по сравнению с прошлым годом и дивизиональным чемпионатом Reaskills 2025, эксперты наставники студентов не были допущены до проверки протокола модуля.

В этом году также ввели нововведение при выполнении модуля -это ориентация на скорую работу, мотивацией является уменьшение времени выполнения на 30 минут с поощрением за каждые пять минут по 0,1 балла. И также наказание за каждые пять минут сверх 2,5 часов вычитанием 0,1 балла.

Надо сказать, что одному человеку удалось полностью выполнить один модуль менее чем за три часа. Хочется отметить серьезную борьбу, искренность в достижении результата, не формальный подход и высокий уровень подготовки всех участников Студенческой лиги.

Хотелось бы, чтобы разработчики конкурсных заданий были незаинтересованные люди, имеющие достаточную квалификацию для подобного рода работ, а также критерии оценки совершенствовались и четко отража-

ли внутренне содержание модуля. Впереди еще много чемпионатов, много новых и интересных методов, освоив которые, наши студенты волеются в армию профессионалов Росатома подготовленными, закалёнными и способными мыслить, творить и создавать новые горизонты.

Литература

1. Техническое описание компетенции «Аналитический контроль» («Лабораторный химический анализ»).

УДК: 614.8.086.52

М.А. ВОЛЬМАН, к.т.н., доцент
К.О. ЕМЕЛЬЯНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: ferseh@mail.ru

Проблема современных радиационно-защитных материалов и способ повышения их эффективности

Аннотация. В докладе рассмотрен способ повышения эффективности радиационно-защитных материалов на основе применения комбинированных слоев различных композитных материалов.

Ключевые слова: АЭС, композитные материалы, радиационная защита, экранирование, ионизирующее излучение.

M.A VOLMAN, candidate of technical sciences, associate professor
K.O. EMEL'YANOV, post-graduate student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: ferseh@mail.ru

The problem of modern radiation-protective materials and ways to improve their efficiency

Abstract. The report considers a method for assessing the efficiency of radiation-protective materials based on the use of combined layers of various isolated materials.

Key words: NPP, composite materials, radiation protection, shielding, ionizing radiation.

На данный момент в науке стоит вопрос снижения получаемых доз облучения персоналом и населением от источников ионизирующего излучения. Как известно для всех групп работников, работающих с источниками ионизирующего излучения, и населения устанавливаются допустимые уровни облучения, которые исключают риск возникновения детерминированных эффектов, которые возникают при облучении свыше определенного предела. Но в то же время есть отдаленные

стохастические эффекты – вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением; которые не имеют конкретного порога и риск возникновения которых пропорционален дозе. Таким образом, облучение вызывает повышение вероятности возникновения различных раковых и наследуемых заболеваний. Исходя из этого, возникает проблема снижения получаемых доз облучения, для минимизации риска возникновения этих эффектов.

Одним из способов обеспечения радиационной безопасности является применение экранов для снижения мощности дозы от ИИ. В качестве экранов традиционно применяются радиационно-защитные маты из свинца и дополнительные средства индивидуальной защиты из свинца или вольфрама, например, свинцовые фартуки. Свинец недорогой, прост в обработке, однако его токсичность может нанести большой вред организму человека и окружающей среде [2–5]. И помимо этого свинец имеет достаточно высокую плотность, а как следствие, и большую массу экранирующих материалов из свинца. А большая масса средств индивидуальной защиты также негативно сказывается на персонале при длительном ношении. В связи с этим существует потребность в разработке альтернативных материалов, которые являются более экологически чистыми и легкими, при этом их можно использовать в качестве экранирующего материала.

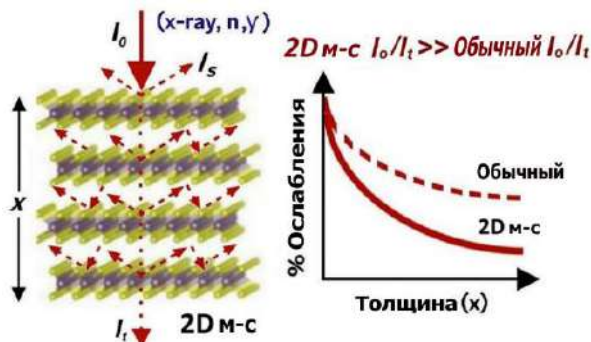


Рис. 1. Схематическая иллюстрация взаимодействия ионизирующего излучения с многослойной структурой 2D-кристаллов, показывающая многократное рассеяние между каждым слоем, что приводит к значительному повышению экранирования излучения, которая не наблюдается в обычном материале

Наиболее перспективным направлением изучения данного вопроса являются композиты, так как позволяют использовать легкие в своей основе материалы, в которые можно включать микро- и наночастицы других материалов для достижения необходимых радиационно-защитных характеристик. Сейчас можно наблюдать множество исследований по поиску композитных материалов для радиационной защиты,

не содержащих свинца, либо же содержащих соединения свинца с другими химическими элементами.

Одним путей повышения эффективности экранирования радиационно-защитного композитного материала является применение системы комбинированных слоев нескольких композитов. Композитные материалы сами по себе способны снижать мощность ионизирующего излучения, но при комбинировании слоев из нескольких материалов можно добиться еще более значительного снижения. Экранирование ионизирующего излучения объясняется тем, что происходит многократное рассеяние и взаимодействие (отражение) фотонов на границе раздела между каждым слоем в многослойной структуре, что и приводит к значительному снижению мощности излучения.

Как было показано в исследовании [1] для двух изучаемых композитных материалов, комбинирование слоев из этих материалов повышает эффективность экранирования. В случае комбинирования двух слоев эффективность повышалась до 12,85%, в сравнении с экраном из одного материала. В случае же комбинирования четырех слоев эффективность экранирования повышалась вплоть до 62,26%, в сравнении с экраном из одного материала. Объясняется это тем, что при увеличении числа слоев с 2 до 4 вероятность фотоэлектрического эффекта значительно возрастает за счет дополнительного поглощения и рассеяния ионизирующего излучения между границами раздела каждого слоя.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что повышение радиационно-защитных свойств композитных материалов можно добиться не только поиском новых химических соединений в качестве основы для композитного материала, но и путем комбинации различных материалов в несколько слоев. Это позволит добиться значительного повышения экранирующих свойств и помимо этого имеет высокий потенциал сократить толщину и, соответственно, массу экрана, что положительно скажется на эксплуатации в качестве экранирующих фартуков и жилетов для персонала.

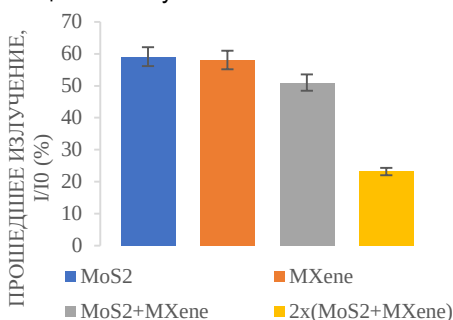


Рис. 2. Интенсивность прошедшего излучения через экранирующий материал

Литература

1. Yu, L., Nine, M.J., Tung, T.T. *et al.* (2023). Revealing enhanced X-Ray radiation shielding of 2D layered materials and their laminar heterostructures. *Graphene and 2D mater*, Vol. 8, 151–159. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s41127-023-00064-4>

2. Buyuk, B. Comparison of Lead and WC-Co Materials against Gamma Irradiation / B. Buyuk, A.B. Tugrul // Acta Phys. Pol., A. 2014. Vol. 125. P. 423–425. <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.125.423>

3. Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine / N.J. AbuAlRoos [et al.] // Physica Medica. 2020. Vol. 78. P. 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.017>

4. Effect of BaO on lead free zinc barium tellurite glass for radiation shielding materials in nuclear application / K. Boonin [et al.] // J. Non-Cryst. Solids. 2020. Vol. 550. Art. ID 120386. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120386>

5. Feasibility of polymer-based composite materials as radiation shield / M. Al-murayshid [et al.] // Radiat. Phys. Chem. 2021. Vol. 183. Art. ID 109 425. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109425>

УДК 621.039.003

Д.Г. СОЕНКО, аспирант,
И.Е. ВИХАРЕВ, студент,
А.А. БЕЛЯКОВ к.т.н., доцент,
Б.М. ХАРИТОНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: Soenko@mail.ru

Унификация технологических и компоновочных решений машинного зала АЭС большой мощности

Аннотация. Целью работы является проработка универсальных решений при проектировании машинного зала АЭС большой мощности, которые могут быть применены как с быстроходными, так и с тихоходными турбоустановками.

Ключевые слова: унификация, проектные решения, машинный зал АЭС, турбогенераторная установка, АЭС

D.G. SOYENKO, Postgraduate Student,
I.E. VIKHAREV, student,
A.A. BELYAKOV, Candidate of Engineering Sciences,
B.M. KHARITONOV, Postgraduate Student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskay st., 34
E-mail: Soenko@mail.ru

Unification of technological and layout solutions of the high-power NPP turbine hall

Annotation. The aim of the work is to develop universal solutions for the design of the high-power NPP engine room, which can be used with both high-speed and low-speed turbine installations.

Key words: unification, design solutions, NPP turbine room, turbine generator set, NPP

На текущий момент в РФ наибольшее распространение получили АЭС с реакторами типа ВВЭР тепловой мощностью 3000–3300 МВт. Для преобразования тепловой энергии реактора в электрическую применяются турбогенераторные установки (ТГУ) как в быстроходном, так и в тихоходном исполнении. Тип ТГУ оказывает фундаментальное влияние на строительные, технологические и компоновочные решения машинного зала АЭС. Однако существуют решения, не зависящие от типа турбины и которые могут быть использованы в качестве универсальных в любом машинном зале будущей АЭС.

Характеристики применяемых при текущей тепловой мощности реакторных установок турбин полностью удовлетворяют потребностям отечественного и зарубежного рынка. Ввод в эксплуатацию 6 энергоблоков проекта АЭС-2006 (Ленинградская АЭС-2, Нововоронежская АЭС-2, Белорусская АЭС) с ТГУ АО «Силовые машины», а также работа над проектами АЭС «Пакш-2», «Эль – Дабаа», «Аккую», с турбоустановками ARABELLE позволили накопить большой опыт проектирования и эксплуатации машинных залов современных АЭС большой мощности с принципиально разными ТГУ, данный опыт был положен в основу разработки, совершенствования, оптимизации и унификации проектных решений машинных залов АЭС большой мощности российского дизайна [1-9].

Данный подход коррелирует с задачами госкорпорации «Росатом» по сокращению сроков сооружения первого энергоблока любого будущего проекта АЭС до 60 месяцев, с последующим сокращением этого срока до 54 месяцев для последующих блоков в рамках одной площадки сооружения.

Кроме того, данные решения позволяют унифицировать набор ключевого оборудования для АЭС и тем самым приблизиться к потоковому процессу проектирования и сооружения и вводу в эксплуатацию энергоблоков атомных станций.

Часть решений уже внедрены в так называемый «Базовый Проект» машинного зала АЭС большой мощности, который является следующим этапом эволюции АЭС российского дизайна на базе технологии ВВЭР, среди них:

- размещение деаэратора в голове турбины и отказ от деаэраторной этажерки, что позволяет сократить площадь машинного зала АЭС, минимизировать вероятность повреждения систем питательной воды и свежего пара, в случае отрыва лопаток турбины, а также удовлетворить международным требованиям;
- применение бескранового метода монтажа статора генератора (с помощью портальной гидравлической системы), что в свою очередь позволяет сократить строительные объемы здания машинного зала в следствии снижения максимальных расчетных нагрузок, передающихся от мостового крана при монтаже/демонтаже тяжеловесного оборудования;

- применение системы сепарации пароперегревателя с использованием в конструкции СПП теплообменной трубки с оребрением методом накатки, позволяющим существенно интенсифицировать процессы теплообмена в СПП, с оптимизацией состава, входящего в него оборудования: сокращение количества сепараторосборников до одного, сокращение насосов слива сепарата до двух, минимизация количества конденсаторосборников;

- применение встроенных первых двух ступеней регенерации низкого давления (ПНД 1 и ПНД-2) в конденсатор турбины и использование универсальной схемы основного конденсата с возможностью ее конфигурирования под особенности каждого проекта (применение одной или двух ступеней КЭН, сокращение количества арматуры по тракту основного конденсата с минимизацией сопротивления всего тракта и сокращения потерь на дросселирование, оптимизация производительности БОУ);

- применение универсальной ячейки ПЭН позволяющей использовать питательных насосов различной конфигурации, как с частотным регулированием (гидромукфы), так и без, с оптимизацией перепада давления на регуляторе питания парогенераторов (снижение перепада на РУ ПГ менее 8 кгс/см^2);

- использование сто процентного резервирования регуляторов питания парогенератора и исключение единственного узла по конденсатно-питательному тракту, который не имеет такого резерва, что позволяет увеличить как надежность самого узла питания ПГ, так и повысить КИУМ и коэффициент готовности энергоблока АЭС в целом;

- перевод большинства технологических систем машинного зала АЭС в 4 класс безопасности по классификации НП-001-15; в соответствии с п.п. 2.5 которого введено понятие не превышения условной вероятности перехода отказа в тяжелую аварию менее 10^{-6} , что позволяет обосновать снижение класса безопасности с целью сокращения избыточного консерватизма;

- оптимизация отвода пароводяной смеси из конденсатора с применением комбинированной схемы: водокольцевых насосов в совокупности с паровыми эжекторами, что в свою очередь позволяет минимизировать недостатки каждого из типов оборудования и максимально использовать преимущества эжекторов по обеспечению глубины вакуума и преимущества водокольцевых насосов в части производительности;

- применение универсальных схем обвязки теплообменного оборудования в части контроля температуры, давления и поддержания уровня.

Несмотря на достигнутые результаты остаются открытыми вопросы, решение большинства из которых, является одной из приоритетных задач как проектно-конструкторских, так и эксплуатирующей организации:

- 1) подготовка обоснования по переводу всех систем и оборудования машинного зала, в 4 класс безопасности по классификации НП-001-15;

- 2) унификации и оптимизация недогревов как горизонтальных, так и вертикальных регенеративных, теплообменников [10];

- 3) использование универсальных схем организации дренажей ТГУ;
- 4) дальнейшее совершенствование схем регулирования уровня в деаэраторе и парогенераторах с полным уходом от дросселирования потоков на регулирующих клапанах;
- 5) использование системы вспомогательной питательной воды не только в пускоостановочных режимах работы АЭС, но и при работе энергоблока на мощности;
- 6) проработка на законодательном уровне разрешения применения систем прямоточного водоснабжения [11];

Литература

1. Материалы технического проекта Нововоронежской АЭС-2.
2. Материалы технического проекта Ленинградской АЭС-2.
3. Материалы технического проекта Белорусской АЭС.
4. Материалы технического проекта АЭС «Пакш-2».
5. Материалы технического проекта АЭС «Эль – Дабаа».
6. Материалы технического проекта АЭС «Аккую».
7. Отчет по опыту сооружения энергоблока №1 Ленинградской АЭС-2. 2018 г.
8. Отчет по опыту сооружения энергоблока поколения 3+, 2017 г.
9. Отчет по опыту сооружения энергоблока №2 Нововоронежской АЭС-2, 2019 г.
10. E.N. Kulakov, Yu.G. Sukhorukov, D.G. Soenko, I.E. Vikharev, S.B. Esin, F.A. Svyatkin, K.A. Grigoriev, and A.V. Popov. Optimization of Weight and Size Characteristics and Unification of Heaters of the Regeneration System of NPP Turbine Units // Thermal Engineering, 2024, Vol. 71, No. 5, pp. 391–399.
11. Сухоруков Ю.Г., Смолкин Ю.В., Казаров Г.И. и др. Направления повышения тепловой эффективности АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика, 2024, №7, с. 45-53.

УДК 629.039.58

А.Р. БЕЛЯЕВ, аспирант,
Б.М. ХАРИТОНОВ, аспирант,
А.А. БЕЛЯКОВ к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: woker-89@mail.ru

Оценка рисков повреждения строительных конструкций защитной оболочки реакторного здания АЭС с реактором ВВЭР-1200

Аннотация. В данном исследовании выполнен структурный анализ рисков повреждения строительных конструкций защитной оболочки реакторного здания атомных электростанций с реактором ВВЭР-1200 на примере энергоблоков Ленинградской АЭС-2 и Нововоронежской АЭС-2.

Ключевые слова: безопасность, защитная оболочка, вероятностный анализ безопасности, проектные и запроектные аварии, АЭС

A.R. BELYAYEV, Postgraduate Student,
B.M. KHARITONOV, Postgraduate Student,
A.A. BELYAKOV, Candidate of Engineering Sciences

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskay st., 34
E-mail: woker-89@mail.ru

Assessment of the risks of damage to the building structures of the protective shell of the reactor building of a NPP with a WWER-1200 reactor

Annotation. In this study, a structural analysis of the risks of damage to the building structures of the protective shell of the reactor building of nuclear power plants with a VVER-1200 reactor was performed using the example of power units of the Leningrad NPP-2 and Novovoronezh NPP-2.

Key words: safety, containment, probabilistic safety analysis, design basis and beyond design basis accidents, NPP

Различные формы скрытых дефектов, не выявляемых на ранних стадиях возникновения, повседневно наблюдаются в строительных конструкциях и оборудовании АЭС на всех этапах их жизненного цикла. Основными причинами дефектов являются ошибки, допущенные при проектировании, конструировании, изготовлении, применении материала с химическим составом, несоответствующим проекту, нарушении технологии монтажа, ремонта, условий эксплуатации, консервации и хранения, которые в свою очередь, приводят к коррозии стальных оболочек и корпусов, стенок трубопроводов, арматурных стержней и жил предварительного напряжения вплоть до потери механических свойств конструкций защитных оболочек.

Оценить влияние степени деградации материала на способность оборудования, трубопроводов и защитных оболочек удерживать давление, можно путем проведения структурного анализа барьеров глубокоэшелонированной защиты (ГЭЗ) с помощью методологии вероятностного анализа безопасности (ВАБ).

Для оценки состояния защитной оболочки (ЗО) реакторного здания с реактором ВВЭР-1200 наиболее применим ВАБ уровня 2 (ВАБ-2), включающий анализ воздействий на внешнюю и внутреннюю ЗО, являющихся элементами четвертого барьера ГЭЗ.

Рассмотрены аварийные ситуации (сценарии), оказывающие влияние на четвертый барьер ГЭЗ при нарушении пределов безопасной эксплуатации с повреждением третьего барьера ГЭЗ, включающего элементы 1 контура (главные циркуляционные трубопроводы, главные циркуляционные насосы, паропроводы, парогенераторы).

В качестве источника данных, были использованы следующие источники информации:

- данные ОКБ «Гидропресс» по определению частот групп инициирующих событий (ИС), связанных с разуплотнением 1 контура реакторной установки;

- отчеты ВНИИАЭС по инцидентам на Российских АЭС;

- информация из системы «ЕОС-Качество».

Исследование проводилось с использованием информации, полученной от Ленинградской АЭС-2 и Нововоронежской АЭС-2, которые имеют в своей основе базовый проект с унифицированными элементами 1 контура и единым решением о разработке однотипной базы данных для выполнения ВАБ, которое учитывалось при разработке технического задания.

Для определения ИС были использованы следующие подходы:

- опыт эксплуатации АЭС, имеющих аналогичный проект. Оценки частот выполняются путем прямой обработки эксплуатационных данных или с применением байесовской процедуры;

- экспертные оценки редких событий;

- результаты применения вероятностно-прочностных методов для оценки вероятностей разрушения сосудов и трубопроводов, основанных на исследовании структуры материала, числа и длины сварных швов, контроля качества, динамических нагрузок и т.п.;

- анализы деревьев отказов для специальных редких событий, в частности, инициирующих событий, вызванных отказом общего вида;

- специальное исследование характеристик АЭС и площадки для оценки частоты обесточивания. При этом оценивалось влияние погодных условий и внешних воздействий на сооружения.

По результатам сравнения двух проектов В-392М Нововоронежской АЭС-2 (проектировщик ОАО «Атомэнергопроект») и В-491 Ленинградской АЭС-2 (проектировщик ОАО «СПб АЭП») с реакторами ВВЭР-1200 (АС-2006), находящимся в эксплуатации, по критериям безопасности и экономической эффективности, были сделаны следующие выводы:

1) по критерию «безопасность» каждый из проектов В-392М и В-491 достаточно безопасен. Однако, в части защиты от внутренних рисков, лучше оказался проект В-491 Ленинградской АЭС-2 за счет применения системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки, вносящей существенный вклад в поддержание пределов безопасной эксплуатации путем охлаждения защитной оболочки при запроектных авариях с выбросом пара в гермообъем и возгорании водородосодержащей смеси в помещениях контаймента. Для Нововоронежской АЭС-2 вероятность реализации большого аварийного выброса РВ в окружающую среду составляет $7,60\text{E-}06$ за год, для Ленинградской АЭС-2 этот показатель равен $3,06\text{E-}07$;

2) по критерию «экономическая эффективность» проект В-491 проигрывает проекту В-392М за счет повышенных затрат на эксплуатацию. При этом, оба проекта оказались в одинаковой степени затратными на

начальной стадии строительства за счет внедрения от внутренних рисков:

- пассивных систем безопасности в проекте В-392М в большем количестве, чем в проекте В-491, что требует расхода большего объема бетона и арматуры при возведении защитной оболочки и перекрытий помещений для размещения таких систем;
- активных систем безопасности в проекте В-491 в большем количестве, чем в проекте В-392М, включающие закупку дорогостоящего оборудования и работ по реализации сложных трассировок трубопроводов для подведения охлаждающих сред при развитии аварии.

Литература

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15)», утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522.
2. IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide № SSG-4. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA, Vienna, 2010.
3. Рекомендации по разработке вероятностного анализа безопасности уровня 2 для блока атомной станции. РБ-044-18. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2018.
4. Основные требования к вероятностному анализу безопасности блока атомной станции. НП-095-15. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2015.
5. МТ 1.2.2.01.999.0009-2011 «Методика оценки напряженнодеформированного состояния защитных оболочек атомных электрических станций (с изменениями №1 2012 г., № 2 2018 г.)».

УДК 621.039

А.Н. ВОРОНОВ, студент,
М.Ю. УГАРОВ, студент,
А.Г. ИЛЬЧЕНКО, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: dr.ilchenko@yandex.ru

Применение систем пассивной части САОЗ и СПЗАЗ в проектах ВВЭР-ТОИ и ВВЭР-1200

Аннотация. Приведено описание систем пассивной части САОЗ и СПЗАЗ. Составлена технологическая схема систем, построена модель систем пассивной части САОЗ (ГЕ-1) и СПЗАЗ (ГЕ-2). Приведено сравнение систем в проектах ВВЭР-1000 (серийный), ВВЭР-1200 (ЛАЭС-2, НВАЭС-2), ВВЭР-ТОИ (КуАЭС-2).

Ключевые слова: защитные системы безопасности; безопасная эксплуатация; гидроемкости первой, второй, третьей ступени.

A.N. VORONOV, student,

M.Y. UGAROV, student,

A.G. ILCHENKO, Candidate of Engineering Sciences, docent

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskay st., 34

E-mail: dr.ilchencko@yandex.ru

Application of the passive part of the ECCS and RCPFS systems in the VVER-TOI and VVER-1200 projects

Abstract. The description of the systems of the passive part of the ECCS and RCPFS is given. A technological scheme of the systems has been compiled, and a model of the systems of the passive part of the ECCS (NPPCV-1) and RCPFS (NPPCV -2) has been built. A comparison of the systems in the VVER-1000 (serial), VVER-1200 (Leningrad NPP-2, Novovoronezh NPP-2) and VVER-TOI (Kursk NPP-2) projects is presented.

Key words: protective safety systems; safe operation; hydraulic capacities of the first, second, and third stages.

Повышению безопасности энергоблоков АЭС отведено особое внимание. Для этого в проектах энергоблоков АЭС предусмотрены различные системы безопасности: защитные, локализирующие и обеспечивающие [1].

В работе рассмотрены защитные системы безопасности пассивной части систем аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ), а также системы аварийного залива активной зоны (СПЗАЗ), монтаж которой впервые был выполнен на Нововоронежской АЭС-2 с РУ ВВЭР-1200, и на референтном энергоблоке Курской АЭС-2 с РУ ВВЭР-ТОИ. Приведены упрощенные технологические схемы этих систем, а также проведено сравнение пассивных САОЗ и СПЗАЗ энергоблоков КуАЭС-2, НвАЭС-2 и ЛАЭС-2 по критерию «время поддержания активной зоны в безопасном состоянии».

Пассивная часть САОЗ (ГЕ-1) предназначена для подачи в реактор раствора H_3BO_3 при авариях с потерей теплоносителя при снижении давления в первом контуре менее 5,9 МПа в количестве, достаточном для охлаждения активной зоны до подключения САОЗ НД (активная часть) или подачи H_3BO_3 от СПЗАЗ (ГЕ-2).

СПЗАЗ подразделяется на две подсистемы: система гидроемкостей второй (ГЕ-2) и третьей ступени (ГЕ-3).

ГЕ-2 предназначена для поддержания уровня теплоносителя в активной зоне при падении давления в первом контуре ниже 1,5 МПа в случае проектных аварий [2].

ГЕ-3 предназначена для подачи H_3BO_3 при запроектных авариях с течами первого контура и отказом активных систем безопасности после истощения запаса H_3BO_3 в ГЕ-2.

Кроме того, СПЗАЗ подает H_3BO_3 для подпитки бассейна выдержки.

В проектных и запроектных авариях ГЕ-2 и ГЕ-3 работают совместно с другими защитными системами безопасности для обеспечения отвода остаточных энерговыделений от активной зоны в течении 24 ч с момента аварии (ГЕ-2) и 48 ч (ГЕ-3) после работы ГЕ-2 [2].

На рис. 1 представлена упрощенная технологическая схема систем ГЕ-1, ГЕ-2 и ГЕ-3.

В системе трехмерного моделирования КОМПАС 3D v23 была разработана модель систем ГЕ-1, ГЕ-2 энергоблока №1 Курской АЭС-2 с целью проведения дальнейших теплогидравлических исследований.

В таблице представлено сравнение пассивной части САОЗ и СПЗАОЗ для различных реакторных установок.

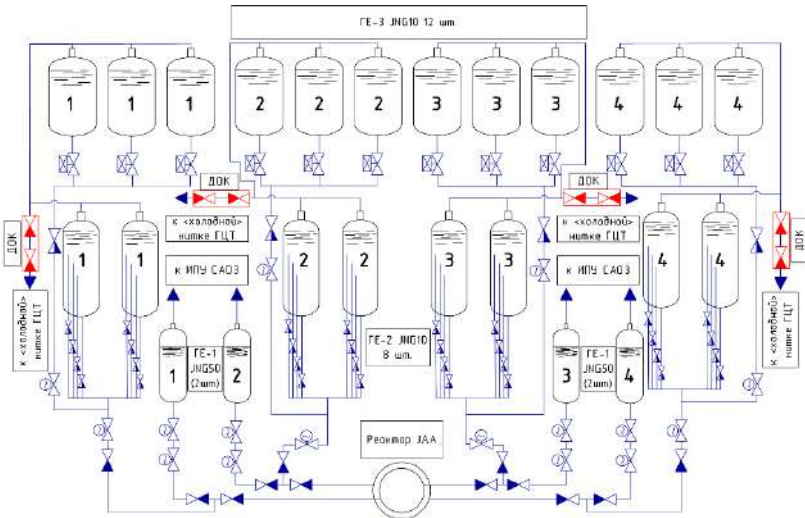


Рис.1. Упрощенная технологическая схема ГЕ-1, ГЕ-2, ГЕ-3

Таблица. Сравнение пассивной части САОЗ и СПЗАОЗ для различных реакторных установок

Энергоблок АЭС	ВВЭР-1000 (серийный)	ВВЭР-1200 (ЛАЭС-2)	ВВЭР-1200 (НвАЭС-2)	ВВЭР-ТОИ (КуАЭС-2)
Объем пассивной части САОЗ	ГЕ-1 240 м³	ГЕ-1 240 м³	ГЕ-1 240 м³ ГЕ-2 960 м³	ГЕ-1 240 м³ ГЕ-2 960 м³ ГЕ-3 720 м³
Время поддержания активной зоны в безопасном состоянии, ч	1,5-2	1,5-2	25,5-26	73,5-74
По окончании указанного срока энергоблок находится в состоянии проектной аварии				

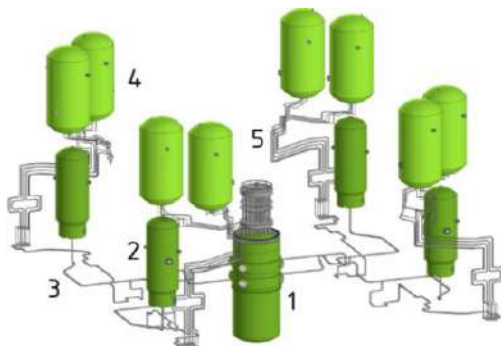


Рис. 2. 3D визуализация технологических систем пассивной части САОЗ (ГЕ-1) и СПЗАЗ (ГЕ-2): 1 – реактор, 2 – емкость САОЗ (ГЕ-1), 3 – трубопровод САОЗ, 4 – емкость СПЗАЗ (ГЕ-2), 5 – трубопровод СПЗАЗ

Системы пассивной части САОЗ и СПЗАЗ поддерживает реакторную установку в безопасном состоянии в аварийных режимах, осуществляя подпитку активной зоны и отвод тепла. Проект системы ГЕ-2 и ГЕ-3 обеспечивает безопасную эксплуатацию энергоблока в течение дополнительного времени в режимах проектных и запроектных аварий.

Литература

1. А.Ю. Кучумов «Созданные технические решения могут и должны быть использованы не только в рамках проекта ВВЭР-ТОИ» // Вестник Атомпрома. 2024. №5. С. 13-19.

2. Основы обеспечения безопасности АЭС: учебное пособие для студентов вузов / В.Г. Асмолов, В.Н. Блинков, В.П. Поваров, О.Г. Черников. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. 296 с.

УДК 621.039.576

В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., профессор
Р.П. ДЕМЬЯНЕНКО, студент
Д.О. ФОМИЧЕВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, Рабфаковская улица 34
E-mail: romad5128@gmail.com

К вопросу о определении приведенного коэффициента теплопроводности у ТВЭЛ с отверстием

Аннотация. В данной работе исследуется влияние лучистого теплообмена на температурные поля ТВЭЛов с использованием приведенного коэффициента

теплопроводности, что позволяет сократить время вычислений в COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: Приведенный коэффициент теплопроводности, ТВЭЛ, температурные поля, метод решением обратной задачи, пористые тела.

V.A. GORBUNOV, Doctor of Engineering, professor

R.P. DEMYANENKO, student

D.O. FOMICHEV, post-graduate student

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskay st., 34

E-mail: romad5128@gmail.com

On the issue of determining the reduced thermal conductivity coefficient of a hollow fuel rod

Abstract. This paper studies the effect of radiant heat exchange on the temperature fields of fuel rods using the reduced thermal conductivity coefficient, which allows reducing the computation time in COMSOL Multiphysics.

Key words: Reduced thermal conductivity coefficient, fuel rod, temperature fields, inverse problem method, porous bodies.

Обычно, на вычисление температурных полей с учетом лучистого теплообмена в COMSOL Multiphysics уходит большое количество времени [1], которое можно сократить, используя понятие приведенного коэффициента теплопроводности.

Приведенный коэффициент теплопроводности учитывает лучистую, конвективную и кондуктивную составляющие теплообмена в пористых телах, что позволяет решать сложные задачи быстрее (например, с группой ТВЭЛов) [2]. Данный коэффициент можно получить на основе решения обратной задачи теплопроводности [3].

Рассмотрим вариант расчета ТВЭЛа, состоящего из уранового стержня диаметром 7,6 мм (рис. 1). В данной задаче мощность внутреннего источника энергии в стержне будет постепенно увеличиваться до тех пор, пока не достигнет значений, при которых температура будет равна температуре разрушения стержня.

Для сравнения рассмотрим аналогичный ТВЭЛ, но с центральным сквозным отверстием диаметром 2,3 мм, заполненным гелием. Предварительные расчеты показали, что конвективная составляющая внутри отверстия не будет оказывать значительного влияния на результаты, поэтому в дальнейших расчетах учитываться она не будет. Получается, что в отверстии будет учитываться теплообмен излучения прозрачного тела, в данном случае двухатомного газа (гелия) (рис. 2).

Обе задачи решались в 3D постановке, с коэффициентом теплоотдачи на внешней оболочке ТВЭЛа равной $30000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Построим график зависимости температуры (ось x) от плотности энерговыделения (ось y) для обоих ТВЭЛов (рис. 3):

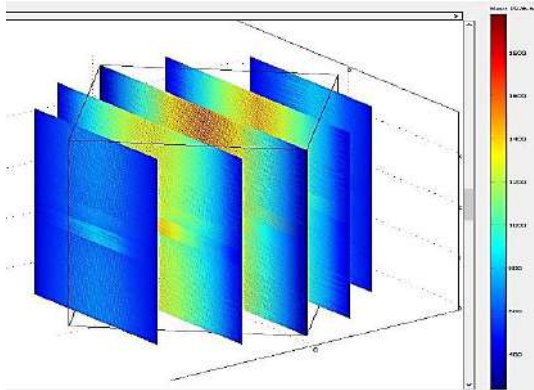


Рис. 1. Температурное поле ТВЭЛа без отверстия

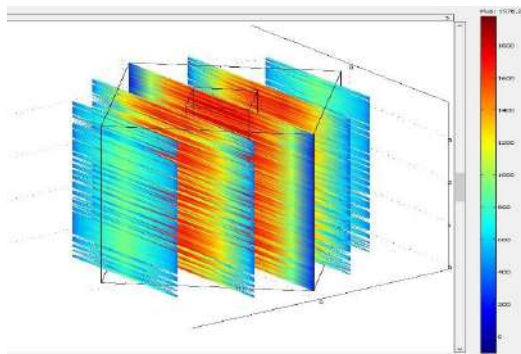


Рис. 2. Температурное поле ТВЭЛа с отверстием

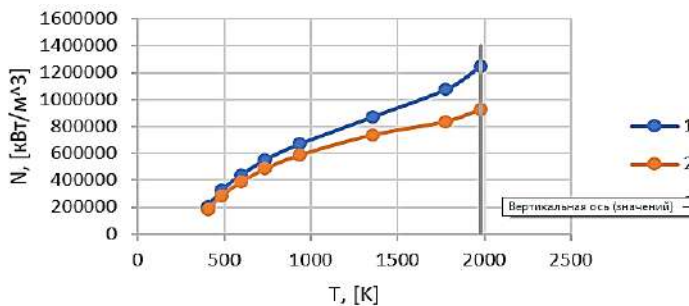


Рис. 3. Зависимость температуры от плотности энерговыделения для обоих ТВЭЛов: 1-линия ТВЭЛа с отверстием, 2-линия ТВЭЛа без отверстия, 3-линия температуры разрушения ТВЭЛов

В результате решения обратной задачи получили, что использование приведенного коэффициента теплопроводности упрощает температурное поле моделируемого ТВЭЛа и значительно сокращает время его расчета.

Литература

1. Горбунов В.А. Моделирование теплогидравлических процессов в ядерных реакторах в Comsol multiphysics
2. Анализ влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблоков АЭС [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2024/03/048-061.pdf>
3. Определение приведенного коэффициента теплопроводности у ТВЭЛа с отвертием / Р.П. Демьяненко, Д.О. Фомичев, рук. В.А. Горбунов // Энергия-2025 Т. 2

УДК: 621.039.5

К.А. БЫКОВ, студент
В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., профессор
А.В. КОЛЕГАНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: Kirill2ek@yandex.ru

К вопросу о предиктивной аналитики главных циркуляционных насосов реактора ВВЭР-1000

Аннотация. Рассмотрена возможность диагностики главных циркуляционных насосов реактора ВВЭР-1000 на основе теплотехнических параметров. Приведено сравнение теплотехнических параметров с вибрационными параметрами, на основе которых существует методика определения надежной работы главных циркуляционных насосов.

Ключевые слова. Главный циркуляционный насос, предиктивная аналитика, теплотехнические параметры, атомная электростанция, коэффициент полезного действия

К.А. BYKOV, student
V.A. GORBUNOV, doctor of technical sciences, professor
A.V. KOLEGANOV, PhD student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskay st., 34
E-mail: Kirill2ek@yandex.ru

On the issue of predictive analytics of the main circulation pumps of the VVER-1000 reactor

Annotation. The possibility of diagnostics of the main circulation pumps of the VVER-1000 reactor based on thermal engineering parameters is considered. A com-

parison of thermal engineering parameters with vibration parameters is given, on the basis of which there is a method for determining the reliable operation of the main circulation pumps.

Key words: Main circulation pump, predictive analytics, thermal engineering parameters, nuclear power plant, efficiency

Рассмотрим работу реактора зарубежной компании «Westinghouse Electric Company» AP1000, аналогичный реактору ВВЭР-1000. AP1000 – американский двухконтурный водо-водяной ядерный реактор (PWR). Данный тип реактора функционирует в Китае (АЭС Саньмэнь, АЭС Хайян) и в Соединенных Штатах Америки (АЭС Вогтль). 22 декабря 2018 года, через месяц после начала коммерческой эксплуатации, вышел из строя один из четырёх главных циркуляционных насосов энергоблока для станции Саньмэнь (КНР), что привело к аварийному отключению реактора автоматикой. Ремонт продолжался около года, и 14 ноября 2019 года в активную зону реактора было загружено топливо для повторного пуска. В результате годичного простоя компания «China National Nuclear Corporation» (Китайская национальная ядерная корпорация), являющаяся оператором станции, понесла убытки в сумме 570 млн долларов.

Таким образом, одной из приоритетных установок с точки зрения безопасности, экономичности и эффективности являются главные циркуляционные насосы реакторов. По анализу предварительных данных, используя штатные приборы, можно определять КПД насоса, при уменьшении которого можно судить о надежности его работы.

Предиктивная аналитика позволяет предсказывать вывод в ремонт оборудования на атомной электрической станции (АЭС) по его состоянию. Данные по работе оборудования АЭС фиксируются в стековой памяти автоматизированной системы управления (АСУ) АЭС. На основе этих данных можно построить модель с применением нейросетевой технологии, которая сможет помочь проводить предиктивную аналитику по необходимости вывода в ремонт оборудования по его состоянию.

В качестве объекта исследования выступает главный циркуляционный насос реактора ВВЭР-1000. В качестве теплотехнических параметров, взятых для оценки эффективной работы главного циркуляционного насоса, выступают: напряжение на секции (U , кВ); перепад давления (ΔP , МПа); расход в петле (G , т/час); ток на электродвигателе (I , А) (табл.1). Оценка эффективной работы проводится на базе анализа коэффициента полезного действия (рис.1) (КПД) насоса. КПД прямо пропорционально зависит от произведения напряжения на секции и тока на электродвигатели, обратно пропорционально от произведения расхода в петле и перепада давлений. Значение теплотехнических параметров для анализа взяты за период с 01 января 2024 года по 10 октября 2024 года.

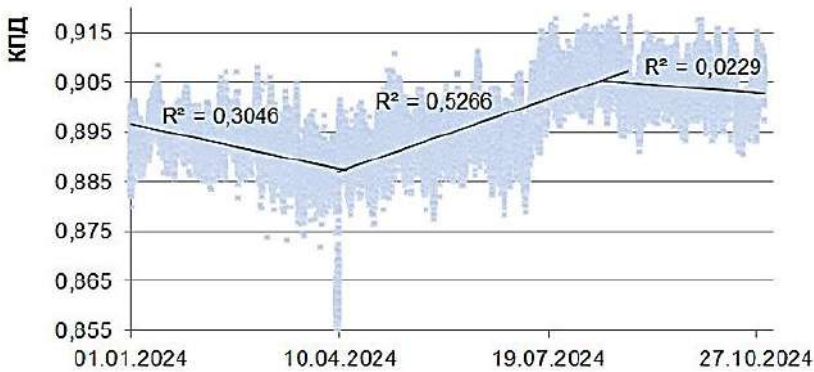


Рис.1. Изменение кпд ГЦН реактора ВВЭР-1000

Таблица 1. Теплотехнические параметры ГЦН реактора ВВЭР-1000

10 минут	U, кВ	I, А	ΔP , МПа	G, т/час	КПД
0:00	6,276	532,806	0,583	16355,935	0,896
0:10	6,277	534,108	0,582	16360,415	0,899
0:20	6,276	534,377	0,583	16393,2281	0,896
0:30	6,259	534,564	0,585	16368,106	0,893

Существует методика определения эффективности работы главных циркуляционных насосов по данным вибрации на электродвигателе [1]. График изменения этого параметра за указанный промежуток представлен на рис. 2.

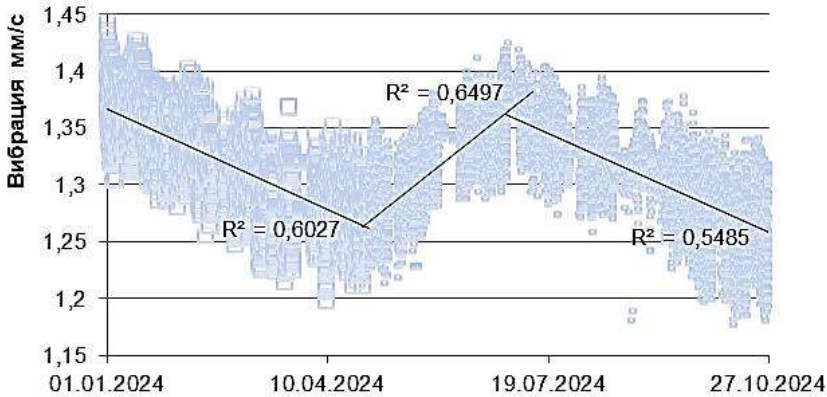


Рис. 2. Вибрация на электродвигателе ГЦН реактора ВВЭР-1000

Предварительный анализ показал, что в указанный промежуток времени, изменение вибрации на электродвигателе соответствует изменению коэффициента полезного действия, что говорит о возможности использования параметра КПД для предиктивной аналитики работы главных циркуляционных насосов.

Литература

1.Зарюгин Д.Г., Лескин С.Т. Разработка алгоритмов диагностики состояния ГЦН АЭС с ВВЭР 1000 по данным оперативного технологического контроля: ИАТЭ, 2001 г., 128 с.

2.Быков К.А., Колеганов А.В., Горбунов В.А. Анализ данных для модели предиктивной аналитики на базе работы главных циркуляционных насосов атомной электрической станции: ИГЭУ им. В.И. Ленина, Энергия, 2025 г.

УДК 66.094.522.8

П.В. РОСЛЯКОВ, д.т.н.
Е.И. ТОМАШОВ¹, аспирант

Общество с ограниченной ответственностью «Интертехэлектро-Проект»
107045, г. Москва, Просвирин переулок, д.4, этаж 2/3
E-mail: Tomashovei@mail.ru

Анализ различных существующих технологий десульфуризации уходящих дымовых газов для действующих и перспективных угольных российских ТЭС

Аннотация. Проведен анализ международного опыта применения различных технологий десульфуризации уходящих дымовых газов тепловых электростанций, работающих на угле с представлением численных значений факторов, влияющих на повышение и/или понижение эффективности десульфуризации. Представлены результаты расчетов удельного потребления реагентов и удельного количества образования побочных продуктов для различных технологий десульфуризации. Показаны технологии, для которых характерно самое большое и самое малое количество образования вторичных парниковых газов (CO_2 и H_2O) на единицу поглощения SO_2 , технологии, характеризующиеся самым большим количеством образования вторичного продукта на единицу поглощения SO_2 , а также потребления исходного реагента.

Ключевые слова: Десульфуризация, сухой метод, мокро-сухой метод, мокрый метод, натрий-щелочной, аммиачный метод десульфуризации, сероочистка уходящих дымовых газов.

P.V. ROSLYAKOV, Doctor of Engineering
E.I. TOMASHOV, graduate student

Limited Liability Company "Intertechelectro-Project"
107045, Moscow, Prosvirin lane, 4, floor 2/3
E-mail: Tomashovei@mail.ru

Analysis of various existing technologies for desulfurization of outlet flue gases for current and prospective coal-fired russian Thermal Power Plants

Abstract. An analysis of international experience in the application of various technologies for desulphurization of flue gases from thermal power plants operating on coal is carried out, with the presentation of numerical values of factors influencing the increase and/or decrease in desulphurization efficiency. The results of calculations of the specific consumption of reagents and the specific amount of by-product formation for various desulfurization technologies are presented. The technologies are shown that are characterized by the largest and smallest amount of secondary greenhouse gas formation (CO_2 and H_2O) per unit of SO_2 absorption, the technologies characterized by the largest amount of secondary product formation per unit of SO_2 absorption, as well as consumption of the initial reagent.

Key words. Desulfurization, dry method, wet-dry method, wet method, sodium-alkaline, ammonia method of desulphurization, desulphurization of flue gases

Национальным проектом «Экология» [1] и федеральным проектом «Внедрение наилучших доступных технологий» [2] поставлены задачи по снижению негативного воздействия работы промышленного производства, в том числе объектов энергетики, на окружающую среду. Согласно ИТС 38-2022 основными маркерными загрязняющими веществами, поступающими в атмосферу от крупных топливосжигающих энергетических установок с проектной входной тепловой мощностью 50 МВт и более, числом часов работы более 1500 час/год являются диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), оксид углерода (CO), зола твердого топлива.

Причиной образования оксидов серы в дымовых газах является наличие серы в химическом составе топлива, что соответственно определяет пути по снижению выбросов диоксида серы – удаление серы из топлива или очистка дымовых газов от диоксида серы. В настоящее время в мире наиболее распространенным является технология удаления диоксида серы (десульфуризация) из уходящих дымовых газов [17].

На сегодняшний день в мире существует множество видов технологий десульфуризации дымовых газов, но только около десяти из них получили практическое воплощение по причинам их адаптивности к таким требованиям как экономичность и простота реализации [12]:

1. Сухой метод десульфуризации в основе которого лежит применение в качестве абсорбента природного известняка (CaCO_3), негашеной извести (CaO) или гашеной извести (Ca(OH)_2).

2. Мокросухой метод десульфуризации – основу составляет применение природного известняка (CaCO_3), негашеной извести (CaO) или гашеной извести (Ca(OH)_2).

3. Мокрый метод десульфуризации – основу составляет применение водной суспензии природного известняка (CaCO_3) или водного раствора гашеной извести (Ca(OH)_2). При этом для устойчивости физико-химических свойств суспензии и раствора применяются органические карбоксильные кислоты. Также в качестве абсорбента применяются смеси гашеной извести (Ca(OH)_2) и гидроксида магния (Mg(OH)_2).

4. Натрий-щелочной метод

5. Аммиачный метод

В целях понимания численного значения объема потребления реагентов и получаемых побочных продуктов, включая увеличение выделения диоксида углерода, водяного пара выполнен сравнительный расчет применения различных технологий для десульфуризации дымовых газов в равных условиях:

1. Принят одинаковый объем дымовых газов ($657\,252\text{ м}^3/\text{ч}$), приведенный к нормальным условиям.

2. В качестве аналога парового котлоагрегата принят котел паропроизводительностью на уровне 800 т/ч , генерирующий пар с параметрами $13,8\text{ МПа}$ и 560°C .

3. Температура уходящих дымовых газов (за воздухоподогревателем) принята 153°C .

4. Расчет объема потребления реагентов и образования побочных продуктов выполнен для идеальных условий (без учета кинетики химической реакции, без учета неполного смешения дымовых газов и абсорбирующего реагента, без учета остатка непрореагировавшего с реагентом диоксида серы).

Все расчеты выполнены на максимальную мощность работы котла и номинальный объем выхода дымовых газов.

Результаты выполненных расчетов представлены в табл. 1 и рис. 1.

Таблица 1. Объемы потребления реагентов и образования побочных продуктов для различных технологий десульфуризации

Наименование метода десульфуризации	$M_{\text{CO}_2}/M_{\text{SO}_2}, \text{ т/т}$	$M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{SO}_2}, \text{ т/т}$	Минимальный / Максимальный прирост запыленности, %	$M_{\text{РЕАГЕНТА}}/M_{\text{SO}_2}, \text{ т/т}$	$M_{\text{ПРОДУКТА}}/M_{\text{SO}_2}, \text{ т/т}$
Сухая технология	0,69	0,00	4,00/50,70	1,56	1,88
Мокросухая технология	0,00	0,28	4,00/50,70	0,88	1,88
Мокрая известковая технология	0,69	0,56	0,00/0,00	1,56	2,69
Натрий-щелочная технология (NaHCO_3)	1,69	0,28	4,20/53,18	2,62	1,97
Натрий-щелочная технология ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Трона))	0,92	0,74	4,20/53,18	2,35	1,97
Аммиачная технология	0,00	0,00	0,00/0,00	0,53	2,06

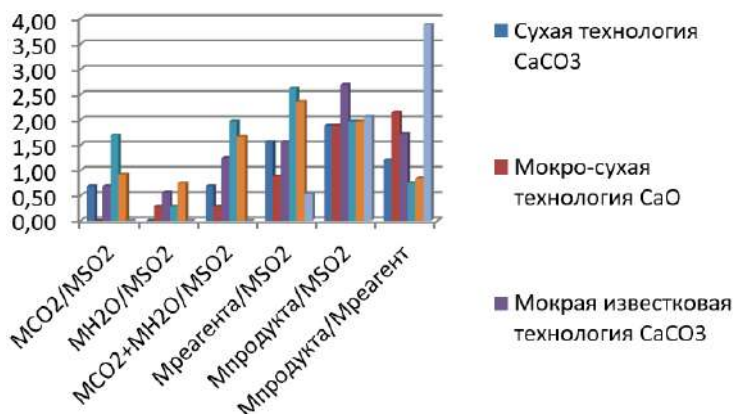


Рис. 1. Сравнение технологий десульфуризации

Из представленных данных можно видеть следующее:

1. Самое большое количество вторичных парниковых газов (CO_2 и H_2O) образуется в натрий-щелочной технологии десульфуризации дымовых газов при использовании в качестве реагента бикарбоната натрия. Так на одну тонну поглощенного диоксида серы образуется 1,69 т диоксида углерода и 0,28 т водяного пара.

2. Аммиачная технология десульфуризации характеризуется полным отсутствием вторичного образования парниковых газов.

3. Самое больше количество реагента на единицу поглощения SO_2 требуется в натрий-щелочной технологии десульфуризации (при использовании бикарбоната натрия в качестве реагента), самое малое – в аммиачной технологии.

4. Самое большое количество вторичного продукта на единицу поглощения SO_2 образуется в мокрой известковой технологии десульфуризации дымовых газов.

5. Самое большое количество образования вторичного продукта на единицу потребления реагента характерно для аммиачной технологии.

6. Сухая технология десульфуризации дымовых газов и натрий-щелочная технология характеризуется увеличением запыленности потока дымовых газов, поступающих на фильтры. Минимальный прирост запыленности дымовых газов составил 4% (для Нерюнгринского угля марки К), максимальный прирост запыленности составил 53,18% (для угля Донецкий Д) десульфуризация дымовых газов от сжигания которого, рассмотрена по натрий-щелочной технологии.

7. Для углей марки Донецкий Г, Донецкий Д, Донецкий А.Ш, Интинский Д для которых уже на действующих котельных установках необходимо снижение объемов выброса диоксида серы на 19,43%+64,84% десульфуризация по сухой технологии или натрий-щелочной техноло-

гии приводит к приросту запыленности на 19.5%÷53.2%, что очевидно требует, в случае реализации на действующих объектах генерации, пересмотра действующей системы пылеулавливания.

8. Аммиачная и мокрая известковая технологии позволяют за счет реализации внешнему потребителю вторичного продукта, выход которого превышает потребление реагента, обеспечивать полный или частичный возврат средств на десульфуризацию, что в свою очередь позволяет минимизировать воздействие работы системы десульфуризации на себестоимость производства электрической и тепловой энергий.

9. Наиболее предпочтительными, с точки зрения минимизации расхода реагентов, максимума выхода вторичного продукта на единицу затраченного реагента, минимума образования вторичных парниковых газов являются технологии в следующем порядке предпочтительности:

- Аммиачная технология десульфуризации;
- Мокрая известковая технология на основе использования известняка;
- Мокросухая технология с использованием в качестве исходного реагента негашеной извести.

Литература

1. Паспорт национального проекта «Экология» [Электронный ресурс] - <http://government.ru/info/35569/>.
2. Паспорт федерального проекта «Внедрение наилучших доступных технологий» [Электронный ресурс] - <http://government.ru/info/15384/>.
3. Методы и технологии очистки дымовых газов от оксидов серы [Электронный ресурс] - <https://studfile.net/preview/1193526/>
4. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDJGVdYt4lgsApssm6mZRb7wx.pdf>
5. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года [Электронный ресурс] - <https://docs.cntd.ru/document/1310847116>
6. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [Электронный ресурс] - <http://government.ru/news/43708/>
7. Информационно-технологический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2024 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии». Утвержден для добровольного применения в РФ приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) № 3227 от 20.12.2022
8. Внедрение наилучших доступных технологий сероочистки и золоулавливания на Российских ТЭС [Текст] / Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Баранов В.В. //Электрические станции 2020. № 6 с.13-20.
9. ПСУ-660. Территория Троицкой ГРЭС [Электронный ресурс] <https://www.ogk2.ru/investitsionnaya-programma/obekty-dpm/psu-660-territoriya-troitskoy-gres/>
10. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.04.2024 № 1068-п. URL: - <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405160025>
11. Интернет газета БЕЗФРМАТА [Электронный ресурс] - <https://vorcuta.bezformata.com/listnews/peresha-na-vorkutinskij-ugol-a-vorkuta/61674153/>
12. Cara Niu. Shandong Mingsheng Chemical Engineering Co., Ltd Comparison of

flue Gas Desulfurization Technologies [Текст] /
https://www.researchgate.net/publication/328279990_Comparison_of_flue_Gas_Desulfurization_Technologies

13. U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory. LI-FAC Sorbent Injection Desulfurization Demonstration Project: A DOE Assessment [Текст] / www.netl.doe.gov

14. Wet Flue Desulfurization Technology Evaluation / Sargent&Lundy – 2003 [Электронный ресурс] - https://www.lime.org/documents/uses_of_lime/wet_fgdt2003.pdf

15. Sodium-based flue gas desulphurization for the South African coal-fired power industry a review / Dursman Mchabe, Burgert B. Hattingh, Lawrence Koech, Hilary Rutto, Hein W.J.P. Neomagus // South African Journal of Chemical Engineering URL: - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1026918524000167>

16. Ammonia-Based Flue Gas Desulfurization [Текст] / Dr. Peter Lu, Dennis McLinden, Jiangnan Environmental Technology Inc. // Power Engineering Boilers URL: – <https://www.power-eng.com/emissions/ammonia-based-flue-gas-desulfurization/>

17. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба (Технологические аспекты) Аналитический обзор / Носков А.С., Савинкина М.А., Анищенко Л.Я. // Академия наук СССР Институт катализа. Институт химии твердого тела и переработки сырья – 1990 с. 40-44.

18. Paul S. Nolan, "Flue Gas Desulfurization Technologies for Coal-Fired Power Plants", Babcock & Wilcox Company, presented by Michael X. Jiang at the Coal-Tech 2000 International Conference, November, 2000, Jakarta, Indonesia. / [Электронный ресурс] - https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/chemical_engineering/Flue_Gas_Desulfurization.pdf

СЕКЦИЯ 9.

ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ

УДК 669.2

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор,
Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент,
М.В. РОДИОНОВА, к.т.н., доцент,
И.И. СВЕТУШКОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

К расчету пузырькового кипения в большом объеме

Аннотация. Даны практические рекомендации по расчету интенсивности теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме (в условиях свободной конвекции). Показано влияние коэффициентов аппроксимации расчетных зависимостей и влияние заданных граничных условий на точность расчета.

Ключевые слова: пузырьковое кипение, большой объем, коэффициент теплоотдачи, рекомендации по уменьшению погрешности расчета

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Technical Sciences,
E.N. BUSHUEV, Doctor of Technical Sciences,
M.V. RODIONOVA, Candidate of Engineering Sciences,
I.I. SVETUSHKOV, PhD student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Towards the calculation of nucleate boiling in a large volume

Annotation. Practical recommendations are given for calculating the intensity of heat transfer during nucleate boiling in a large volume (under free convection conditions). The influence of approximation coefficients of calculated dependencies and the influence of specified boundary conditions on the accuracy of calculation are shown.

Keywords: nucleate boiling, large volume, heat transfer coefficient, recommendations for reducing calculation errors

Профессиональное изучение режимов кипения жидкостей выполнил японский ученый Нукима (1934 г.), который первым экспериментально получил зависимость $q = f_1(\Delta T)$, где q – плотность теплового потока, отводимого от нагревателя (тепловая нагрузка), а ΔT – перегрев стенки. Зависимость $q = f_1(\Delta T)$ в настоящее время называют «кривая кипения» [1]. В 1948 году Э. Фарбер и Р. Скорых построили кривую зависимо-

сти коэффициента теплоотдачи от перегрева стенки $\alpha = f_2(\Delta T)$ формально пересчитав кривую Нуккиямы по закону теплоотдачи Ньютона [2].

Пузырьковое кипение является самым важным режимом кипения с практической точки зрения, потому что оно является единственным способом охлаждения теплонапряженных твердых поверхностей, на которые действуют высокоинтенсивные тепловые потоки. При пузырьковом кипении при относительно небольших температурных напорах ($\Delta T = T_w - T_n$) возможно отводить потоки тепловой энергии большой мощности из-за очень сильной зависимости плотности теплового потока от перегрева стенки $q = f_1(\Delta T)$. При этом ограничением отводимой мощности является значение первой критической плотности теплового потока $q_{кр1}$ при кризисе пузырькового кипения. Известный немецкий ученый Генрих Гребер [3] отмечает, что уже в 30-х годах прошлого века ученые теплотехники сделали вывод о том, что для аппроксимации экспериментальных данных по теплоотдаче при развитом пузырьковом кипении в большом объеме (в условиях естественной конвекции) наиболее удобна степенная зависимость вида:

$$\alpha = C_1 \cdot q^n; \quad (1)$$

$$\alpha = C_2 \cdot \Delta T^m, \quad (2)$$

$$m = \frac{n}{1-n}; m+1 = \frac{1}{1-n}; C_2 = C_1^{m+1}, \quad (3)$$

где C_1 и n – эмпирические коэффициенты, которые зависят от поверхностных свойств теплоотдающей поверхности (шероховатость, смачиваемость), материала поверхности нагрева и наличия примесей в теплоносителе (чистоты кипящей жидкости). Поскольку условия теплообмена при кипении и культура эксперимента у разных исследователей не совпадали, то поэтому в научно-технической литературе приведены экспериментальные значения коэффициента C_1 , лежащие в интервале $C_1 = 2,5 \pm 5$ (наиболее вероятное значение $C_1 = 3 \div 3,5$) и значения показателя степени $n = 0,5 \div 0,8$ (наиболее вероятное значение $n = 2/3 \div 0,7 = 0,67 \div 0,7$) [1–4].

Для оценки погрешности расчета коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении по формулам (1) и (2) выполним числовой расчет для пузырькового кипения воды при атмосферном давлении. Расчет α выполним с коэффициентом $C_1 = 3$ и двумя очень близкими значениями показателя степени $n = 2/3 \approx 0,67$ и $n = 0,7$, которые отличаются всего на $\Delta n \approx 0,03$. Тогда формулы (1) и (2) примут вид:

– при $n = 2/3 \approx 0,67$

$$\alpha = 3 \cdot q^{2/3}; \quad (4)$$

$$\alpha = 27 \cdot \Delta T^2, \quad (5)$$

где $m = \frac{n}{1-n} = \frac{2/3}{1-2/3} = 2$; $C_2 = C_1^{m+1} = 3^{2+1} = 27$;
– при $n = 0,7$

$$\alpha = 3 \cdot q^{0,7}; \quad (6)$$

$$\alpha = 38,8 \cdot \Delta T^{2,33}, \quad (7)$$

где $m = \frac{n}{1-n} = \frac{0,7}{1-0,7} = 2,33$; $C_2 = C_1^{m+1} = 3^{2,33+1} = 38,8$.

Расчет выполним для точки на кривой кипения воды при атмосферном давлении с координатой $q = 10^5$ Вт/м² и для точки с координатой $\Delta T = 10$ К [12], в результате которого получим:

– при $q = 10^5$ Вт/м² и $n = 2/3 \approx 0,67$

$$\alpha = 3 \cdot q^{2/3} = 3 \cdot (10^5)^{2/3} = 6414 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}; \quad (8)$$

– при $q = 10^5$ Вт/м² и $n = 0,7$

$$\alpha = 3 \cdot q^{0,7} = 3 \cdot (10^5)^{0,7} = 9487 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}; \quad (9)$$

– при $\Delta T = 10$ К и $n = 2/3 \approx 0,67$

$$\alpha = 27 \cdot \Delta T^2 = 27 \cdot 10^2 = 2700 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}; \quad (10)$$

– при $\Delta T = 10$ К и $n = 0,7$

$$\alpha = 38,8 \cdot \Delta T^{2,33} = 38,8 \cdot 10^{2,33} = 8295 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}. \quad (11)$$

Сравнивая результаты расчета α по формуле (1) при $n = 2/3 \approx 0,67$ [$\alpha = 6414$ Вт/(м²К)] и при $n = 0,7$ [$\alpha = 9487$ Вт/(м²К)], можно сделать вывод о том, что, принимая за базовое значение результат, полученный при $C_1 = 3$ и $n = 0,7$, как наиболее часто применяемый в расчетах, несовпадение коэффициентов теплоотдачи, рассчитанное «через q », с показателем степени, отличающимся на $\Delta n \approx 0,03$, весьма значительное и составляет $\Delta \alpha = |3073|$ Вт/(м²К) или $\Delta \alpha, \% \approx 32\%$.

Аналогично сравнивая результаты расчета α по формуле (2) при $n = 2/3 \approx 0,67$ [$\alpha = 2700$ Вт/(м²К)] и при $n = 0,7$ [$\alpha = 8295$ Вт/(м²К)], можно сделать вывод о том, что, принимая за базовое значение результат, полученный при $C_1 = 3$ и $n = 0,7$, несовпадение коэффициентов теплоотдачи, рассчитанное «через ΔT », с показателем степени,

отличающимся на $\Delta p \approx 0,03$, весьма значительное и составляет $\Delta \alpha = |5595| \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ или $\Delta \alpha, \% \approx 67\%$.

Анализируя результаты расчета (8) – (11) можно сделать вывод о том, что погрешность расчета коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении при фиксированных значениях тепловой нагрузки по формулам (1) – (2) может достигать величины (от некоторого среднего значения) не менее $\pm 30\%$, потому что условия расчета теплообменного аппарата и условия получения эмпирической формулы не совпадают.

При этом отметим, что, *во-первых*, несмотря на достаточно узкий интервал значений показателя степени $n = 0,67 \div 0,7$ *неточность* задания показателя степени n приводит к значительной погрешности (более 30%) расчетного значения коэффициента теплоотдачи. *Во-вторых*, эмпирические коэффициенты C_1 и n связаны между собой в процессе выполнения самой процедуры аппроксимации опыта. Поэтому при использовании эмпирических формул для расчета коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении разных научных школ надо строго использовать рекомендованные значения C_1 и n . Например, если указано автором формулы, что $n = 2/3$, то нельзя округлять n до значение $n = 0,7$! При аппроксимации эксперимента используют оба значения показателя степени C_1 и $n = 0,7$, поэтому необходимо строго выполнить указание автора формулы.

Сравнивая результаты расчета α по формулам (1) «через q » (граничные условия II рода) и по формулам (2) «через ΔT » можно отметить, что расчет α по формулам (2) «через ΔT » (граничные условия I рода) приводит к большей погрешности расчета по сравнению с расчетом по формулам (1) «через q ». Особо заметим, что на это обстоятельство обращали внимание уже давно в 50-е годы прошлого века известные теплотехники Гребер, Эрк и Григуль [3].

Для уменьшения погрешности расчета α можно рекомендовать также формулы типа (1), зависящие от материала поверхности и рода жидкости, то есть полученные для конкретной пары материал-жидкость, например, бензол кипит на поверхности из хрома или вода кипит на латунной поверхности [4].

Вывод. Выполнен анализ точности расчета коэффициента теплоотдачи α при развитом пузырьковом кипении жидкости в большом объеме и показано, что расчет α при граничных условиях II рода обладает меньшей погрешностью по сравнению с расчетом α при граничных условиях I рода.

Литература

1. Мак-Адамс Вильям Х. Теплопередача / Вильям Х. Мак-Адамс. М.: МЕТАЛЛУРГИЗДАТ, 1961. 686 с.

2. Сапожников, С.З. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для вузов / С.З. Сапожников, Э.Л. Китанин. СПб.: Изд-во СПб ГТУ, 1999. 319 с.
3. Гребер, Г. Основы учения о теплообмене / Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль. М.: Иностранная Литература, 1958. 566 с.
4. Маньковский, О.Н. Теплообменная аппаратура химических производств / О.Н. Маньковский, А.Р. Толчинский, М.В. Александров. Л.: Химия, 1976. 368 с.

УДК 536.24

И.О. ОДИНЦОВ¹, аспирант,
А.Б. ГАРЯЕВ¹, д.т.н.,
А.А. АРБАТСКИЙ², к.т.н.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250 г. Москва, Красноказарменная, 17

²Научно-исследовательский институт
«Энергоэффективных технологий микроклимата»
390029, г. Рязань, ул Чкалова, д. 68в
E-mail: OdintsovIO@mpei.ru

Параметрическая оптимизация конвектора

Аннотация: В работе приведены результаты параметрической оптимизации трубчатого оперённого конвектора. Предоставлено поле оптимальной конфигурации конвектора при использовании модели идеальных ребер.

Ключевые слова: свободная конвекция, теплообмен в канале, оптимизация конвектора.

I.O. ODINTSOV¹, Ph.D. candidate,
A.B. GARYAEV¹, Doctor of Engineering,
A.A. ARBATSKIY², Ph.D.

¹Moscow Power Engineering Institute
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17

²Scientific Research Institute of "Energy-efficient Microclimate Technologies"
390029, Ryazan, Chkalova St, 68b
E-mail: OdintsovIO@mpei.ru

Parametric optimization of the convector

Abstract: The results of parametric optimization of a tubular feathered convector are presented. The field of optimal convector configuration is provided when using the ideal rib model.

Key words: free convection, heat transfer in the channel, convector optimization.

Оребренные трубчатые конвекторы представляют собой важный элемент систем отопления и теплообменных устройств, широко используемых в промышленности и бытовом секторе. Отечественная

промышленность активно производит данный вид оборудования, однако процесс их изготовления требует определённого количества металла, что отражается на себестоимости продукции и ресурсоемкости производства.

Снижение металлоёмкости конвекторов является актуальной задачей, так как это позволяет добиться ряда значительных преимуществ. Во-первых, уменьшение объема используемого металла позволяет снизить общую металлоёмкость производства, что способствует экономии ресурсов и снижению производственных затрат. Во-вторых, сокращение потребности в металле уменьшает затраты топлива, необходимые для выплавки, транспортировки и обработки металла.

Рассмотрим оребренный радиатор типового вида, состоящий из центральной трубки и определённого количества рёбер, равномерно расположенных по её длине. Будем предполагать, что температура поверхности как рёбер, так и трубки остаётся постоянной и неизменной в процессе теплообмена, что соответствует модели идеальных рёбер.

В качестве целевой функции в исследовании используется отношение теплового потока Q , передаваемого устройством, к его массе m (1).

$$\frac{Q}{m} = \max \quad (1)$$

В данном случае этот параметр применяется как критерий оценки эффективности теплообмена. Эта целевая функция выбрана благодаря её способности количественно характеризовать эффективность теплоотвода на единицу массы оребренного радиатора.

В качестве инструмента анализа применяется эмпирическая формула (2) с областью применения в диапазоне числе Рэлея $6,5 \leq Ra^{\frac{1}{4}} \leq 1335$, полученная авторами [1].

$$Nu = 0,768 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} - 0,854 \quad (2)$$

$$Ra = \frac{\delta^3 \cdot \beta \cdot g \cdot dt \cdot \rho^2 \cdot \delta}{a \cdot \nu \cdot h}$$

где, δ – расстояние между пластинами, м; β – коэффициент теплового расширения, $\frac{1}{^\circ\text{К}}$; g – ускорение свободного падения; $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; ρ – плотность жидкости; $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; a – коэффициент температуропроводности; $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; ν – кинематическая вязкость; $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; h – высота ребра; м

Данная формула применима для центральной трубки с внешним диаметром 28 мм.

Масса рассматриваемого устройства в общем случае складывается из двух основных компонентов: массы трубки и суммарной массы всех рёбер. В качестве материала пластин и трубки взята сталь с плотностью $\rho_m = 7750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Для случая с идеальными ребрами, уменьшение толщины ребра и толщины стенки трубки приведёт к снижению общей массы конструк-

ции, но никак не повлияет на передаваемый тепловой поток. Это способствует увеличению значения целевой функции. Однако минимизация толщин этих элементов имеет определённые ограничения, обусловленные технологическими возможностями производства, а также требованиями к механической прочности и устойчивости конструкции. Таким образом, достижение нулевых или близких к нулю значений толщин невозможно.

Поэтому толщину ребра принимаем равной $s = 0,1$ мм, а толщину стенки трубки принимаем равной $\Delta = 2$ мм. Будем рассматривать рёбра исключительно квадратной формы, то есть с равными высотой и шириной ($h = b$). Длина оребрённого радиатора принимается постоянной и составляет $L = 1000$ мм. Температура окружающего воздуха постоянна и равна 20°C . Размер ребра, температура поверхности и расстояние между пластинами является переменными параметрами.

Для исследуемой целевой функции целесообразно применение метода полного перебора параметров, поскольку функция имеет один ярко выраженный экстремум.

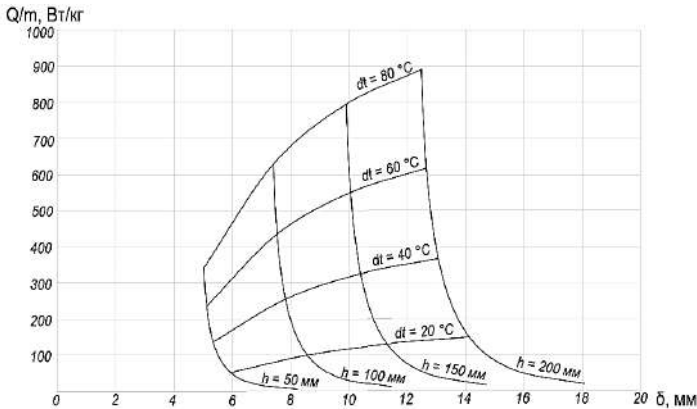


Рис. 1. Поле оптимальных параметров

Вывод: таким образом, по результатам параметрической оптимизации было получено поле оптимальных параметров трубчатого оребренного конвектора (рис. 1). По полученному графику можно сделать вывод, что для достижения максимального значения целевой функции при уменьшении размера пластин h следует так же уменьшать расстояние между пластинами δ . Так же, при уменьшении температуры пластины, или температурного напора dt оптимальные параметры находятся при больших значениях расстояния между пластинами δ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

1. Karami M., Yaghoubi M., Keyhani A. Experimental study of natural convection from an array of square fins // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018. Т. 93. С. 409-418.

УДК 621.565.83

В.О. ИЛЬЕНКОВА, студент,
Н.М. САВЧЕНКОВА, к.т.н.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1
E-mail: llyenkovaVO@mpei.ru

Моделирование тепловых процессов в тепловом интерфейсе контурной тепловой трубы с использованием ANSYS

Аннотация. В работе проведена оценка степени неоднородности поля температур на термоконтактной поверхности теплового интерфейса, получены численные результаты в программе ANSYS.

Ключевые слова: контурная тепловая труба, тепловой интерфейс, испаритель.

V.O. ILYENKOVA, student,
N.M. SAVCHENKOVA, Ph.D.

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st.114, 1
E-mail: llyenkovaVO@mpei.ru

Modeling of thermal processes in the thermal interface of a contoured heat pipe using ANSYS

Abstract. The article presents an assessment of the degree of heterogeneity of the temperature field on the thermocontact surface of the thermal interface, numerical results are obtained in the ANSYS program.

Keywords: loop heat pipe, thermal interface, evaporator.

Системы охлаждения, предназначенные для отвода тепла от аппаратуры, являются одними из основных элементов преобразовательного устройства, во многом определяющими его надежность и долговечность [1].

Контурные тепловые трубы (КТТ) – это герметично-замкнутые, пассивные, двухфазные устройства, предназначенные для эффективной

передачи тепла от горячего источника к холодному стоку даже при незначительной разнице температур между ними [2]. КТТ работают по испарительно-конденсационному циклу. Прокачка теплоносителя в них осуществляется за счет капиллярного давления, создаваемого менисками пористой структуры (фитиля), которая в отличие от обычных тепловых труб размещается только в зоне подвода тепла.

Применение КТТ в составе системы обеспечения теплового режима различных космических аппаратов позволяет снизить массу и энергопотребление систем. Вместе с тем высокая надёжность КТТ обеспечивает их бесперебойную работу в течение всего жизненного цикла космического аппарата [3].

Ключевым элементом КТТ является испаритель, определяющий ее работоспособность и эффективность. Несмотря на разнообразие конфигураций испарителей, их цилиндрическая форма может создавать трудности при охлаждении плоских тепловыделяющих элементов, требуя применения дополнительных компонентов для обеспечения оптимального теплового контакта. Этот дополнительный элемент сопряжения плоской поверхности горячей поверхности объекта и цилиндрической поверхности испарителя называется тепловым интерфейсом или «седлом». В данной работе рассматривается модель теплопереноса в тепловом интерфейсе, а также сравниваются различные материалы, из которых он изготовлен.

Тепловой интерфейс КТТ имеет центральное сквозное цилиндрическое отверстие, в которое встроен испаритель [2].

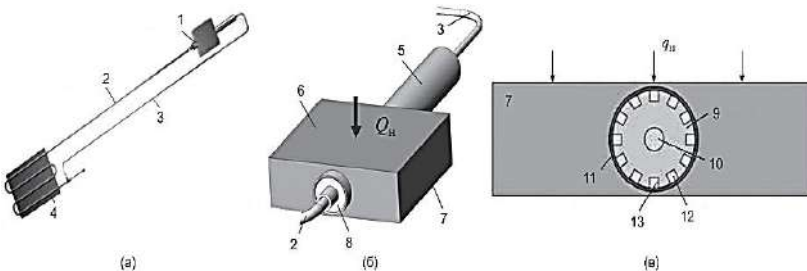


Рис. 1. Внешний вид КТТ (а), цилиндрический испаритель с прямоугольным тепловым интерфейсом (б), модель испарителя с тепловым интерфейсом (в):

- 1 – испаритель с интерфейсом, 2 – паропровод, 3 – конденсатопровод,
- 4 – конденсатор, 5 – компенсационная полость, 6 – поверхность нагрева,
- 7 – интерфейс, 8 – испаритель, 9 – фитиль, 10 – центральный канал, 11 – корпус,
- 12 – пароотводные каналы, 13 – поверхность испарения

В программе Ansys была смоделирована модель теплового интерфейса, а также вручную построена расчетная сетка размером 0,7 мм. Поведение сетки – soft. Вид элементов сетки – тетраэдральные.

Предполагается, что между испарителем и интерфейсом имеет место идеальный тепловой контакт, а длина зоны нагрева испарителя равна длине интерфейса.

Таблица 1. Основные геометрические размеры и значения ТФС

Длина, ширина и толщина интерфейса	40×40×12	мм
Площадь поверхности нагрева	40×40	мм ²
Теплопроводность интерфейса (Cu, Al, Steel)	380, 210, 45	Вт/(мК)
Диаметр испарителя	10	мм
Температура пара	40	°C
Теплоноситель	Фреон 152a	

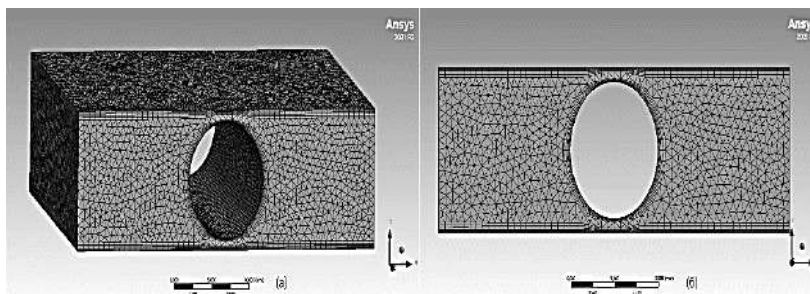


Рис. 2. Расчетная сетка для рассматриваемого теплового интерфейса (а) и исследуемой области (б)

Плотность теплового потока, подводимого к термоконтakтной поверхности интерфейса (ТПИ), в расчетах менялась от 2,25 до 12,25 Вт/см². Расчет проведен для медного, алюминиевого и стального интерфейсов. Все остальные параметры модели оставались неизменными.

Ниже представлено температурное поле интерфейса в сечении, перпендикулярном продольной координате при минимальном тепловом потоке. Центральная область, занимаемая испарителем, исключена из рассмотрения.

Наиболее холодной зоной на нагреваемой поверхности интерфейса является его центральная часть. Это обстоятельство следует учитывать, например, при термостатировании охлаждаемого объекта, и осуществлять контроль прежде всего температуры удаленных от центра областей, как наиболее теплонпряженных. Увеличение плотности теплового потока на теплопроводящей поверхности интерфейса приводит к повышению неравномерности распределения температуры на этой поверхности.

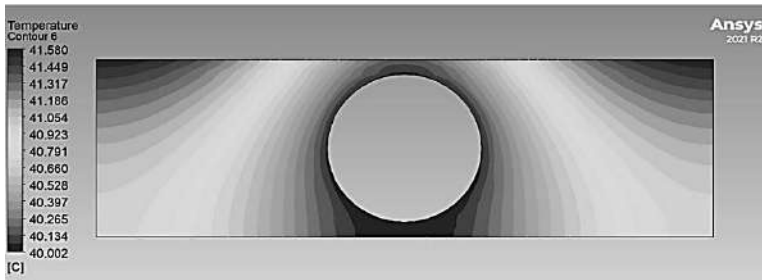


Рис. 3. Температурное поле алюминиевого интерфейса при плотности теплового потока $q = 2,25 \text{ Вт/см}^2$ и температуры теплоносителя $T_s = 40^\circ\text{C}$.

Таблица 2. Значения температур на границе и в центре интерфейса

Материал	$q_n [\text{Вт/см}^2]$	$T_{\min} [^\circ\text{C}]$	$T_{\max} [^\circ\text{C}]$	$\Delta T [^\circ\text{C}]$
Al	2,25	40,002	41,580	1,578
	4,25	40,004	42,984	2,98
	6,25	40,006	44,389	4,383
	8,25	40,008	45,793	5,785
	10,25	40,010	47,198	7,188
Cu	12,25	40,013	48,602	8,589
	2,25	40,003	40,880	0,877
	4,25	40,006	41,663	1,657
	6,25	40,009	42,446	2,438
	8,25	40,012	43,228	3,216
Steel	10,25	40,015	44,011	3,996
	12,25	40,018	44,794	4,776
	2,25	40,001	59,697	19,696
	4,25	40,002	77,207	37,205
	6,25	40,003	94,717	54,714
Steel	8,25	40,004	112,226	72,222
	10,25	40,005	129,736	89,731
	12,25	40,006	147,246	107,24

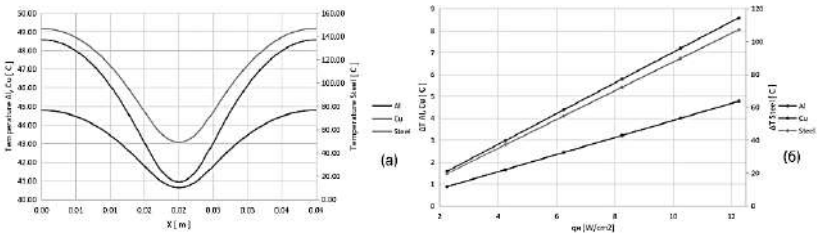


Рис. 4. Температура на ТПИ при $q = 12,25 \text{ Вт/см}^2$ (а), максимальные перепады температуры на ТПИ из алюминия, меди и стали при изменении плотности теплового потока (б).

Результаты показали, что использование более теплопроводных материалов для интерфейса снижает степень неравномерности теплообмена в испарителе, повышая эффективность его работы.

Литература

1. Савченкова Н.М., Симоненков А.И. Расчет плоской тепловой трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры. Энергосбережение – теория и практика. Москва, 2022, с. 124-127.

2. Чернышева М.А., Майданик Ю.Ф. Теплофизика высоких температур, 2021, том 59, № 3, с. 362–372.

3. Басов А.А., Гончаров К.А., Елчин А.П., Лексин М.А., Мякочин А.С., Овчинников Д.Н., Прохоров Ю.М. Опыт применения контурных тепловых труб для обеспечения теплового режима долгоживущих космических аппаратов. Космическая техника и технологии, 2023, № 4 (43), с. 28-35.

УДК 31.3

А.Д. ЛОБОВ, аспирант,
В.С. ГЛАЗОВ, к.т.н. доцент,
Ч.А. КАДЫРОВ, к.т.н. доцент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
E-mail: andreylbov6@gmail.com

Влияния направленной излучательной способности на величину теплового потока, исходящего от конвектора

Аннотация. Отмечается, что ни один из двух обычно используемых методов теплового расчета конвекторов не учитывает направленную излучательную способность материала, из которого изготовлен отопительный прибор и краситель, покрывающего его поверхность. В задачу работы входит определение долей составляющих теплового потока и оптимальных параметров кольцевых ребер, расположенных на несущей поверхности, при которых обеспечиваются экстремальные значения составляющих теплового потока, влияющих на его общую величину.

Ключевые слова: конвектор, конвекция, излучение, оптимизация, тепловой поток.

A.D. LOBOV, graduate student,
B. C. GLAZOV, Ph.D., Associate Professor,
Ch. A. KADYROV, Ph.D., Associate Professor

National Research University "MPEI",
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14, p. 1.
E-mail: andreylbov6@gmail.com

Influence of the directional emissivity on the heat flux from the convector

Abstract. It is noted that none of the two commonly used methods of thermal calculation of convectors takes into account the directional emissivity of the material from which the heater is made and the dye covering its surface. The task of the work is to determine the proportions of the components of the heat flow and the optimal parameters of the annular ribs located on the bearing surface, which ensure the extreme values of the components of the heat flow, affecting its total value.

Key words: convector, convection, radiation, optimization, heat flux.

Введение. В настоящее время основным направлением развития энергетики является повышение эффективности энергоустановок. Существуют несколько различных способов повышения эффективности теплообменного оборудования, одним из которых является развитие площади теплообмена путем её оребрения. Такой способ позволяет увеличить величину теплового потока без значительного увеличения габаритов самого теплообменного аппарата. При анализе современной литературы, посвященной методам теплового расчета оребренных теплообменных аппаратов, было выяснено, что рекомендуется либо проводить только конвективный расчет, в рамках которого доля теплообмена излучением не учитывается вовсе, либо учитывается суммарно в коэффициенте теплоотдачи. Таким образом, при определении оптимальных параметров ребер, обеспечивающих экстремальное значение величине лучисто-конвективного теплового потока, исходящего от оребренной поверхности, не учитываются форма, размер и шаг расположения ребер на несущей поверхности. Более того, процедура оптимизации проводится без учёта направленной излучательной способности материала ребер.

Постановка задачи. Определить оптимальные параметры для портящегося элемента однострунного конвектора в трех разных условиях теплообмена с внешней средой: при свободной конвекции (а), лучистом теплообмене (b) и лучисто-конвективном теплообмене (с). Во всех трех случаях температуры греющего теплоносителя и воздуха внутри помещения приняты соответственно равными 80 и 20 градусов по Цельсию. Варьирование размеров внешних радиусов термически тонких кольцевых ребер R и несущей их трубки δ допускается в диапазонах типичных для конвекторов. Предполагается, что направленная излучательная способность поверхности материала ребер соответствует данным работы Спэрроу Э.М. и Сесс Р.Д. [1].

Решение. На рис. 1 представлен скриншот функции для определения величины теплового потока, исходящего от кольцевого круглого ребра с прямоугольным профилем. Функция разработана в среде Mathcad по математической модели [2], в которую введено дополнительное условие, связывающее толщину Δ и высоту $b=R-\delta$ кольцевого ребра заданной массы M (или пропорционально площади его профиля $S=h\Delta$) при возможности варьирования такими параметрами как коэффициент теплоотдачи α , плотность материала ребра ρ , его высота h и толщина Δ , а также коэффициент теплопроводности λ .

$$\begin{aligned}
 Q := & \left\{ \begin{array}{l} \theta_0 \leftarrow t_0 - t_\infty \\ \Delta \leftarrow \frac{M}{\rho \cdot \pi (R - \delta)} \\ m \leftarrow \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\lambda \cdot \Delta}} \\ \psi \leftarrow \frac{I1(m \cdot R) \cdot K1(m \cdot \delta) - I1(m \cdot \delta) \cdot K1(m \cdot R)}{I0(m \cdot \delta) \cdot K1(m \cdot R) + I1(m \cdot R) \cdot K0(m \cdot \delta)} \\ \text{exit} \leftarrow 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot \lambda \cdot \delta \cdot m \cdot \theta_0 \cdot \psi \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Рис.1. Скриншот функции для расчета теплового потока, исходящего от кольцевого ребра во внешнюю среду

Влияние малого и большого радиусов, а, следовательно, и высоты прямоугольного кольцевого ребра на величину его теплоотдачи (конвективного теплового потока) представлено на рис. 2.

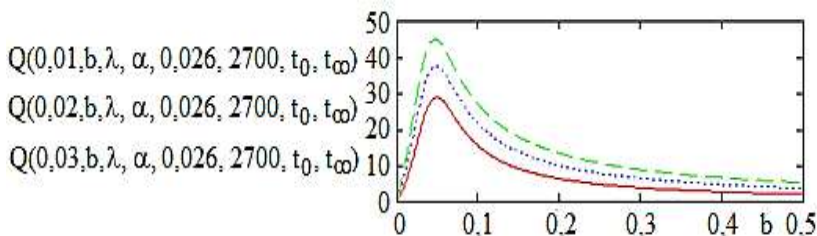


Рис.2. Зависимость конвективного теплового потока от высоты кольцевого ребра при фиксированных значениях $\delta, \lambda, \alpha, M, \rho, t_0, t_\infty$

Видно, что увеличение малого радиуса r_1 прямоугольного кольцевого ребра не меняет его оптимальную высоту, которой соответствует максимальный тепловой поток, но увеличивает его величину.

На рис. 3 представлены результаты оцифровки данных из [1] в среде Mathcad

Основываясь на зависимости излучательной способности материала ребра от направления излучения, был проведен тепловой расчет, в результате которого составлен график влияния высоты ребра на величину лучистого теплового потока.

Как видно из рис. 4 для лучистого теплового потока тоже характерно наличие пикового значения величины потока в зависимости от высоты ребра.

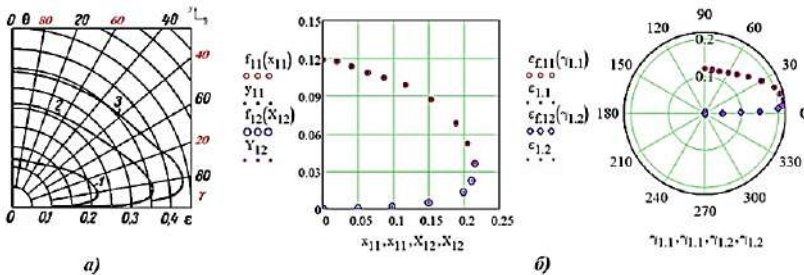


Рис. 3. Направленная излучательная способность поверхности ребра (а) [1] и результат её оцифровки в среде Mathcad (б)

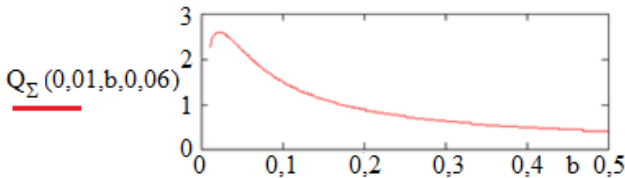


Рис. 4. Зависимость величины лучистого теплового потока от высоты одиночного кольцевого ребра

Заключение. В результате проведенного исследования, было выявлено наличие пиков тепловых потоков конвекции и излучения от кольцевого ребра, помимо этого было установлено, что доля теплового потока излучением в пике составляет более 5% от теплового потока конвекцией, таким образом расчетом излучения нельзя пренебрегать. Геометрию же ребер следует подбирать так что бы она соответствовала оптимальному соотношению пика тепловых поток излучением и конвекцией.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

1. Теплообмен излучением / Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. // Энергия Л.: 1971, с. 282.
2. Тепловой расчет обреченных поверхностей / Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин; под ред. В.Г. Фастовского. Москва: Энергия, 1977. с. 254
3. Оптимизация ребер разной формы /А.А. Кобзева, А.Д. Лобов, В.С. Глазов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать седьмая Междунар. Науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (11-12 марта 2021 г., Москва): Тез. Докл. М.: Изд. дом МЭИ, 2021. с. 670.
4. Влияние направленной излучательной способности на теплоотдачу излучением от однотрубного конвектора// А.А. Мхоян, В.С. Глазов // Тезисы докладов IX Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение - теория и практика» (Москва, 5-12 октября 2018 г.). С. 102-108.

УДК 62-971

Н.О. БОРЩЕВ, к.т.н.,
Л.А. ФЕДОСЕЕВ, студент,
Р.Ф. РАХИМОВ, студент,
И.А. БЕЛЯЕВ, к.т.н.,
М.Ж. СУЛЕЙМАНОВ, к.т.н.

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2
Email: www.moriarty93@mail.ru

Метод параметрической идентификации теплопередающей способности тепловых аккумуляторов

Аннотация: В данной работе представлен метод параметрической идентификации эффективного коэффициента теплопроводности пальмитовой кислоты, используемой в качестве теплоносителя в тепловом аккумуляторе, работающем на принципе плавление – кристаллизация. Коэффициент теплопроводности ищется как произведение его параметризованного значения на соответствующую базисную функцию, учитывающую его зависимость от температуры. Задача идентификации исследуемой величины решается в экстремальной постановке на основе минимизации среднеквадратичной ошибки между теоретическим и экспериментальным температурным полем в местах установки датчиков температур. В качестве численного метода оптимизации выбран метод сопряженных направлений как наиболее точный метод первого порядка сходимости.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, пальмовая кислота, метод сопряженных направлений, метод итерационной регуляризации

N.O. BORSHCHEV, Candidate of Technical Sciences,
L.A. FEDOSEEV, student,
RAKHIMOV R. F., student,
I.A. BELYAEV, Candidate of Technical Sciences,
M.J. SULEYMANOV, Candidate of Technical Sciences

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
Izhorskaya st. 13 Bld.2, Moscow, Russia, 125412
Email: moriarty93@mail

Method of parametric identification of heat transfer capacity of thermal accumulators

Abstract: This paper presents a method for parametric identification of the effective coefficient of thermal conductivity of palmitic acid used as a heat carrier in a thermal accumulator operating on the melting–crystallization principle. The coefficient of thermal conductivity is sought as the product of its parameterized value by the corresponding basic function, taking into account its dependence on temperature. The problem of identifying the quantity under study is solved in an extreme formulation based on minimizing the root-mean-square error between the theoretical and experimental temperature field at the temperature sensor installation sites. The conjugate

directions method is chosen as the numerical optimization method as the most accurate method of the first order of convergence.

Key words: thermal accumulator, palm acid, conjugate directions method, iterative regularization method.

1. Тепловая физико-математическая модель теплового аккумулятора

Рассмотрим ТА при несимметричном двустороннем тепловом нагреве, теплоносителем в котором является пальмитовая кислота. Принципиальная тепловая расчетная схема теплового аккумулятора представлена на рис. 1.

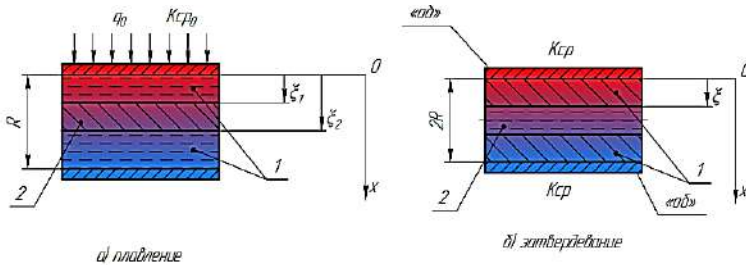


Рис. 1. Тепловая расчетная схема теплового аккумулятора (ТА)

При идентификации коэффициента теплопроводности от поверхности корпуса аккумулятора к теплоносителю, необходимо сперва решить «прямую» задачу теплового режима изделия. Тепловая физико-математическая модель устройства при допущениях о однонаправленном нагреве, а также без учета теплового расширения материала корпуса ТА представлена ниже. Тепловая физико-математическая модель без учета термогравитационной конвекции [1-5]:

Для теплового аккумулятора:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{12}(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{C_{12}(T_{12})\rho} \frac{\partial}{\partial x} [\lambda_{12}(T_{12}) \frac{\partial T_{12}(x, \tau)}{\partial x}]; T_{12}(x, 0) = T_0; \\ \lambda_1(T_{12}) \frac{\partial T_{12}(\xi_{12}, \tau)}{\partial x} &= \lambda_2(T_{12}) \frac{\partial T_2(\xi_{12}, \tau)}{\partial x} - r\rho_2 \frac{\partial \xi_{12}(\tau)}{\partial \tau}; \\ \lambda_1(T_{12}(0, \tau)) \frac{\partial T_{12}(0, \tau)}{\partial x} &= k_{12}(T_{oo}(\tau) - T_{12}(0, \tau)); \end{aligned}$$

Для оболочки:

$$\lambda_1(T_{12}(0, \tau)) \frac{\partial T_{oo}(\tau)}{\partial \tau} = k_{12}(T_{12}(0, \tau) - T_{oo}(\tau)) + k_{cp}(T_w - T_{12}(\tau)); T_{oo}(0) = T_0;$$

Тепловая физико-математическая модель с учетом термогравитационной конвекции:

Для теплового аккумулятора:

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C_2(T_2)\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \right]; T_2(x, 0) = T_0;$$

$$\frac{\partial T_2(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\alpha_{об}(T_1 - T_{об}(\tau)); T_2(0, \tau) < T_{кр};}{\rho_2 r \frac{\partial \xi(\tau)}{\partial \tau} = \lambda_2(T_2(\xi, \tau)) \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial x} + \alpha_{кр}(T_1(\tau) - T_{об}(\tau)); T_2(0, \tau) = T_{кр}; 0 = \xi};$$

$$\frac{\partial T_2(l_x, \tau)}{\partial x} = \frac{\alpha_{об}(T_1 - T_{об}(\tau)); T_2(l_x, \tau) < T_{кр};}{\rho_2 r \frac{\partial \xi(\tau)}{\partial \tau} = \lambda_2(T_2(\xi, \tau)) \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial x} + \alpha_{кр}(T_1(\tau) - T_{об}(\tau)); T_2(l_x, \tau) = T_{кр}; l_x = \xi};$$

Для оболочки:

$$C_{об}\rho_{об}\delta_{об} \frac{\partial T_{об}(\tau)}{\partial \tau} = q + K_{об}(T_w - T_{об}(\tau)) + \alpha_{об}(T_1 - T_{об}(\tau));$$

Для теплоносителя:

$$C_{1,2}\rho_{1,2}\xi_1 \frac{\partial T_1(\tau)}{\partial \tau} = \alpha_{об}(T_1 - T_{об}(\tau)) + \alpha_{кр}(T_{кр} - T_1(\tau)); T_1(0) = T_0;$$

$C_{1,2}$ – удельная теплоёмкость для теплоаккумулирующего вещества (Дж/(кг·К)) для твердой и жидкой фаз; $\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности для теплоаккумулирующего вещества для твердой и жидкой фаз, Вт/(м·К); $T_{1,2}$ – температура для теплоаккумулирующего вещества в твердой и жидкой фазах, К; $\rho_{1,2}$ – плотность твердой и жидкой фазы

вещества в ТА, кг/м³; τ – время, с; x – координата, м; g – скрытая теплота плавления, Дж/кг; $K_{об}$ – коэффициент теплопередачи, Вт/К; $T_{об}$ – температура оболочки ТА, К;

Данная система уравнений решается численно при линеаризации лучисто – конвективного теплового потока относительно температуры, взятой с предыдущего временного слоя. Частное дифференциальное уравнение для плавящегося вещества решается конечно - разностным методом неявной схемой путем решения семейства линейных уравнений методом прогонки. Обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие изменение среднеобъемной температуры оболочки ТА и теплоносителя, решаются методом Рунге – Кутты 4 порядка точности.

Параметрическая идентификация коэффициента теплопроводности в ТА

Представим зависимость коэффициента эффективной теплопроводности теплоаккумулирующего вещества в ТА как функцию от температуры при аппроксимации линейно-непрерывными базисными функциями в следующем виде [1,2]:

$$\lambda(T) = \sum_{m=1}^M \lambda_p N_m(T);$$

Рассмотрим восстановление эффективного коэффициента теплопроводности (с начала эффекта термической реакции плавления) на основе среднеквадратичного функционала невязки между теоретическим и экспериментальным полем температур [1,2]:

$$S(\lambda_p) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{m=1}^M [T(\lambda_p, \bar{x}, \bar{\tau}) - \bar{T}(\bar{x}, \bar{\tau})]^2 d\tau;$$

В работе используется метод безусловной минимизации функционала S с помощью метода сопряженных градиентов, как наиболее точного метода первого порядка точности, позволяющего достичь требуемой сходимости за минимальное число итераций.

2. Анализ вычислительных свойств метода

Для проведения валидации разработанного метода рассмотрен модельный эксперимент с ТА, работающем на пальмитовой кислоте, где при фазовом переходе имеет место термогравитационная конвекция. В работе [3] рассмотрен теплофизический эксперимент по определению теплового состояния данного устройства на установке с использованием хромель – алюмелевых датчиков температур, принципиальный вид которой изображен на рис. 2.

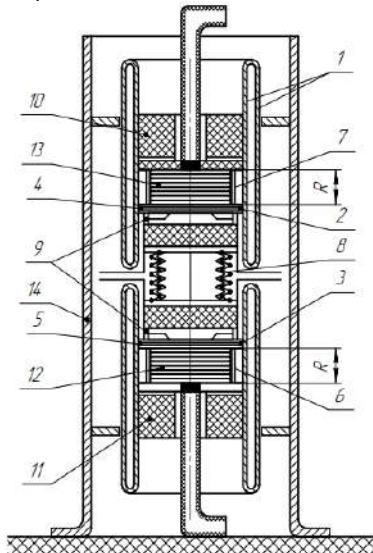


Рис. 2. Экспериментальная установка по определению теплопроводности ТА: (1 – стеклянная колба; 2, 3 – обогреватели; 4, 5 – резиновые прокладки; 6, 7 – каркасы с датчиками температур; 8 – сильфон; 9 – бобышки; 10, 11 – теплоизоляция; 12, 13 – полости с рабочим веществом; 14 – ограждающая конструкция)

Данная установка работает по следующему принципу: для исследования теплопереноса при плавлении использовались размещенные внутри стеклянной колбы дисковые нагреватели. Рабочее вещество с помощью сильфона прижималось к поверхности нагревателя. В процессе эксперимента определялась температура на корпусе обогревателя и опле температур по толщине вещества. Координаты границы раздела фаз фиксировались по превышению критической температуры плавления. При исследовании процесса затвердевания вместо нагревателей устанавливались пустотельные диски, через внутренние полости которых просачивалась вода с постоянной температурой. В случаях исключения свободной конвекции в жидкой фазе, тепло подводилось сверху, при затвердевании снизу.

Для оценки влияния термогравитационной конвекции на тепловую проводимость ТА, в работе [3] был проведен теплофизический эксперимент по затвердеванию и плавлению пальмитовой кислоты. На рис. 3 показан график пространственно - временного распределения температурного поля в местах установки датчиков температур по толщине ТА при задании температуры оболочки 4 С.

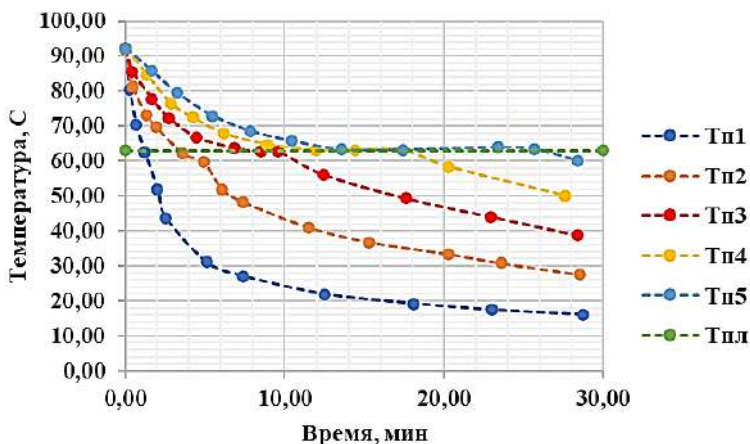


Рис. 3. Результаты замеров температур в ходе теплофизического эксперимента затвердевания пальмитовой кислоты (1 – температура ФПМ на глубине 0.002 м, 2 – температура на глубине 0.004 м, 3 – температура на глубине 0.006 м, 4 – температура ТА на глубине 0.008 м, 5 – температура ТА на глубине 0.01)

На рис. 4 показан процесс плавления ТА на пальмитовой кислоте с учетом термогравитационной конвекции в ходе экспериментальной тепловой отработки.

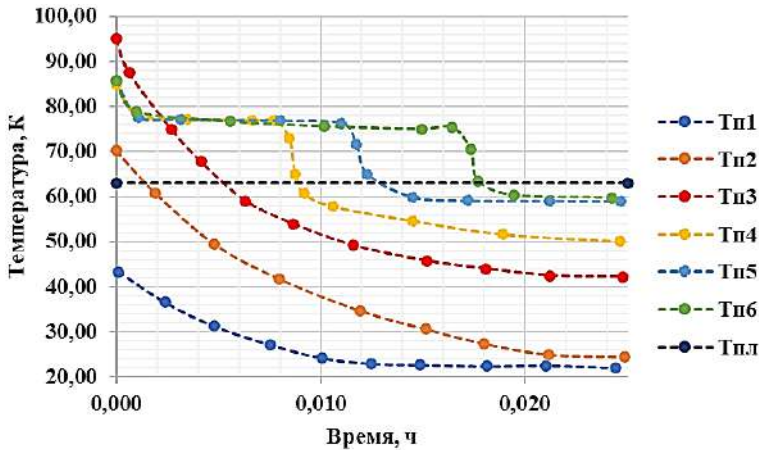


Рис. 4. Результаты замеров температур в ходе теплофизического эксперимента плавления пальмитовой кислоты в процессе плавления при наличии свободной конвекции ($q = 2200 \text{ Вт/м}^2$; $(C\rho\delta)_{об} = 21000 \text{ Дж/(м}^2\text{К)}$; 1 - - через 0,08 ч; 2 - через 0,21 ч; 3 - через 0,44 ч; 4 - через 0,5 ч; 6- через 0,8 ч)

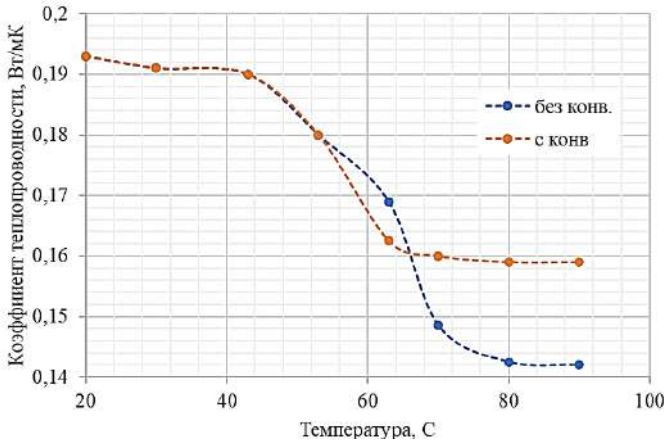


Рис. 5. Значения коэффициента теплопроводности плавящегося вещества в ТА (1 – идентифицируемое эффективное значение коэффициента теплопроводности (с начала эффекта термической реакции плавления), 2 – коэффициент теплопроводности парафина в жидком состоянии)

Как видно из анализа графических зависимостей, идентифицированное значение коэффициента теплопроводности пальмитовой кисло-

ты выше при наличии термогравитационной конвекции, что объясняется дополнительным вкладом коэффициента теплоотдачи в теплопередающую способность устройства. При выходе на стационарный режим, локальная температурная погрешность между двумя коэффициентами теплопроводности составляет (0,02 Вт/мК).

3. Выводы.

1. Разработан метод параметрической идентификации эффективного коэффициента теплопроводности в ТА на основе минимизации среднеквадратичного отклонения между теоретическим и экспериментальным температурным полем в местах установки датчиков температур при анализе экспериментальных данных процессов плавления при наличии термогравитационной конвекции и кристаллизации. Данная задача решалась методом итерационной регуляризации в приближении однонаправленного прогрева для атмосферных условий проведения тепловой отработки ТА;

2. Продемонстрированы результаты данного алгоритма на примере определения эффективного коэффициента теплопроводности ТА, работающего на пальмитовой кислоте, результаты показали, что при уровне температур 20 - 80 С значения эффективного коэффициента теплопроводности будет варьироваться в пределах $0.16-0.19 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$.

3. Данный метод определения тепловой проводимости такого типа устройств, работающих на фазовом переходе, является принципиально новым. Алгоритм может быть использован и для более широкого температурного диапазона для определения эффективного коэффициента теплопроводности ТА в обеспечении уточненных тепловых физико-математических моделей СОТР.

Литература

1. Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Системы терморегулирования космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1995.
2. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980.
3. Алексеев А.К., Чистов А.Ю., Шведов Б.А. К определению температуры в плотности теплового потока из решения обратной задачи теплопроводности в термодеструкующем материале // ИФЖ. 1993.
4. Гольдман Н.Л. Обратные задачи Стефана // ИФЖ. 1993. Т. 65, № 6. С. 684–689.
5. В. А. Алексеев, Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов, - Курск: Наукотм, 2016., С. 71.

УДК 536.24

Г.Р. БАДРЕТДИНОВА, ст. преподаватель,
А.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: nice.badretdinova@mail.ru

Конденсация парогазовой смеси с твердыми частицами на наружной поверхности прямого ребра

Аннотация. В работе представлено исследование влияния коэффициента теплопроводности λ_0 отложений, образующихся на поверхности прямого ребра, на тепловой поток Q и его изменение во времени τ .

Ключевые слова: прямое ребро, отложения, тепловой поток, конденсация.

G.R. BADRETDINOVA, Senior lecturer,
A.V. DMITRIEV, DScTech.

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya Str.
E-mail: nice.badretdinova@mail.ru

The effect of sediment on the heat flow of a finned pipe

Abstract. The paper presents a study of the effect of the thermal conductivity coefficient λ_0 of deposits formed on the surface of a straight rib on the heat flux Q and its change over time τ .

Key words: straight rib, deposits, heat flow, condensation

Процессы тепломассообмена, сопровождающиеся конденсацией парогазовой смеси, имеют место на многих промышленных предприятиях, таких как производство бумаги, перегонка нефтяного сырья, ректификация на химических заводах, а также в пищевой отрасли. Теплообменные аппараты, предназначенные для отвода тепла от парогазовых смесей, содержащих твердые частицы, подвергаются загрязнению, что приводит к снижению тепловой эффективности [1]. Имеются работы, в которых авторами были разработаны математические модели, позволяющие исследовать процессы образования отложений твердых частиц на поверхности ребер при конденсации парогазовых смесей [2].

В работе рассмотрено прямое ребро, на поверхности которого происходит конденсация парогазовой смеси, содержащей твердые частицы. Цель исследования – определить влияние коэффициента теплопроводности отложений λ_0 на тепловой поток Q и его изменение во времени τ .

Для исследуемого прямого ребра ранее в работе [3] было получено дифференциальное уравнение для теплопроводности

$$\frac{\partial^2 \vartheta(x, \tau)}{\partial x^2} = \frac{2\lambda_o}{\Lambda} \frac{\vartheta(x, \tau)}{\delta(x, \tau)} \quad (1)$$

и граничные условия

$$\vartheta(0, \tau) = \vartheta_0, \quad \frac{d\vartheta}{dx_{x=l}} = 0 \quad (2)$$

где $\vartheta(x, \tau)$ – избыточная температура при координате x в момент времени τ , °С; ϑ_0 – температура в основании прямого ребра, °С; λ_o – коэффициент теплопроводности отложений, Вт/(м·К); Λ – термическая проводимость ребра, Вт/К ($\Lambda = \lambda_p \delta_p$, δ_p – толщина, м, λ_p – теплопроводность ребра, Вт/(м·К)); $\delta(x, \tau)$ – толщина слоя отложений при координате x в момент времени τ .

Уравнение для толщины слоя отложений на прямом ребре получено в следующем виде:

$$\frac{\partial \delta(x, \tau)}{\partial \tau} = P_1 \frac{\Re(\delta(x, \tau))}{\delta(x, \tau)} \quad (3)$$

и начальные условия для $\delta(x, \tau)$ были взяты как

$$\delta(x, 0) = h_0 = \text{const} > 0, \quad 0 \leq x \leq l \quad (4)$$

где P_1 – температурный коэффициент роста отложений, т.е. диффузия частиц к поверхности отложений при разнице температур в 1 К, м²/(с·К); h_0 – начальное приближение толщины слоя отложений, параметр, стремящийся к нулю, м.

По разработанной математической модели получено выражение для теплового потока, отводимого прямым ребром Q_0 :

$$Q_0 = \Lambda \left(\frac{\theta_0 - \vartheta_{i=1}}{\Delta x} + \theta_0 \frac{2\lambda_o}{\Lambda} \frac{\Delta x}{2\delta_{i=0}} \right) \quad (5)$$

Вычисления проводились при параметрах, приведенные ниже в табл. 1. Параметры $L=0,01855$ м, $\delta_p=0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\lambda_p=50$ Вт/(м·К), $\lambda_o=0,3$ Вт/(м·К), $\theta_0 = 50^\circ\text{C}$ были приняты как базовые, где L – высота ребра, м.

Таблица 1. Расчетные значения

Параметры	Значения		
L , м	0,01855	0,0355	0,01305
δ_p , м	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
λ_o , Вт/(м·К)	0,037	0,3	0,67
λ_p , Вт/(м·К)	12	30	50
θ_0 , °С	10	50	100

В результате исследования были получены графики зависимости изменения теплового потока во времени τ при различных коэффициентах теплопроводности отложений λ_o (рис.1), высоты прямого ребра L и разности температур ребра и окружающей среды ϑ_0 . Из рис. 1 видно,

что существенное снижение теплового потока наблюдается в первые 2 дня работы теплообменного аппарата. По истечению этого времени показатели теплового потока изменяются незначительно, без резких перепадов. Установлено, что с увеличением коэффициента теплопроводности отложений с 0,037 до 0,67 Вт/(м·К) тепловой поток увеличивается в 2,07 раза в момент времени 30 суток.

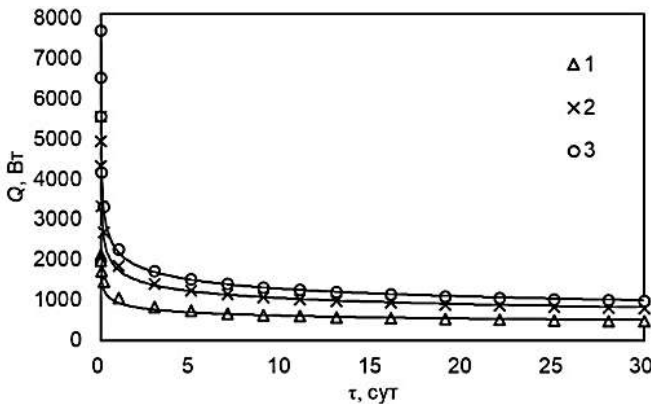


Рис. 1. График зависимости теплового потока Q , Вт, от времени τ , сут, для половины ребра, при различных значениях коэффициента теплопроводности слоя отложений λ_0 , Вт/(м·К): 1 – 0,037 Вт/(м·К); 2 – 0,3 Вт/(м·К); 3 – 0,67 Вт/(м·К).

Вывод. В работе представлена разработанная математическая модель, позволяющая определить толщину слоя отложений на прямом ребре и распределение температур на нем при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы. С помощью разработанной математической модели исследовано влияние теплофизических параметров среды на изменение теплового потока, отводимого прямым ребром.

Литература

1. Walmsley T.G., Walmsley M.R., Atkins M.J., Neale J.R. Fouling and pressure drop analysis of milk powder deposition on the front of parallel fins // *Advanced Powder Technology*. 2013. Т. 24. №. 4. С. 780–785.
2. Дмитриев А.В., Якимов Н.Д., Харьков В.В., Бадретдинова Г.Р. Расчет образования осадка на оребренных трубах теплообменника при конденсации парогазовой смеси с твердыми частицами // *Инженерно-физический журнал*. 2023. Т. 96, № 6. С. 1456-1463.
3. Якимов Н.Д., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Борисова С.Д. Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы на ребре // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24. № 3. С. 121-129.

УДК 66.074.2

М.А. ПРЕЦ, ст. преподаватель
В.А. ВДОВИНА, студент

Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: vik.ktor.ria@mail.ru

CFD-анализ эффективности фракционирования в мультивихревом классификаторе кольцевого типа

Аннотация. В работе представлено численное исследование мультивихревого классификатора кольцевого типа, предназначенного для фракционирования мелкодисперсных сыпучих частиц в воздушной среде. Устройство реализует принцип «труба в трубе». В ходе исследования варьировались геометрические параметры конструкции, такие как расстояние между трубами и степень раскрытия подающих щелей. Установлено, что при оптимальных конфигурациях достигается высокая селективность классификации с фракционной эффективностью свыше 95 %.

Ключевые слова: мультивихревой классификатор, фракционирование, сыпучие материалы, численное моделирование, турбулентный поток, CFD.

М.А. PRETS, Senior Lecturer,
V.A. VDOVINA, Student,

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, 51 Krasnoselskaya Str.
E-mail: vik.ktor.ria@mail.ru

CFD Analysis of Fractionation Efficiency in a Ring-Type Multi-Vortex Classifier

Abstract. The paper presents a numerical study of a ring-type multi-vortex classifier designed for the fractionation of fine bulk particles in an air medium. The device operates based on the "pipe-in-pipe" principle. The study investigates the influence of geometric parameters such as the distance between the pipes and the slit opening ratio. It has been established that with optimal configurations, high classification selectivity is achieved, with fractional efficiency exceeding 95%.

Key words: multi-vortex classifier, fractionation, bulk materials, numerical modeling, turbulent flow, CFD.

В современном производственном секторе наблюдается устойчивая тенденция к увеличению требований к качеству фракционного состава исходного сырья и продуктов переработки [1]. Особенно остро эта проблема стоит в химической, фармацевтической, пищевой промышленности, а также в производстве строительных материалов. При этом значительную сложность представляет фракционирование мелкодисперсных сыпучих частиц, поскольку традиционные методы разделения, такие как просеивание или гравитационная сепарация, демонстрируют низкую

эффективность в диапазоне частиц размером менее 60 мкм. В таких условиях возрастает интерес к использованию инерционных методов, основанных на динамике движения частиц в закрученных газовых потоках, не требующих подвижных частей и отличающихся высокой надёжностью [2].

В данной работе рассматривается мультивихревой классификатор кольцевого типа, в котором реализован принцип «труба в трубе» (рис. 1). Такая конструкция позволяет сформировать кольцевой канал между внутренней и внешней цилиндрическими стенками, куда подаётся газовый поток через специальные щели. За счёт тангенциального ввода потока в этом пространстве формируются устойчивые вихри, интенсивность и структура которых зависят от геометрии устройства. Эти вихри создают сложную комбинацию центробежных, инерционных и гравитационных сил, воздействующих на частицы, способствуя их сепарации в зависимости от размеров и плотности.

Исследование сосредоточено на численном анализе движения дисперсной фазы и оценке эффективности фракционирования при изменении конструктивных параметров устройства. Основными переменными параметрами стали расстояние между трубами, определяющее диаметр каждого вихря, и степень раскрытия подающих щелей, влияющая на структуру потока и его закрутку. Для проведения моделирования использовалась программная среда ANSYS Fluent, в которой реализована модель дискретной фазы (DPM), позволяющая отслеживать индивидуальные траектории частиц в трёхмерной области, а также турбулентная модель Shear Stress Transport (SST), дающая адекватное описание вихревых течений в ограниченных геометриях.

Геометрия устройства была построена в CAD-среде и экспортирована в ANSYS Fluent для последующей сеточной дискретизации. Для повышения точности и снижения вычислительных затрат использовалась осевая симметрия – рассчитывался один характерный сектор кольцевого канала. В процессе численного эксперимента были получены зависимости фракционной эффективности от конструктивных параметров при различных входных условиях. Особое внимание уделялось анализу формы кривой фракционной эффективности, которая в ряде случаев демонстрировала сложное поведение с наличием локальных максимумов и минимумов. Такие экстремумы, как показал анализ, обусловлены рециркуляцией частиц, возникающей при их столкновении со стенками и последующем возвращении в поток, а также взаимодействием с восходящим газовым потоком, формирующимся в нижней части конструкции.

Результаты показали, что при определённой конфигурации устройства возможно достичь эффективности фракционирования свыше 95 % для частиц размером 20-40 микрон. Это открывает перспективы использования данной конструкции при необходимости высокой селективности разделения фракций. Одновременно с этим был проведён

анализ гидравлического сопротивления устройства, варьировавшегося в пределах от 500 до 3700 Па, что также учитывалось при выборе оптимальных параметров конструкции.

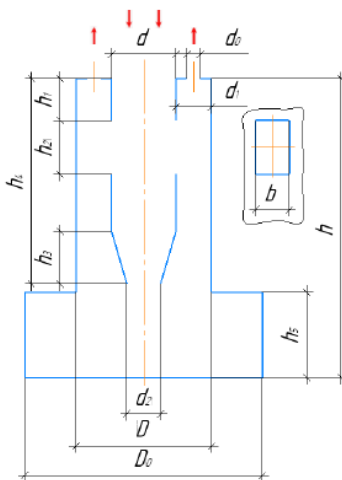


Рис. 1. Схема конструкции мультивихревого классификатора с обозначением геометрических параметров

Вывод. В ходе численного исследования работы мультивихревого классификатора установлено, что конструктивные параметры устройства оказывают решающее влияние на эффективность фракционирования мелкодисперсных частиц. Оптимизация геометрии – в частности, расстояния между коаксиальными трубами и степени раскрытия подающих щелей – позволяет формировать устойчивую вихревую структуру, обеспечивающую высокую степень селективности разделения фракций. При определенных параметрах достигается фракционная эффективность выше 95 % для частиц целевого диапазона размеров, что подтверждает работоспособность и перспективность предложенной конструкции.

Литература

1. Зинуров В.Э., Мадышев И.Н., Ивахненко А.Р., Петрова И.В. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 205–211. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029>.
2. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Сахибгареев Н.Ф., Латыпов Д.Н., Гарипов М.Г. Численное моделирование газодинамики в центробежном классификаторе // Вестник технологического университета. 2021. Т. 24. № 12. С. 128–132.

УДК 536.24

В.Э. ЗИНУРОВ, к.т.н.,
А.М. МУГИНОВ, студент,
А.А. АБДУЛЛИНА, студент

Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: vadd_93@mail.ru

Численное моделирование нагрева аккумулирующего материала из графита в тепловом накопителе энергии

Аннотация. В работе представлено численное моделирование тепловых процессов в слое из диспергированного графита при тепловом потоке $100\,000\text{ Вт/м}^2$. Модель учитывает теплопроводность, конвекцию и излучение, с применением метода Монте-Карло для расчета радиационного теплообмена. В расчётах заданы температурозависимые свойства графита. Показано, что хаотичная укладка частиц усиливает теплопередачу за счёт плотных контактов и активного излучения.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор; графит, численное моделирование, теплопередача, радиационный теплообмен, Monte Carlo.

V.E. ZINUROV, Ph.D. in Engineering,
A.M. MUGINOV, Student,
A.A. ABDULLINA, Student.

Kazan State Power Engineering University,
420066, Kazan, 51 Krasnoselskaya Str.
E-mail: vadd_93@mail.ru

Numerical Simulation of Heating a Graphite-Based Heat Storage Material in a Thermal Energy Storage System

Abstract. The paper presents a numerical simulation of thermal processes in a dispersed graphite layer under a heat flux of $100,000\text{ W/m}^2$. The model accounts for conduction, convection, and radiation, using the Monte Carlo method to compute radiative heat transfer. Temperature-dependent properties of graphite are integrated into the calculations. The results show that random packing of particles enhances heat transfer due to dense interparticle contacts and intensified radiation.

Key words: thermal energy storage; graphite; numerical simulation; heat transfer; radiative heat exchange; Monte Carlo.

В условиях активного перехода мировой энергетики к низкоуглеродным источникам возрастает потребность в эффективных технологиях аккумулирования энергии, обеспечивающих баланс между генерацией и потреблением. Одним из ключевых направлений становится разработка тепловых аккумуляторов, способных функционировать при экстремально высоких температурах. Такие устройства играют важную роль в утилизации избыточной энергии от солнечных коллекторов, термохимических реакторов и

промышленных источников тепла. Для создания надежных и долговечных накопителей требуется подбор устойчивых материалов и оптимальных конструктивных решений, обеспечивающих высокую эффективность теплообмена при минимальных потерях [1].

В качестве аккумулирующей среды в настоящем исследовании рассмотрен порошкообразный графит [2]. Его выбор обусловлен рядом уникальных свойств: высокой температурной устойчивостью (плавление выше $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$), хорошей теплопроводностью, стабильностью в инертной среде, сравнительно низкой стоимостью. Особенно интересной представляется возможность варьирования формы, размеров и пространственной организации частиц графита для достижения максимальной эффективности теплопередачи в теплоаккумулирующем объеме.

Численные расчеты выполнены в программной среде ANSYS Fluent с применением модели Монте-Карло. Рассматривалась структура с хаотичным распределением квадратных графитовых частиц размером 5 мм при межчастичных зазорах 0,1 мм. Газовая фаза представлена аргоном, исключаящим окисление графита при высоких температурах и минимизирующим химические взаимодействия, что позволяет сосредоточиться на тепловых механизмах передачи энергии: теплопроводности, конвекции и излучении.

Особое внимание уделено распределению температур в расчетной области при постоянной плотности теплового потока $100\,000\text{ Вт/м}^2$. Результаты, представленные на рисунке ниже (рис. 1), свидетельствуют о формировании устойчивого температурного градиента от нагретой поверхности к охлаждаемой. Более выраженные температурные переходы наблюдаются в графитовой фазе, тогда как в газовых промежутках градиент сглажен из-за низкой теплопроводности аргона. Такая картина обусловлена неравномерным теплообменом между различными участками среды и подтверждает важность учета геометрических и структурных характеристик при проектировании теплоаккумулирующих устройств.

В модели были учтены температурно-зависимые свойства графита, включая теплопроводность, удельную теплоемкость и коэффициент излучения. Эти параметры демонстрируют сложную нелинейную динамику: теплопроводность снижается с ростом температуры, теплоемкость возрастает, а коэффициент излучения постепенно увеличивается.

Полученные данные подтверждают, что не только материал, но и способ его организации в пространстве оказывает решающее влияние на эффективность теплопередачи. В случае хаотичной укладки графита наблюдается плотный контакт между частицами, что способствует усилению радиационного обмена. Сравнение с регулярными структурами (рассмотренными в других расчетах статьи) показало, что при прочих равных условиях хаотичная компоновка демонстрирует сопоставимые, а иногда и лучшие показатели теплопроводности. Это связано с увеличенной площадью контакта между частицами и снижением общего теплового сопротивления на границах раздела фаз.

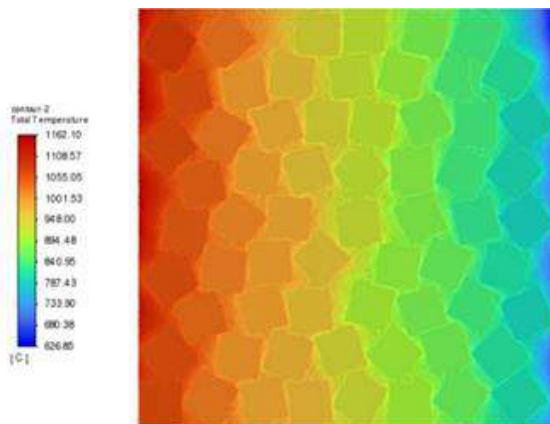


Рис. 1. Распределение температуры в графитовом теплоаккумулирующем слое при тепловом потоке $100\,000\text{ Вт/м}^2$

Вывод. Проведенное численное моделирование позволило получить качественные и количественные оценки тепловых процессов, протекающих в теплоаккумулирующем слое из диспергированного графита при воздействии интенсивного теплового потока. Использование модели Монте-Карло для расчета радиационного теплообмена, а также учёт температурозависимых свойств материала обеспечили высокую достоверность результатов и позволили проанализировать распределение температур в условиях, приближенных к реальным эксплуатационным режимам.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Литература

1. Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Абдуллина А.А. Оценка процесса переноса энергии в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом при его разрядке // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 4. С. 73-85.
2. Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Мугинов А.М., Павлов Г.И. Алгоритм расчета многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 6. С. 166-179.

УДК 621.311.24:621.313.12

В.С. БУЛАЕВА, студент,
А.М. САВЧЕНКОВ, студент,
Н.М. САВЧЕНКОВА, к.т.н.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1
E-mail: savchenkovnm@mpei.ru

Исследование гидравлических свойств упорядоченной пористой структуры тепловых труб

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования гидравлических и теплообменных характеристик тепловых труб с упорядоченной пористой структурой (УПС). Основной целью являлось повышение эффективности теплообмена за счет оптимизации параметров пористого материала. Результаты работы могут быть использованы для создания тепловых труб с более стабильными свойствами для применения в авиационной и космической технике.

Ключевые слова: тепловые трубы, пористая структура, гидравлические свойства.

V.S. BULAEVA, student,
A.M. SAVCHENKOV, student,
N.M. SAVCHENKOVA, Ph.D

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st.114, 1
E-mail: savchenkovnm@mpei.ru

Investigation of the Hydraulic Properties of an Ordered Porous Structure in Heat Pipes

Abstract: This paper presents the results of a study on the hydraulic and heat transfer characteristics of heat pipes with an ordered porous structure (OPS). The main objective was to improve heat transfer efficiency by optimizing the parameters of the porous material. The findings of this work can be applied to develop heat pipes with more stable properties for use in aerospace engineering.

Key words: Heat pipes, porous structure, hydraulic properties.

С развитием авиации и космической техники ежегодно увеличивается количество летательных аппаратов, а вместе с ними растет потребность в эффективных системах теплоотвода. Учитывая ограниченное пространство для таких систем и необходимость их работы в вакууме, всё чаще применяются тепловые трубы. Однако их использование сопровождается рядом проблем: современные тепловые трубы демонстрируют значительный разброс характеристик теплоотвода, что создает трудности для производителей. Кроме того, невозможно с высокой точностью предсказать свойства конкретной трубы.

Целью данной работы является расчет гидравлических свойств созданной модели, для дальнейшего улучшения параметров, которые обеспечивают повышение эффективности теплообмена по сравнению с существующими тепловыми трубами. Сегодня такие трубы создаются методом спекания, в результате чего размеры и формы пор становятся хаотичными, что затрудняет прогнозирование их энергетических показателей. Это также делает невозможным изготовление двух идентичных труб.

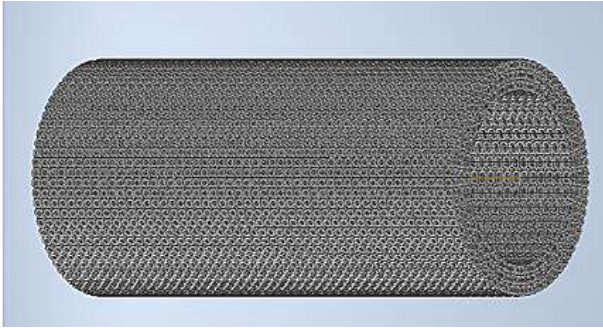


Рис. 1. 3-D модель УПС

Первостепенной задачей в данной работе было создание самой УПС [2], далее проведен расчет, в котором за счет изменения высоты поры, пропорционально ей менялся гидравлический диаметр, были определены пористость. В табл. 1 занесены результаты минимально возможных величин капиллярных сил и давлений. Далее было необходимо определить характер движения теплоносителя. Соответственно его скорость.

Таблица 1. Результаты нахождения гидравлических характеристик

$H \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$D_p \cdot 10^{-5}, \text{м}$	Π	$F_{\text{кап}} \cdot 10^{-5}, \text{Н}$	$P_{\text{кап}} \cdot 10^3, \text{Па}$	$L, \text{м}$	$Q \cdot 10^{-3}, \text{Вт}$
0,1	4,52	0,67	0,96	157	0,0046	1,5
0,2	10,8	0,67	2,29	114	0,013	1,8
0,3	16,2	0,67	3,43	76	0,029	2,7
0,4	21,6	0,67	4,58	57	0,052	3,6
0,5	26,9	0,67	5,73	45	0,082	4,5
0,7	37,8	0,67	8,02	32	0,16	6,3
0,8	43,2	0,67	9,17	28	0,21	7,2
0,9	48,6	0,67	10,3	25	0,26	8,1
1	53,9	0,67	11,5	22	0,32	9,0
1,4	75,6	0,67	16,04	16	0,64	12,6

Число Рейнольдса зависит лишь от формы поры, и с изменением размеров, при той же структуре поры, оно будет одинаковым и равняться $Re = 89$.

Для пористых сред переход от ламинарного к турбулентному режиму течения происходит при меньших значениях числа Рейнольдса, чем для свободного потока. Обычно критическое значение числа Рейнольдса для пористой среды находится в диапазоне: 10-100. По полученным данным в данной структуре течение жидкости - ламинарное.

Также исследовалась максимальная возможная длина для данного размера поры и рассчитана тепловая мощность при данных условиях [2].

Вывод. Таким образом, проведенные исследования показывают перспективность применения упорядоченных пористых структур для улучшения эффективности тепловых труб. Разработанная модель позволяет минимизировать разброс характеристик и обеспечивает более точное прогнозирование свойств конкретной трубы, что особенно важно для работы в условиях ограниченного пространства и вакуума. Дальнейшее совершенствование конструкции может включать оптимизацию геометрии пор и материалов для достижения максимальной производительности при минимальных габаритах.

Литература

1. Flow Characterization in Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)-Based Porous Geometries: Part 1—Hydrodynamics, Surendra Singh Rathore, Balkrishna Mehta, Pradeep Kumar, Mohammad Asfer

2. Савченкова Н.М., Булаева В.С., Синьбухова М.С., Савченков А.М. Создание и практическое применение: 3D-моделирование и расчет пористой упорядоченной структуры // Национальный исследовательский университет "МЭИ". М.: НИУ "МЭИ", 2024. 111 с.

УДК 621.565.93/.95

А.Б. ГАРЯЕВ, д.т.н.,
В.А. ПОЖЕНЬКО, аспирант

Национальный исследовательский университет "МЭИ"
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: GariayevAB@mpel.ru

Влияние жидкой фазы на гидравлические характеристики конденсационных трубчато-оребрённых теплообменников

Аннотация: В данной статье обосновывается необходимость учёта образования жидкой фазы в аэродинамических расчётах в теплообменных аппаратах и проводится оценка гидравлических потерь на основе разработанной математической модели.

Ключевые слова: трубчато-оребрённые теплообменники, утилизация тепла, охлаждение, гидравлические характеристики.

A.B. GARIAYEV, Doctor of Technical Sciences,
V.A. POZHENKO, postgraduate

National Research University "MPEI"
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14
E-mail: GariayevAB@mpei.ru

The influence of the liquid phase on the hydraulic performance of condensing finned-tube heat exchangers

Abstract: The article highlights the necessity of accounting for liquid phase formation in aerodynamic calculations for heat exchangers and presents an assessment of hydraulic losses based on a developed mathematical model.

Key words: finned-tube heat exchangers, heat recovery, cooling, hydraulic performance.

Сегодня теплообменные аппараты широко применяются в самых разных областях – от систем вентиляции и кондиционирования, обеспечивающих комфортный микроклимат, до промышленных установок, где требуется эффективное теплоотведение или подогрев. Их эффективность становится ключевым критерием проектирования, так как напрямую влияет на эксплуатационные расходы. Важным элементом вентиляционных систем являются теплообменники, поверхность которых может охлаждаться ниже точки росы. Это может происходить как в стандартных охладителях, так и в рекуператорах, например, в тех, что обрабатывают дымовые газы после котельных установок. При работе с влажными газами возникает проблема конденсации влаги на поверхностях, что усложняет тепловые и аэродинамические расчёты.

Тепловые расчёты теплообменников с влаговывпадением существуют и их можно проводить по различным методикам:

1. Метод коэффициента влаговывпадения [1].
2. Метод среднелогарифмического энтальпийного напора [1].
3. Метод эквивалентной температуры сухого термометра [1].
4. Методику Кудинова А.А. [2].
5. Метод ε -NTU (числа единиц переноса) для анализа противоточных водовоздушных теплообменников [1].

При этом в научно-технической литературе до сих пор отсутствуют общепринятые подходы к гидравлическому расчету таких устройств, что создаёт значительный пробел в инженерной практике. Моделирование процессов конденсации в теплообменниках влажного воздуха занимает важное место в современных инженерных исследованиях. Это связано с растущими требованиями к энергосбережению и надёжности систем ОВКВ (отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). Конденсация пара на поверхностях теплообменников приводит к значительному росту аэродинамического сопротивления. Например, согласно исследованию [3], при высокой влажности 90% аэродинамиче-

ское сопротивление может увеличиваться до 2 раз по сравнению с «сухими» условиями теплообмена. Эти выводы подтверждаются справочными данными: в [4] отмечается прирост сопротивления на 60%, что делает невозможным игнорирование этого эффекта при проектировании и выборе режимов работы оборудования.

Анализ диссертационных исследований [5,6] выявил ещё одну проблему: при стекании конденсата на трубках ребристых теплообменников формируется сложная межфазная поверхность (плёнки, капли, брызги). Эти межфазные поверхности увеличивают общую площадь теплообмена, но в то же время усложняют гидродинамику и теплоотдачу. В трубчато-оребрённых аппаратах происходит как сдвиг конденсата в поток, так и его стекание вниз под действием силы тяжести. Если рассматривает движение парогазовой смеси в канале теплообменного аппарата, то конденсат полностью уносится с потоком. Рассмотрим сначала именно этот случай.

В рамках данной работы была опробована математическая модель для расчёта влияния жидкой фазы на аэродинамические характеристики воздушного канала и содержит следующие формулы:

$$H'' = H' - \frac{(H' - H_w) \cdot (t_1' - t_1'')}{t_1' - t_{w1}}, \quad (1)$$

где H' , H'' и H_w – энтальпия ПГС на входе и на выходе из канала и на стенке канала, t_1' , t_1'' и t_{w1} – температура ПГС на входе и на выходе из канала и температура стенки.

$$d'' = \frac{H'' - C_{B_{\text{вых}}} \cdot t_1''}{r + C_{П_{\text{вых}}} \cdot t_1''}, \quad (2)$$

где d'' и $C_{B_{\text{вых}}}$ – влагосодержание и теплоёмкость ПГС на выходе из канала, r – удельная теплота парообразования, $C_{П}$ – теплоёмкость водяных паров.

$$G_k = G_{\text{ПГС}} \cdot (d' - d''),$$

где G_k – массовый расход конденсата, $G_{\text{ПГС}}$ – массовый расход ПГС.

$$G_k = \rho_k \cdot w_k \cdot 4 \cdot a \cdot \delta_{\text{пл}},$$

$$\gamma = \frac{w_r}{w_k},$$

где ρ и $\delta_{\text{пл}}$ – плотность и толщина пленки конденсата, L и d_r – длина и гидравлический диаметр канала, γ – это коэффициент, отвечающий за отношение скоростей плёнки конденсата и газа.

$$\delta_{\text{пл}} = \frac{\gamma \cdot \rho_r \cdot a \cdot G_k}{4 \cdot (G_k \cdot \rho_k + G_r \cdot \rho_r)},$$

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_{\text{пл}}(\delta_{\text{пл}})} \cdot \frac{\rho_r \cdot \left(\frac{G_{\text{ПГС}}}{F_{\text{пл}}(\delta_{\text{пл}}) \cdot \rho_r} \right)^2}{2},$$

где f – коэффициент трения, определяемый по формуле Блазиуса, $D_{\text{пл}}$ – гидравлический диаметр канала теплообменника с учётом плёнки, $F_{\text{пл}}$

– площадь проходного сечения канала теплообменника с учетом пленки, $G_{\text{ПГС}}$, ρ_r – расход, плотность ПГС.

Итоговая формула для перепада давления в канале выведена на основе формулы Дарси-Вейсбаха.

В данной модели есть ряд допущений:

1. Не учитывалось взаимодействие воздушного потока и конденсата.
2. Пленка конденсата равномерно покрывает поверхность канала теплообменного аппарата, т.е. происходит загромождение сечения.
3. Конденсат уходит из канала вместе с воздушным потоком.

По результатам расчётов был построен график зависимости перепада давления в канале от расхода конденсата.

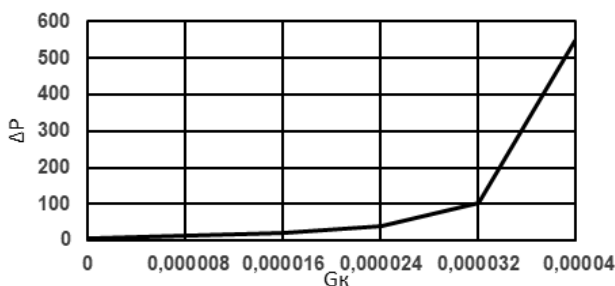


Рис. 1. Зависимость перепада давления от расхода конденсата

По графику видно, что чем больше конденсата выпадает в канале, тем больше происходит загромождение сечения и тем больше перепад давления в таком канале.

В рамках данной работы была опробована математическая модель, которая несет оценочный характер. Она будет уточняться и корректироваться на основе экспериментальных данных.

Для уточнения математической модели запланирован комплекс экспериментальных исследований. В рамках работ предполагается провести серию испытаний с продувкой воздушного канала, в котором будут размещены капли, с последующим анализом характера взаимодействия воздушного потока с капельной фазой. Полученные данные позволят верифицировать расчетные алгоритмы. На последующем этапе программа исследований предусматривает проведение натурных экспериментов на действующем трубчато-оребрённом теплообменнике с целью оценки адекватности модели в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

- 1.Портянихин В.А. Модифицированный метод эффективность-NTU ($m\text{-}\varepsilon$ -NTU) для расчёта воздухоохладителей в режиме с влаговыведением или инеевыпадением. Часть I // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 1. С. 5–11.
- 2.Кудинов А.А., Энергосбережение в теплогенерирующих установках. Ульяновск: УлГТУ, 2000, 148 с.
- 3.Min J., Webb R.L., Bemisderfer C.H. Long-Term Hydraulic Performance of Dehumidifying Heat-Exchangers With and Without Hydrophilic Coatings // HVAC&R Research. 2000. Vol. 6. № 3. P. 257–272.
- 4.Баркалов Б.В., Павлов Н.Н., Амирджанов С.С. и др. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 / Под ред. Н.Н. Павлова, Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1992. 416 с. (Справочник проектировщика).
- 5.Путрик С.Б. Теплообмен при конденсации пара из продуктов сгорания в теплообменниках с большой степенью оребрения: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет, 2007. 122 с.
- 6.Семенов В.П. Разработка методов интенсификации процессов теплообмена при конденсации пара в поверхностных и контактных теплообменниках: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет, 2009. 309 с.

УДК 697.97

А.А. АРБАТСКИЙ, к.т.н. доцент,
М.В. ГОРЕЛОВ, к.т.н., доцент,
Д.А. МЕЧНИК, аспирант

Национальный исследовательский университет МЭИ
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: ArbatskyAnA@mpei.ru

Исследование энергетической эффективности роторных тепловых утилизаторов

Аннотация. На данный момент, при разработке вентиляционного и климатического оборудования, наблюдается существенный дефицит опытных данных применяемых для расчета тепловых утилизаторов. При разработке используются опытные данные [1] или расчетные методы [2], которые часто не соответствуют характеристикам работы теплового утилизатора в составе оборудования, так как при конструировании, ввиду стремления к максимальной компактности оборудования, часто не соблюдаются условия распределения воздушного потока по сечению теплового утилизатора, которые соблюдаются при их испытаниях и подразумеваются в расчетных методах. В работе проведено исследование зависимости КПД роторного теплового утилизатора системы вентиляции в зависимости от высоты волны, при работе в составе приточно-вытяжной вентиляционной установке TOP 310R.

Ключевые слова: экспериментальные исследования роторных регенераторов, роторные тепловые утилизаторы, системы вентиляции и кондиционирования.

A.A. ARBATSKY, PhD, Associate Professor
M.V. GORELOV, PhD, Associate Professor
D.A. MECHNIK, postgraduate

National Research University MPEI
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14
E-mail: ArbatskyAnA@mpei.ru

Study of energy efficiency of rotary heat recoverers

Abstract. At the moment, when developing ventilation and climate control equipment, there is a significant shortage of experimental data used to calculate heat exchangers. During development, experimental data [1] or calculation methods [2] are used, which often do not correspond to the operating characteristics of the heat exchanger as part of the equipment, since during design, due to the desire for maximum compactness of the equipment, the conditions of air flow distribution along the cross-section of the heat exchanger are often not observed, which are observed during their tests and implied in the design methods. In this paper, a study was conducted on the dependence of the efficiency of a rotary heat exchanger of a ventilation system depending on the wave height when operating as part of a TOP 310R supply and exhaust ventilation system.

Key words: experimental studies of rotary regenerators, rotary heat recovery units, ventilation and air conditioning systems

Одним из наиболее эффективных аппаратов для утилизации теплоты вытяжного воздуха является роторный регенератор теплоты, Схематичное изображение роторного регенератора и принцип его действия представлены на рис. 1.

Данные тепловые утилизаторы очень эффективны в длительном периоде работы (эффективность составляет 75 – 95%) [3], [4] и они существенно меньше подвержены обмерзанию со стороны вытяжного воздуха чем другие типы тепловых утилизаторов, применяемых в вентиляционных системах.

Роторные тепловые утилизаторы изготавливаются путем намотки алюминиевой фольги, с образованием так называемых «волн» оребрения (рис. 1). Используется оребрение в диапазонах высот 1,3–1,7 мм. В рамках данного исследования будет проведено испытание роторных тепловых утилизаторов с высотой оребрения 1,3, 1,5 и 1,7 мм. установленных в приточно-вытяжную установку, предназначенную для обеспечения расхода воздуха в объеме 250 м³/ч (рис. 2), в одинаковых условиях по: расходам, температурам и влажностям входящих потоков воздуха по приточной и вытяжной частям.

Актуальное исследование производится при помощи метода, изложенного в [5] при учете поправки на установку тепловых утилизаторов в корпус реальной установки. Конструкция стенда представлена на рис. 3.

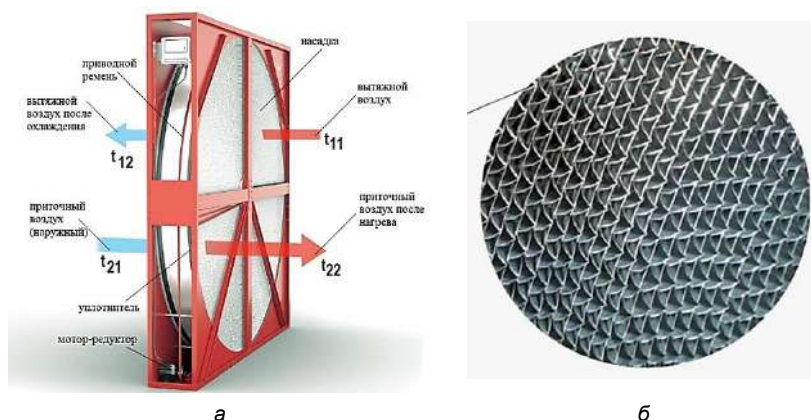


Рис. 1. Принцип действия роторного регенератора теплоты:
 а) t_{21} – температура приточного (наружного) воздуха, °С; t_{22} – температура приточного воздуха после нагрева в роторном регенераторе, °С; t_{11} – температура вытяжного воздуха после нагрева в роторном регенераторе, °С; t_{12} – температура вытяжного воздуха после охлаждения в роторном регенераторе, °С; б) – конструкция насадки роторного регенератора

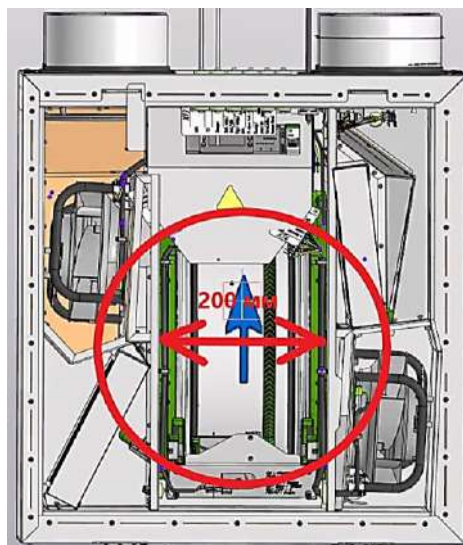


Рис. 2. Установка приточно-вытяжной вентиляции с утилизацией теплоты (используется роторный регенератор толщиной 200 мм – обведен)

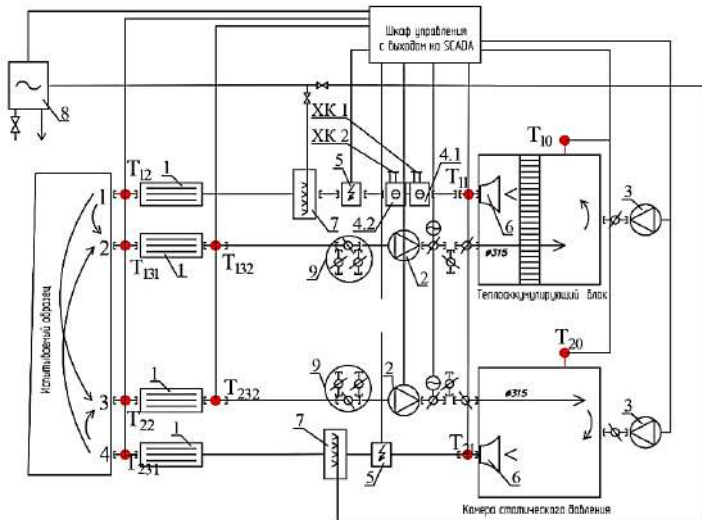


Рис. 3. Принципиальная схема стенда испытаний теплообменного оборудования:
 1 – выравниватели потока, 2 – вспомогательные вентиляторы, 3 – вентиляторы имитации внешнего напора, 4.1. – охладитель 1-й ступени (до -5 оС), 4.2. – охладитель 2-й ступени (до -30 оС), 5 – электрический нагреватель, 6 – измерительный коллектор, 7 – парораспределитель, 8 – пароувлажнитель (10 кг/ч), 9 – группы байпасирующих клапанов

Искомый параметр (температурный КПД) теплового утилизатора определяется следующим образом:

$$\eta_t = \frac{t_{22} - t_{12}}{t_{231} - t_{12}}, \quad (1)$$

где: t_{xx} – температуры в соответствующих точках согласно рис. 4.

Температура и влажность вытяжного воздуха для всех экспериментов находились в пределах: 20–24°С, 25–30%.

Расходы воздуха были одинаковы, сходимость тепловых балансов по приточному и вытяжному воздуху в пределах 5%.

В результате исследования получены следующие зависимости:

Зависимость, приведенная на рис. 4 бралась за «точку отсчета», так как для высоты оребрения 1,3 мм был получен наибольший КПД, для других высот оребрения, по результатам испытаний вводились поправочные коэффициенты, корректирующие температурный КПД в зависимости от высоты волны:

$$\eta_x = k\eta_{1,3} \quad (2)$$

где: η_x – температурный КПД роторного регенератора с высотой оребрения «х» мм, $\eta_{1,3}$ температурный КПД роторного регенератора с высотой оребрения 1,3 мм, k – поправочный коэффициент.

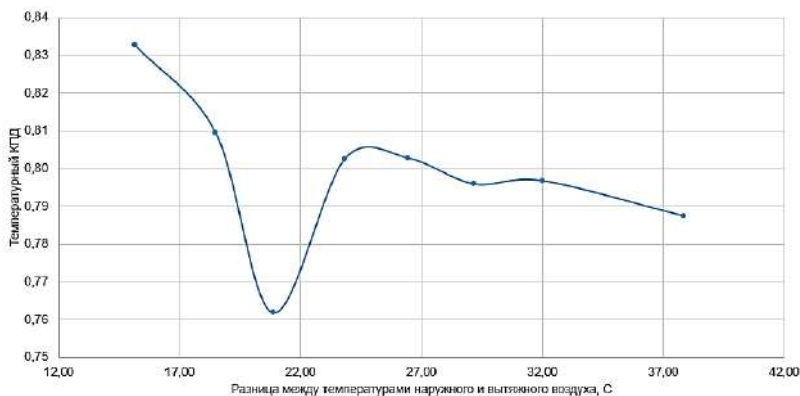


Рис. 4. График зависимости температурного КПД роторного регенератора с высокой оребрения 1,3 мм от разницы температур

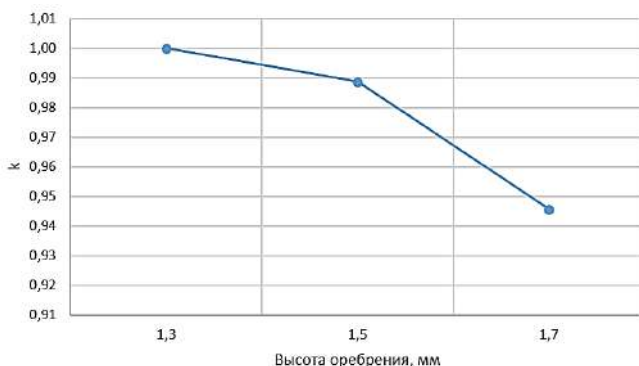


Рис. 5. График зависимости поправочного коэффициента k от высоты оребрения

Таким образом в системном эксперименте было обнаружено изменение зависимости температурного КПД в зависимости от разности температур, и зависимость КПД от высоты оребрения. Уменьшение КПД в диапазоне разниц температур 17–22°С, вероятно связано с началом фазового перехода, точное обоснование этой особенности требует проведения дополнительных исследования.

Литература

1. Hoval energy recovery. Rotary heat exchangers: Design handbook, 2024. P. 66.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергия, 1975 г.

3. Ф. И. Андронов. Роторные регенераторы для систем вентиляции и кондиционирования: Сделано в России // Сантехника, отопление, кондиционирование, 2022. №7. С. 52–54.

4. Данные производителей компактных приточно – вытяжных установок.

5. ГОСТ Р ЕН 308-2011. Теплообменники. Методы испытаний для определения критериев мощности установок регенерации тепла из смеси воздух/воздух и воздух/отработанный газ. М.: Стандартиформ, 2012.

УДК 62-711

Н.В. АВДОКУНИН, аспирант
И.В. ЯКОВЛЕВ, к.т.н.,

Национальный исследовательский университет МЭИ
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: AvdokuninNV@mpei.ru

Оценка энергосберегающего эффекта при применении прямого фрикулинга в системах охлаждения дата центров

Аннотация. В работе проводится оценка энергосберегающего эффекта применения охлаждения дата-центра с использованием холодного наружного воздуха в схемах со смешением и тепловым насосом, в зависимости от климатических особенностей региона.

Ключевые слова: энергосберегающий эффект, центр обработки данных, утилизация тепла, фрикулинг, экономия топлива

N.V. AVDOKUNIN, postgraduate
I.V. YAKOVLEV, PhD,

National Research University "MPEI"
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14
E-mail: AvdokuninNV@mpei.ru

Assessment of the energy-saving effect of direct free cooling in data center cooling systems

Abstract. This work assessed the energy-saving effect of using cold outdoor air for cooling data centers in mixed and heat pump schemes, depending on the climatic characteristics of the region.

Key words: energy-saving effect, data center, heat recovery, freecooling, fuel economy

Дата-центры являются неотъемлемой частью инфраструктуры IT-сектора экономики и вызывают большой интерес как у зарубежных, так и у российских исследователей. Дата-центры вносят существенный вклад в энергетический баланс страны, а также оставляет экологический след. Центры обработки данных со стороны энергетики вызывают интерес как

инфраструктура, которая, потребляя значительное количество электрической энергии, выделяет значительную долю тепловой энергии, которая на данный момент сбрасывается в окружающую среду. Эта теплота сбрасывается непосредственно системой охлаждения вычислительной техники.

Инфраструктура дата-центров включает в себя несколько ключевых компонентов, которые обеспечивают надежное и эффективное функционирование систем хранения, обработки и передачи данных. Основные элементы:

1. Серверы (основные вычислительные устройства, которые обрабатывают данные и выполняют приложения)
2. Системы хранения данных (устройства для хранения информации, такие как жесткие диски (HDD), твердотельные накопители (SSD) и системы хранения на базе сетей (SAN, NAS))
3. Сетевое оборудование (коммутаторы, маршрутизаторы и брандмауэры, которые обеспечивают связь между серверами и внешними сетями)
4. Электропитание (источники бесперебойного питания (ИБП) и генераторы для обеспечения надежного электроснабжения)
5. Охлаждение (системы кондиционирования и вентиляции для поддержания оптимальной температуры и влажности)
6. Физическая безопасность (системы контроля доступа, видеонаблюдения и сигнализации для защиты оборудования и данных)
7. Управление и мониторинг (программное обеспечение для мониторинга состояния оборудования, производительности и безопасности)
8. Сетевые соединения (высокоскоростные каналы связи с интернетом и другими дата-центрами)

Данные компоненты работают вместе, чтобы обеспечить надежную и эффективную работу дата-центров, поддерживая критически важные приложения и услуги.

Система охлаждения дата-центров является одной из ключевых статей потребления электрической энергии в их инфраструктуре. Она должна обеспечивать холодопроизводительность, покрывающую тепловыделения непосредственно от ИТ-оборудования ($Q_{\text{ИТ}}$), источников бесперебойного питания ($Q_{\text{ИБП}}$), распределительных сетей ($Q_{\text{РС}}$), освещения ($Q_{\text{ОСВ}}$), персонала ($Q_{\text{Л}}$) и проникающего через ограждения центра обработки данных (ЦОД) теплового потока ($Q_{\text{пр}}$).

Суммарную тепловую мощность можно представить в виде:

$$\Delta Q = Q_{\text{ИТ}} + Q_{\text{ИБП}} + Q_{\text{РС}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{Л}} \pm Q_{\text{пр}}. \quad (1)$$

Оценка компонентов, составляющих тепловую мощность приведена в методике [1,2], с ее учетом тепlopоступления можно выразить в виде:

$$\Delta Q = 1,08P_{\text{ИТ}} + 0,06P_{\text{ИБП}} + 21,53F + 100N \pm Q_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ИТ}}$ – электрическая мощность установленного ИТ-оборудования, Вт; $P_{\text{ИБП}}$ – электрическая мощность источников бесперебойного питания, Вт F – площадь помещения машинного зала ЦОД (центр обработки данных), м²; N – количество людей.

Суммарно первые два слагаемых в формуле (2) составляют 89% от ΔQ при условии загрузки ЦОД на 30% от общей мощности. Принимая, $P_{\text{ИБП}} = 0,32P_{\text{ИТ}}$, получим $\Delta Q \approx 1,1P_{\text{ИТ}}$. Полагая $P_{\text{ИТ}} = 0,36P_{\text{ЦОД}}$, получаем:

$$\Delta Q \cong 1,1 \cdot 0,36P_{\text{ЦОД}} = 0,396P_{\text{ЦОД}}. \quad (3)$$

Примерно 40% электрической мощности ЦОД преобразуется в теплоту и удаляется системой охлаждения в окружающую среду. Приводимая оценка получена без учета теплоты, поступающей от освещения, людей и проникающего потока теплоты через ограждающие конструкции, эти величины второго порядка малости и существенны лишь для ЦОД малой мощности.

Стандартная система охлаждения включает в себя холодильную машину или систему кондиционирования воздуха. Охлаждение может происходить непосредственно и с использованием промежуточного водяного контура. Удаляемый воздух рециркулирует в полном объеме и охлаждается, обеспечивая эффективное поддержание нужной температуры. Холодильной машиной или кондиционером теплота сбрасывается в окружающую среду.

Сокращение потерь энергии в ЦОД возможно благодаря утилизации тепла, выделяемого оборудованием. Эффективное использование этой теплоты позволяет повысить общую энергоэффективность. Одним из методов является совершенствование систем охлаждения, включая применение фрикулинга. Этот подход основан на использовании холода окружающей среды для охлаждения серверов, что способствует значительной экономии электроэнергии и снижению затрат на содержание оборудования.

Рассмотрим способ энергосбережения, который можно реализовать в системах охлаждения за счет наружного воздуха (прямой фрикулинга). Применяется наиболее перспективная схема (рисунок 1): подогрев приточного воздуха за счет камеры смешения (собственные нужды) и использование сбросной теплоты в теплонасосной установке (внешнее использование).

Внутреннее использование: воздух в систему подается из атмосферы, последовательно проходит через камеру смешения, где смешивается с частично рециркулирующим удаляемым воздухом, затем – через систему фильтрации и увлажнения, и поступает к стойкам с оборудованием.

Внешнее использование: присутствует отбор теплоты в теплообменнике - утилизаторе типа «воздух-антифриз», которая направляется в теплонасосную установку, где теплота используется для сторонних потребителей, например, в системах горячего водоснабжения (ГВС) или отопления.

Были рассмотрены две модели процессов подготовки воздуха в системе охлаждения типа фрикулинга. В соответствии с первой моделью основным допущением является постоянство влагосодержания воздуха [3]. Во второй модели – это ограничение снимается, и рассматриваются процессы обработки воздуха с учетом регулирования влагосодержания, включая относительную влажность воздуха [4].

В рассматриваемой схеме энергосберегающий эффект существенно зависит от климатических особенностей местности. Для оценки были выбраны города, находящиеся в различных климатических зонах: Москва; Екатеринбург; Краснодар. Были проведены расчеты, основанные на материальном, тепловом балансах, уравнениях связи параметров влажного воздуха и с учетом рекомендуемых параметров микроклимата машинного зала дата-центров [5] и привлечением климатических данных за период с 2018-2022г.

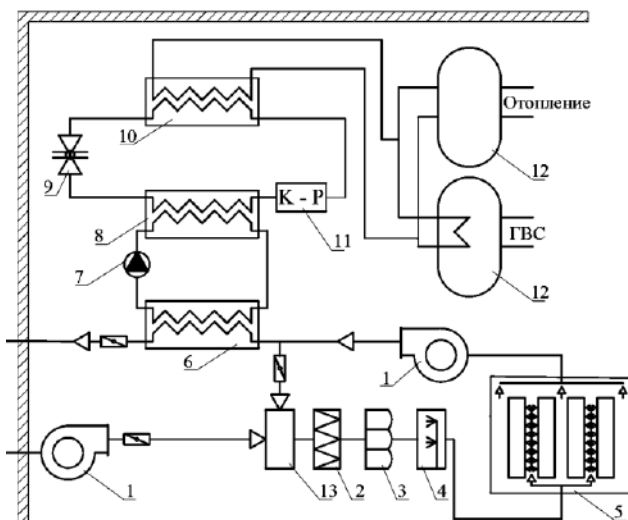


Рис. 1. Схема с применением холода окружающей среды:

- 1 – вентилятор; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – фильтр тонкой очистки;
- 4 – камера орошения; 5 – стойки дата-центра; 6 – утилизатор; 7 – насос;
- 8 – испаритель; 9 – вентиль терморегулирующий; 10 – конденсатор;
- 11 – компрессор; 12 – бак-аккумулятор; 13 – камера смешения

Данные об использовании теплоты на собственные нужды приведены на рис. 2. Результаты представлены в виде удельной экономии условного топлива (1) в долях от тепловыделения дата-центра за рассматриваемый период.

Эта доля представляет собой количество суммарно утилизируемой теплоты от расчетного количества теплоты, выделяемой оборудованием за расчетный период:

$$\overline{\Delta Q_{\text{ут}}} = \frac{\sum_j Q_{\text{ут}j} b_Q}{\Delta Q z_0 b_Q}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{ут}j}$ – количество утилизируемой теплоты, выделяемой оборудованием за j – й период, кВт·ч. z_0 – число часов в году, ч; b_Q – удельный расход условного топлива, кг у.т/Вт·ч, на выработку тепловой энергии; ΔQ – тепловыделения от оборудования дата-центра, кВт.

Приведенные на рис. 2 данные по годам получены с привлечение данных о годовом стоянии температур и энтальпий [3, 4], первоисточником для которых является архив погоды [7].

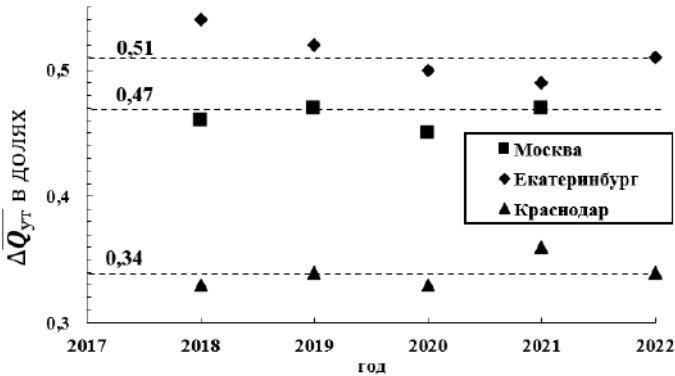


Рис. 2. Удельный энергосберегающий эффект в зависимости от климатических условий местоположения ЦОД [6] при применении части сбросной теплоты на собственные нужды.

В зарубежной литературе предлагается применение теплового насоса в системе охлаждения на основе чиллера. Нами предлагается часть теплоты сбрасываемое в атмосферу использовать дополнительно с применением теплонасосной установки в схеме фрикулинга.

Энергосберегающий эффект от применения сбросной теплоты на внешнее использование повышением её потенциала с помощью теплового насоса можно вычислить по зависимости:

$$\overline{\Delta b_{\text{тн}}} = \frac{\Delta B_{\text{у.т}}}{\Delta Q z_0 b_Q}, \quad (5)$$

где $\Delta B_{\text{у.т}}$ – экономия условного топлива на источнике тепловой энергии, кг у.т. z_0 – число часов в году, ч; b_Q – удельный расход условного топлива, кг у.т/Вт·ч, на выработку тепловой энергии; ΔQ – тепловыделения от оборудования дата-центра, Вт. [5].

Годовую экономию в условном топливе удобно представить отнесенной к количеству энергии, выделяемой ЦОД за расчетный период, выраженному в расходе условного топлива ($\Delta Q_{z_0} b_Q$). Экономия условного топлива ($\Delta B_{y,T}$) находилась с учетом затрат электрической энергии на работу теплового насоса

$$\Delta B_{y,T} = \Delta Q b_Q - \Delta P b_P. \quad (6)$$

Результаты расчетов [3,4,6] приведены на рис. 3. Здесь также применялись графики годового стояния температур и энтальпий за последние пять лет.

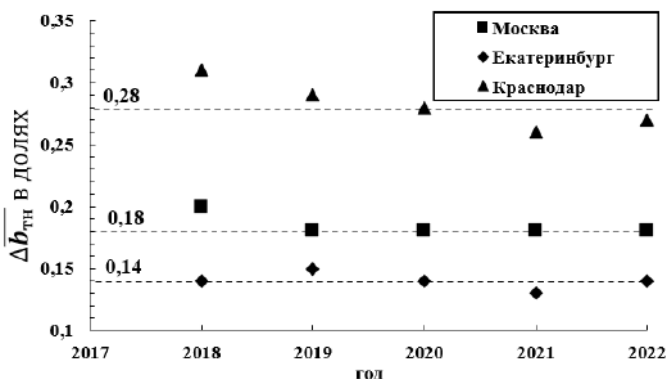


Рис. 3. Удельный энергосберегающий потенциал при применении теплового насоса в зависимости от климатических условий местоположения ЦОД

Суммарный минимальный энергосберегающий эффект можно оценить следующим образом: для Москвы – 0,65; для Екатеринбурга – 0,65; для Краснодара – 0,62 (рис. 4). Это означает, что энергосберегающий потенциал может составлять от 62% до 65% от объема энергии, выделяемой оборудованием дата-центров (в эквиваленте условного топлива).

Абсолютное значение эффекта может быть определено при заданной суммарной мощности ИТ-оборудования дата-центра, использующего систему охлаждения типа прямой фрикулинг. В отличие от систем охлаждения, основанных на парокомпрессионных холодильных машинах, распределение затрат энергии среди потребителей в случае фрикулинга будет иным. Это объясняется меньшим потреблением энергии систем охлаждения прямого фрикулинга.

Результаты показывают, что суммарный энергосберегающий эффект от применения фрикулинга и теплового насоса практически одинаков для ЦОД, располагаемых в различных климатических районах. В то же время отдельные составляющие экономии могут существенно различаться в зависимости от среднегодовой температуры местоположения ЦОД (рис. 4). Зависимость экономии от климата местности для

случая применения теплового насоса объясняется различием в расходах воздуха, направляемого на подогрев приточного и на утилизационную установку с тепловым насосом. Соотношение между этими расходами для всех рассматриваемых случаев были разными и в зависимости от состояния наружного воздуха, что проявилось в различии двух первых составляющих суммарной экономии на диаграмме на рис. 4.

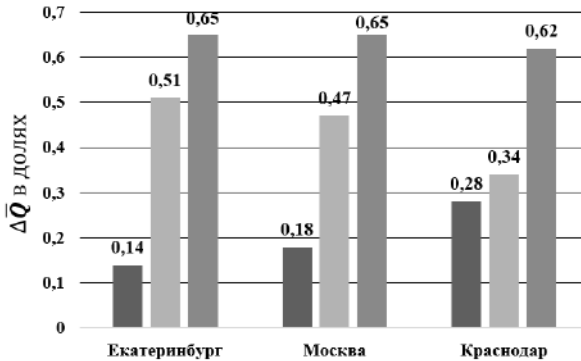


Рис. 4. Общий удельный энергосберегающий потенциал при применении сбросной теплоты на нужды ЦОД и на теплоснабжение внешних потребителей для климатических условий местоположения ЦОД

Одновременно с расчетами экономии проводились исследования затрат энергоресурсов на подготовку приточного воздуха в случае прямого фрикулинга [4]. Энергетически применение прямого фрикулинга имеет преимущества перед применением традиционных систем воздушного охлаждения с полной рециркуляцией и холодильным оборудованием

Работа выполнена в НИУ «МЭИ» при поддержке Министерства науки и высшего образования России (гос. задание № FSWF-2023-0017), в части исследования потенциала энергосбережения при утилизации сбросной теплоты ЦОД, Российского научного фонда (проект № 25-19-00781), в части влияния климата на энергосбережение при применении теплового насоса.

Литература

1. Ричард Соьер. Расчет общей потребности в электроэнергии в центрах обработки данных. Информационная статья №3. American Power Conversion, 2004. // [Электронный ресурс] URL https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1713862407&tl=d=ru&lang=ru&name=WP3_RU.pdf&text=
2. Нил Расмуссен. Расчет технических требований для общего охлаждения в центрах обработки данных. Информационная статья №25. American Power Conversion, 2003. Режим доступа

3. Яковлев, И. В. Эффективность применения сбросного тепла центров обработки данных / И. В. Яковлев, Н. В. Авдокунин // Теплоэнергетика. 2023. № 10. С. 55-64. DOI 10.56304/S0040363623100120. – EDN XJWZMG

4. Яковлев, И. В. Экономия и затраты энергии при обеспечении тепловых режимов центров обработки данных, охлаждаемых наружным воздухом / Яковлев И.В., Авдокунин Н.В., Горелов М.В. // Промышленная энергетика. 2025. №1. С. 41-49. DOI 10.71759/emem – a743.

5. ASHRAE TC9.9 Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices // [Электронный ресурс] URL: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/ashrae_tc0909_power_white_paper_22_june_2016_revised.pdf.

6. Яковлев, И. В. Утилизация сбросной теплоты центров обработки данных в условиях свободного фрикулинга / И. В. Яковлев, Н. В. Авдокунин // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы IV международной конференции, Москва, 21–25 октября 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет МЭИ, 2024. С. 437-438. EDN DYTJGV.

7. Погода и климат. [Электронный ресурс]. URL <http://www.pogodaiklimat>.

УДК 544.332.3

И.А. БУРАКОВ¹, к.т.н.,
В.А. ЙЕ, к.т.н.,
Х.К. ЙЕ, аспирант

Национальный исследовательский университет МЭИ
111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14.
E-mail: BurakovIA@mpei.ru¹

Об определении теплоты сгорания горючих материалов и применении ПРК «Теплота сгорания»

Аннотация. В работе приведены результаты попытки систематизации различных способов определения теплоты сгорания твёрдых, жидких, газовых топлив, как экспериментальной, так и расчётной. Представлен результат свода, вылившийся в создание программы «ПРК «Теплота сгорания – МЭИ».

Ключевые слова: теплота сгорания, уголь, язык программирования C#, калориметрическая бомба, формула Менделеева.

И.А. BURAKOV¹, Candidate of Technical Sciences,
YE Y.A., CTS, YE H.K., graduate student

National Research University "MPEI"
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14.
E-mail: BurakovIA@mpei.ru¹

On the determination of the heat of combustion of combustible materials and the application of the SCC «Heat of combustion»

Annotation. The paper presents the results of an attempt to systematize various methods for determining the heat of combustion of solid, liquid, and gas fuels, both

experimental and calculated. The result of the code is presented, which resulted in the creation of the program «SCC «Heat of Combustion – MPEI».

Key words. Heat of combustion, coal, C#, calorimetric bomb, Mendeleev formula.

Основной характеристикой горючих материалов и, в частности, энергетических топлив, является их теплота сгорания (калорийность). По [1] под теплотой сгорания понимают количество теплоты, полученное при сжигании единицы (массы либо объёма) топлива. Различают высшую и низшую теплоты сгорания. Высшей теплотой сгорания называют количество теплоты, выделившееся при полном сгорании единицы вещества (1 кг, 1 м³ и т.д.), включая теплоту конденсации водяных паров, выделившуюся при охлаждении продуктов сгорания [1]. Низшей теплотой сгорания называют количество теплоты, выделившееся при полном сгорании единицы вещества (1 кг, 1 м³ и т.д.), без учёта теплоты конденсации водяных паров [1]. Известны экспериментальный (определение в «калориметрической бомбе», как наиболее точный способ) и расчётный способы определения теплоты сгорания. На территории Российской Федерации в качестве расчётного способа широко применима к использованию формула Менделеева, представленная ниже формулой (1).

$$Q_s^r = 4,187 * (81 * C^r + 300 * H^r - 25 * (O^r - S^r)) \quad (1)$$

где Q_s^r – низшая теплота на рабочую массу исследуемого топлива; C^r ; H^r ; O^r ; S^r – элементы состава, %.

Согласно [2] формула Менделеева является «наиболее удачным (по точности) расчётным вариантом» определения теплоты сгорания. В основе вывода формулы Менделеева заложен массив экспериментов по определению теплот сгорания органических веществ, включая многие виды твёрдых и жидких топлив. Возможность использования формулы Менделеева кроется в знании элементного состава исследуемых топлив. На основании исследования современных литературных данных имеется понимание о существовании механизмов, позволяющих аналогично формуле Менделеева определять теплоту сгорания исследуемых топлив. Условно, упомянутые механизмы можно систематизировать по двум группам: формулы, позволяющие определяют теплоту сгорания на основе элементного состава; формулы, позволяющие определять теплоту сгорания на основе расчёта массовой доли углерода в нелетучем остатке топлива (FC) и экспериментального определения на аналитическую массу выхода летучих (V^a), влажности (W^a) и зольности (A^a) для исследуемого образца топлива.

К первой из обозначенных групп на основе анализа литературных данных было отнесено 14 существующих формул. Их примерами являются формулы, полученные на основе корреляции Бойе/Кирова (2) и (3), представленные ниже [3]:

$$Q_s^a = 36,474 - 38,5 * A^a - 17,7 * V^a \quad (2)$$

$$Q_s^a = 17,7 * FC + 18,756 - 20,8 * A^a \quad (3)$$

Для второй группы обобщено 19 расчётных формул. Их примерами являются выражения по определению теплоты сгорания, выведенные под руководством Вондрачека (4) и Гивена (5) [4]:

$$Q_s^{daf} = (89,1 - 0,062 * C^{daf}) * C^{daf} + 270 * (H^{daf} - 0,1 * O^{daf}) + 25 * S_t^d \quad (4)$$

$$Q_s^{daf} = 78,3 * C^{daf} + 339,1 * H^{daf} - 33,0 * O^{daf} + 22,1 * S_t^d - 152 \quad (5)$$

Для систематизации имеющихся механизмов расчёта авторами была разработана программа «Программно-расчётный комплекс (ПРК) «Теплота сгорания – МЭИ» [5] (язык программирования C#), позволяющая на основании упомянутых выше механизмов определять теплоты сгорания для твердых и жидких топлив, а также имеющая раздел для расчета теплот сгорания газовых топлив (причём как отнесенных к объемным единицам, так и к массовым единицам). Визуализация программной оболочки представлена на рис. 1.

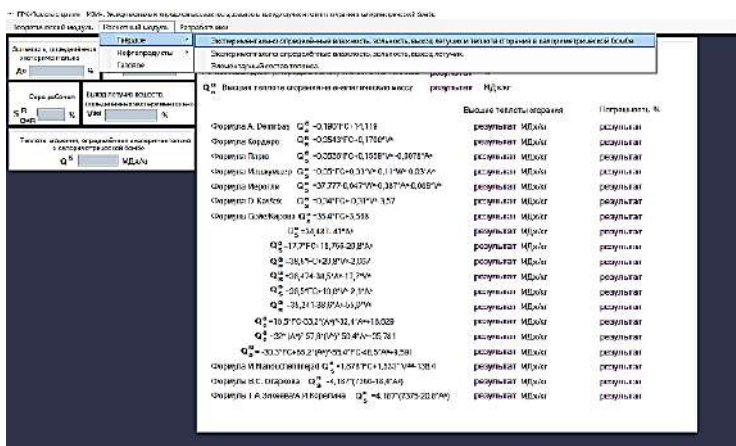


Рис. 1. Визуализация программной оболочки «ПРК «Теплота сгорания – МЭИ»

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка газификатора нового поколения для комплексной переработки ресурсов угольных месторождений» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Литература

1. Бураков И.А. Технология использования водоугольных топлив в энергетике. М.: Издательство МЭИ. 2020.

2. Белосельский Б.С. Технология топлива и энергетических масел. М.: Издательство МЭИ. 2005.

3. C. Qian. Prediction of higher heating values of biochar from proximate and ultimate analysis / C. Qian, Q. Li, Z. Zhang, X. Wang, J. Hu, W. Cao // Fuel 265 (2020) 116925.

4. Фёдорова Н.И. Зависимость теплоты сгорания углей от их химического состава / Н.И. Фёдорова, Е.С. Михайлова, З.Р. Исмагилов // Химия в интересах устойчивого развития. 23 (2015). С.135–138.

5. Бураков И.А. Программа «Программно-расчётный комплекс «Теплота сгорания – МЭИ» / И.А. Бураков, А. Даваахуу, С.К. Попов, С.Н. Петин, И.И. Феоктистов, Йе В.А., Йе Х.К. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617399, 25.03.2025 Бюл. № 4. Номер и дата поступления: 2025615995 21.03.2025.

УДК 662.7

В.А. ЙЕ, к.т.н.,
Х.К. ЙЕ, аспирант,
И.А. БУРАКОВ¹, к.т.н.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14.
E-mail: BurakovIA@mpei.ru¹

Разработка систем энерготехнологической подготовки топлива в мьянме

Аннотация. Разработана схема комплексной энерготехнологической переработки ресурсов угольных месторождений (угля, шахтного газа, пластовой воды). Схема разрабатывалась для условий Республики Союз Мьянма. В качестве исходных углей рассматривались образцы месторождений Тигиит, Калева, Чжо Сейн, Та Пей Чун и Синтаунг.

Ключевые слова. Уголь, шахтный газ, энерготехнологическая переработка, пластовые сточные воды.

YE Y.A., Candidate of Technical Sciences,
YE H.K., graduate student,
I.A. BURAKOV¹, CTS

National Research University "MPEI"
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14.
E-mail: BurakovIA@mpei.ru¹

Development of energy technology fuel treatment systems in Myanmar

Annotation. A scheme of integrated energy-technological processing of coal deposit resources (coal, mine gas, reservoir water) has been developed. The scheme was developed for the conditions of the Republic of the Union of Myanmar. Samples of the Tigiit, Kaleva, Zho Sein, Ta Pei Chun and Sintaung deposits were considered as initial coals.

Key words. Coal, mine gas, energy technology processing, reservoir wastewater.

Одним из существующих решений экологических проблем, возникающих при эксплуатации тепловых электрических станций (ТЭС) работающих на угле является возможность осуществления предварительной подготовки твердого топлива перед его сжиганием, суть которой заключается в глубокой энерготехнологической переработке угля с получением продуктов, отличающихся от исходного топлива по своим агрегатным (в ряде случаев), энергетическим и экологическим показателям. Эти продукты могут быть представлены в твердом, жидком, газообразном агрегатном состоянии и, по сути, являются искусственными топливами [1].

Для эффективности применения методов глубокой энергетической технологической переработки наиболее корректно рассматривать разработку угольного месторождения в комплексе.

На рис. 1 показана технологическая схема использования продуктов угольного месторождения в процессах глубокой энерготехнологической переработки – в цикле энерготехнологического комплекса (ЭТК) или энерготехнологического завода (ЭТЗ) [2, 3]. Схема разработана авторским коллективом текущего труда.

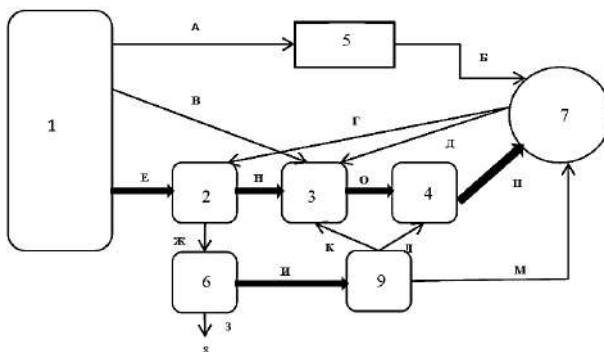


Рис. 1. Технологическая схема комплексной разработки угольного месторождения с применением циклов переработки ЭТЗ [1]:

1 – угольное месторождение; 2 – узел обогащения первой ступени; 3 – узел получения ИКЖТ (ВУТ); 4 – узел газификации; 5 – система очистки и переработки рудничного газа; 6 – система извлечения редких и рассеянных элементов;

7 – ТЭС; 8 – извлеченные элементы; 9 – узел обогащения второй ступени; А – рудничный (шахтный) газ; Б – очищенный рудничный газ; В – пластовые (сточные) воды угольных месторождений; Г – сточные воды ТЭС; Д – отработанные смазочные материалы и (или) сточные воды ТЭС; Е – уголь; Ж – промежуточный продукт и отходы первой ступени обогащения; З – выделенные редкие элементы; И – промежуточный продукт первой ступени обогащения, после узла 6; К, Л, М – концентрат угля после второй ступени обогащения;

Н – концентрат угля после первой ступени обогащения; О – ИКЖТ (ВУТ);

П – синтетический (генераторный) газ.

Продукция, получаемая на ЭТК и ЭТЗ, ориентирована на использование на энергетических объектах (ТЭС, КЭС и т.д.) и промышленных предприятиях. В качестве сырья для систем ЭТК и ЭТЗ рассматриваются угли разрабатываемого угольного месторождения, шахтный газ, присутствующий в различных количествах на этом месторождении, а также сточные воды, образующиеся при разработке рассматриваемого угольного месторождения.

Для представленной на рис. 1 схемы были определены рабочие параметры, вид и характеристики рабочих тел и получаемой продукции, сведены материальные балансы, подобрано оборудование. Данная работа производилась для условий Республики Союз Мьянма. В качестве сходных углей рассматривались образцы месторождений Тигиит, Калева, Чжо Сейн, Та Пей Чун и Синтаунг.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка газификатора нового поколения для комплексной переработки ресурсов угольных месторождений» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Литература

1. Burakov I.A. Development of a system of energy technological processing of coal deposits for energy and other industries / I.A. Burakov, A.Y. Burakov, I.S. Nikitina, Aung H.N., Ye V.A., Aung K.M., E.A. Anufrieva, V.M. Lozenko // Journal of Physics: Conference Series 1683 (2020) 042080.
2. Бураков И.А. Разработка энерготехнологических заводов и оценка возможности их применения на территории Российской Федерации / И.А. Бураков, А.Ю. Бураков, И.С. Никитина, А.А. Дудолин, Аунг Х.Н., Батсамбуу Ул., А.А. Марков, А.О. Парамонова, А.М. Хоменков // Новое в российской электроэнергетике. 12. 2018. С. 34–48.
3. Белосельский Б.С. Технология топлива и энергетических масел. М.: Изд-во МЭИ. 2005.

УДК 66.045.122

Р.Д. АДАКИН¹, соискатель
О.Б. КОЛИБАБА², к.т.н.

Ярославский государственный аграрный университет, ¹
150042 г. Ярославль, Тутаевское ш., 58,
Ивановский государственный энергетический университет, ²
153003, г. Иваново, Рабфаковская, 34
E-mail: adakin@mail.ru¹, koli-baba@mail.ru²

Исследование влияния геометрии дефлекторов на процесс теплоотдачи теплогенератора хлебопекарной печи

Аннотация. В данной статье рассматривается влияние геометрических характеристик дефлекторов на теплоотдачу теплогенератора хлебопекарной печи, используя численное трехмерное моделирование.

Ключевые слова: теплообменник, 3d модель, дефлектор.

ADAKIN R.D¹ aspirant,
KOLIBABA O.B. E.², Ph.d.

Ivanovo State Power Engineering University ¹
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
Yaroslavl State Agrarian University, ²
E-mail: koli-baba@mail.ru ¹, adakin@mail.ru ²

Investigation of the influence of baffle geometry on the heat transfer process of a baking oven heat generator

Annotation. This article examines the effect of the geometric characteristics of deflectors on the heat transfer of a bakery oven heat generator using numerical three-dimensional modeling.

Key words: heat exchanger, 3d model, deflector.

Современные хлебопекарные печи имеют большую линейку моделей, отличающихся по производительности готовой продукции. В качестве источника энергии печи используют электричество, газ и дизельное топливо. Высокопроизводительные топливные печи (90 кВт тепловой мощности) потребляют достаточно много (9.3 кг/ч) дизельного топлива. Печи, где используется генерация тепла за счет сжигания топлива, характеризуются повышенным расходом топлива и, соответственно, недостаточно высоким КПД. Повысить КПД печи возможно за счет интенсификации теплоотдачи теплогенератора (ТГ) посредством конструктивных доработок, таких как перераспределение поверхности теплоотдачи между жаровой трубой и теплообменником, изменение геометрических параметров камеры сгорания, использование кожуха, в который помещают теплогенератор, компоновка трубок теплообменника, наличие и геометрия интенсификаторов теплообмена. На практике теплогенераторы устанавливают в печах по-разному, определенного нормативного акта по месту установки ТГ в печи и по самой конструкции ТГ нет. Все зависит от усмотрения конструктора завода-изготовителя печей, от предварительных расчетов и опыта использования различных вариантов компоновок печей с ТГ в работе при выпечке продукции.

Целью данной работы является исследование влияния интенсификаторов (геометрических параметров дефлекторов) на теплоотдачу теплогенератора.

Невысокое значение КПД существующего теплогенератора объясняется тем, что холодный теплоноситель - воздух не является, как таковым, «холодным», а имеет температуру порядка 200°C, циркулируя внутри печи. Горячий теплоноситель (уходящие газы) удаляется в атмосферу при температуре 350-400°C.

Теплогенератор генерирует тепловую энергию от сжигания топлива горелкой в жаровой трубе, после чего продукты сгорания направляются в двухходовой теплообменник. Холодный теплоноситель - воздух, обгибая трубный пучок и отбирая тепло с поверхности ТГ, повышает свою энтальпию и температуру. Установка интенсификаторов теплоотдачи в виде дефлекторов позволит холодному теплоносителю создавать дополнительные завихрения в приграничной зоне ТГ, повысить турбулизацию потока, обеспечивая рост значений энтальпии и температуры [1-4].

В наших исследованиях было использовано численное моделирование теплообмена и газодинамики на основе метода конечных элементов. Геометрическая 3D модель ТГ реализована в программе Solid Works [5,6]. Задавая необходимые настройки сетки, произвели расчет газодинамики данной модели, имитируя работу ТГ в хлебопекарной печи. Выполнена серия численных расчетов, позволившая определить необходимые конструктивные доработки ТГ и ответить на следующие вопросы:

1. Требуется ли устанавливать кожух на теплогенератор для фиксированного направления холодного теплоносителя (чтобы не было рассеивания теплоносителя).

2. С какой стороны лучше обдувать теплогенератор теплоносителем.

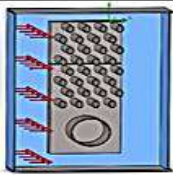
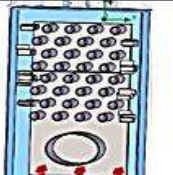
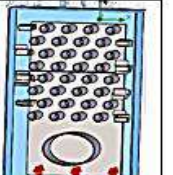
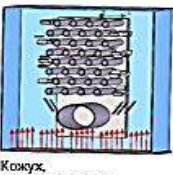
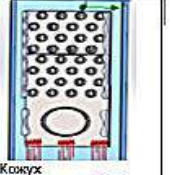
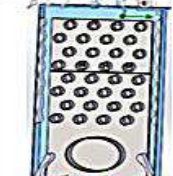
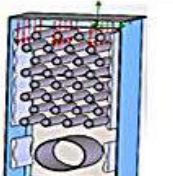
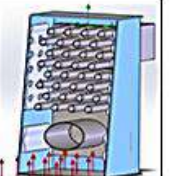
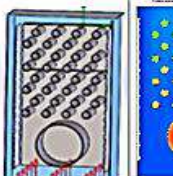
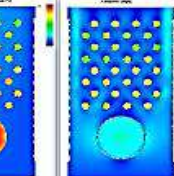
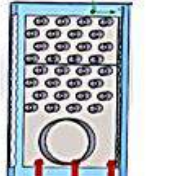
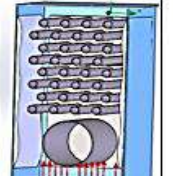
3. Какая геометрическая форма и расположение дефлекторов эффективнее влияет на теплоотдачу.

За базовую модель принята конструкция теплогенератора без кожуха. В таком варианте температура холодного теплоносителя составила 215°C. Данную температуру холодного теплоносителя на выходе из ТГ примем за контрольную, с которой будем сравнивать последующие температуры холодного теплоносителя, полученные при изменении формы и местоположения дефлекторов. Результаты моделирования при различных вариантах модификации ТГ представлены в табл.1.

С установкой направляющего кожуха на ТГ, расчетная температура холодного теплоносителя составила 216-217°C (табл.1). При установке кожуха становится возможным закрепить на его внутренних стенках дефлекторы. Дефлекторы обеспечивают локальные завихрения, образующие пристеночную турбулизацию потока, при этом не оказывая сопротивления основному потоку теплоносителя, проходящего через теплообменную часть теплогенератора.

Проведя серию исследований с различными конструкциями дефлекторов, приходим к выводу, что не все дефлекторы повышают теплоотдачу, часть дефлекторов ее снижает, как только уменьшается значение скорости теплоносителя при повышении сопротивления потоку. Выявив эффективную конструкцию дефлекторов из плоских пластин, авторы получили патент на вариант их расположения относительно теплогенератора в пристеночной зоне кожуха [7]. Данный вид дефлекторов позволил повысить температуру теплоносителя до 220 °C.

Таблица 1. Варианты компоновки ТГ

 Без кожуха Горизонтальный обдув Температура воздуха 212°C	 Без кожуха Вертикальный обдув Температура воздуха 215°C	 Кожух Вертикальный обдув Прямые дефлекторы Температура воздуха 220°C	 Кожух Вертикальный обдув Прямые дефлекторы Температура воздуха 221°C
 Кожух, широкие стенки Вертикальный обдув Каплевидные дефлекторы Температура воздуха 217°C	 Кожух, широкие стенки Вертикальный обдув Прямые дефлекторы Температура воздуха 217°C	 Кожух, широкие стенки Вертикальный обдув Прямые дефлекторы Температура воздуха 220 °C	 Кожух Вертикальный обдув Волнистые дефлекторы Температура воздуха 220,6°C
 Кожух Вертикальный обдув Волнистые дефлекторы Температура воздуха 218,9 °C	 Кожух Вертикальный обдув Волнистые дефлекторы Температура воздуха 220 °C	 Кожух Вертикальный обдув Волнистые дефлекторы Температура воздуха 215 °C	 Кожух Вертикальный обдув Волнистые дефлекторы с отверстиями Температура воздуха 219,4 °C
 Кожух Вертикальный обдув, волнистые дефлекторы Диаграммы скорости и температур обих теплоносителей (продуктов сгорания и воздуха). Температура воздуха 228°C.	 Кожух Вертикальный обдув Волнистые дефлекторы Температура воздуха 230 °C	 Кожух Вертикальный обдув Волнистые дефлекторы Температура воздуха 228 °C	 Кожух Вертикальный обдув Волнистые дефлекторы Температура воздуха 228 °C

Изменив плоскую форму дефлекторов на волнообразную, провели еще ряд исследований, в ходе которых были рассмотрены несколько вариантов с различным радиусом кривизны волны и различной формой возле пристеночной зоны жаровой трубы. Результаты моделирования показали, что большая кривизна волны не дает положительного эффекта, в то время как небольшой радиус волны с малым шагом показал себя более эффективным по сравнению с предыдущими вариантами. Отдельно стоящий волновой дефлектор возле жаровой трубы не показал своей эффективности.

В ходе исследований влияния дефлекторов на теплоотдачу, было замечено, что чем ближе размещены дефлекторы к теплообменной поверхности ТГ, тем теплоотдача ниже, и наоборот, если же отодвинуть на 5-7 см дефлекторы от ТГ, то теплоотдача имеет большее значение, по сравнению с другими вариантами. Размещение дефлекторов на большее расстояние чем 7 см от ТГ, приводит к обратному эффекту – снижению теплоотдачи. Так же не возымел эффект от раздвижения труб теплообменной части ТГ, эффективная теплоотдача получена на определенном фиксированном шаге между трубками ТГ. Таким образом, волнообразные дефлекторы позволили получить максимальное значение температуры холодного теплоносителя, равное 230°C, среди имеющихся вариантов, представленных в табл. 1.

Выводы.

1. В результате моделирования установлено, что наличие кожуха теплогенератора способствует повышению теплоотдачи.
2. Наибольшая теплоотдача имеет место при обдуве теплогенератора вдоль трубного пучка, начиная с жаровой трубы и заканчивая вторым ходом трубного пучка.
3. Установка дефлекторов (совместно с кожухом) как плоских, так и волнообразных, позволяет повысить температуру холодного теплоносителя на выходе из теплообменной части ТГ, что способствует сокращению времени выхода печи на рабочую температуру, снижению расхода топлива и повышению КПД хлебопекарной печи.

Литература

1. Колибаба О.Б. Интенсификация процессов теплоотдачи теплообменников хлебопекарных печей / О.Б. Колибаба, Р.Д. Адакин // Инновационные инженерные разработки в АПК. Сб. тр. по материалам Национальной научно-практической конференции с международным участием. Ярославль, 2023. С. 38-45.
2. Колибаба О.Б. Исследование тепловой работы теплогенератора ротационной хлебопекарной печи / О.Б. Колибаба, Р.Д. Адакин, Е.А. Шуина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. № 6. С. 23-28.
3. Тимонин Н.С. Совершенствование теплотехнологического оборудования хлебопекарного производства / Н.С. Тимонин, Р.Д. Адакин // В книге: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва, 2024.
4. Тимонин Н.С. Моделирование теплотехнологического оборудования хлебопекарного производства / Н.С. Тимонин, Р.Д. Адакин // В книге: Тепловые и

ядерные энерготехнологии. Девятнадцатая всероссийская (одиннадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Материалы конференции. В 6-ти томах. Иваново, 2024. С. 58.

5. CADArtifex.Solidworks 2015 [Текст]/ A Power Guide for Beginner and Intermediate Users. – CADArtifex, 2015.

6. UCF Engineering.SolidWorks lessons [Текст]/ University of Central Florida, College of Engineering and Computer Science, USA, 2015. 253 pages.

7. Колибаба О.Б. Теплогенератор хлебопекарной ротационной печи/ О.Б. Колибаба, Р.Д. Адакин // Патент на полезную модель RU 222074 U1, 11.12.2023.

УДК 621.9

И.А. СТЕПАНОВ, аспирант,
А.Д. ЛОБОВ, аспирант,
Ж.В. МФЕГ, аспирант,
В.С. ГЛАЗОВ, к.т.н

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250 г. Москва, Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
E-mail: StepanovIvA@mpei.ru

Энергосберегающие элементы в наружном ограждении, обеспечивающие тепловой и световой комфорт в рабочей зоне помещения

Аннотация. Представлена оценка влияния энергосберегающих окон на величину тепловых потерь через однооконное наружное ограждение и на естественную освещенность квадратного в плане помещения.

Ключевые слова: наружное ограждение, энергосберегающие окна, тепловые потери, световой проём, естественная освещенность.

I.A. STEPANOV, graduate student,
A.D. LOBOV, graduate student,
J.V. MFEG, graduate student,
V.S. GLAZOV, Ph.D

National Research University "MPEI",
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14, p. 1.
E-mail: StepanovIvA@mpei.ru

Energy-saving elements in the exterior envelope, providing thermal and light comfort in the working area of the room

Abstract. An assessment of the influence of energy-saving windows on the value of heat losses through a single-window exterior envelope and on the natural illumination of a square room in plan is presented.

Key words: external fence, energy-saving windows, heat losses, light aperture, natural illumination.

Введение. Современные энергосберегающие окна представляют собой эффективный инструмент снижения тепловых потерь в зданиях. Однако, замена «старых» окон на новые в зданиях «старой» постройки сопряжена с не очевидными на первый взгляд последствиями, требующими комплексного анализа. Настоящее исследование посвящено оценке влияния энергосберегающих окон на тепловые потери через наружное ограждение помещения для зданий, построенных не по нормам 21 века.

Существующие нормативные требования к естественному освещению помещений, толщина и светопропускание современных энергосберегающих окон, используемых в наружном ограждении, влекут за собой изменение площади оконных откосов и, как следствие, изменение величины тепловых потерь через примыкающие к окнам непрозрачные участки ограждения зданий старой постройки. Поэтому с позиции энергосбережения важно знать: «Величина снижения тепловых потерь непосредственно через энергосберегающее окно будет больше или меньше прироста тепловых потерь через непрозрачные части наружного ограждения, площадь теплообмена которых возрастет за счет увеличенной площади оконных откосов? Поскольку место расположения окна по толщине ограждения влияет на размер площади наружных и внутренних оконных откосов возникает уточняющий вопрос: «Где, с точки зрения минимизации тепловых потерь, следует располагать окно по толщине наружного ограждения?»

Постановка задачи. Оценить величину разности тепловых потерь через наружное ограждение помещения с энергосберегающим окном и не энергосберегающим окном в помещении здания «старой» постройки. Установить, превышает ли величина, на которую снизились тепловые потери, по отношению к величине, на которую возросли тепловые потери через остальные непрозрачные части наружного ограждения. Кроме того, определить скажется такая замена окон на естественную освещенность в помещении. Для этого необходимо:

- Определить величину снижения уровня естественной освещенности в помещении при замене окон, с учетом соблюдения нормативных требований к освещенности помещения.
- Определить, насколько необходимо увеличить площадь светового проема энергосберегающего окна для компенсации снижения освещенности в помещении.

В табл. 1 представлены рассмотренные варианты стеклопакетов.

Решение и анализ.

Оценка изменения уровня освещенности в помещении
Используя среду Mathcad определим изменение уровня освещенности при использовании стекол с разным коэффициентом светопропускания.

Результат расчета, представленный на рис. 1, получен с учетом возможных значений толщин (δ) наружного ограждения помещения и коэффициентов светопропускания (τ) существующих стеклопакетов.

Таблица 1. Типы стеклопакетов и их характеристики

	Тип стеклопакета	Конструкция стеклопакета	Толщина стеклопакета,	Сопротивление теплопередачи, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$	Пропускание света τ (%)
1	Однокамерный	4-12-4	20	0,32-0,34	83
2	Однокамерный, И-стекло	4-16-4И	24	0,58	78
3	Двухкамерный	4-12-4-12-4	36	0,55-0,58	70

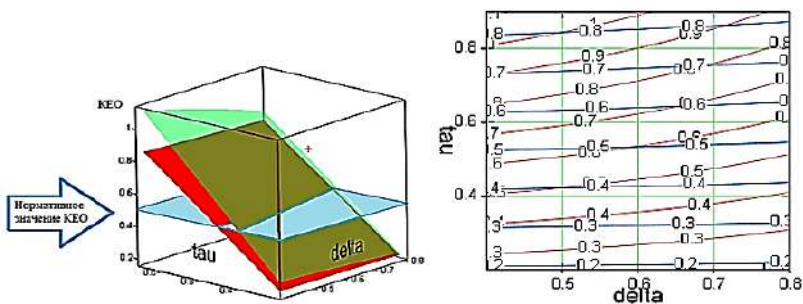


Рис.1. Распределение расчетных значений коэффициента естественной освещенности (KEO) — на уровне пола 0 м, — на высоте 0.8 м от пола и — по действующим нормам [2] для рассматриваемого помещения.

Видно, что при увеличении коэффициента светопропускания окна увеличивается величина КЕО. На его значение также влияет толщина наружного ограждения, но в меньшей степени.

Заключение. Использование энергосберегающих окон, обладающих большим сопротивлением и малой толщиной приводит к увеличению площади оконных откосов, а значит и к увеличению внутренней площади теплообмена ограждения и, как следствие, к возрастанию тепловых потерь через непрозрачные его части.

Расчеты показывают, что энергосберегающие окна имеют более высокое термическое сопротивление, что уменьшает тепловой поток на 32%, по сравнению с обычными окнами при прочих равных условиях. В нашем случае при толщине наружного ограждения в 20 см и толщине энергосберегающего окна 24 мм площадь теплообменной поверхности увеличивается примерно на 13%, а значит и тепловой поток увеличивается пропорционально этой величине. При использовании энергосберегающих окон снижается величина естественной освещенности в помещении на уровне рабочей поверхности. Поэтому для достижения нормативных значений КЕО потребуется дополнительная энергия для

подключения искусственного освещения. С позиции энергосбережения затраты на искусственное освещение при использовании энергосберегающих окон не должны превышать первоначальные потери, связанные с использованием обычных окон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

1. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение».
2. СП 23-102-2003 «Естественное освещение жилых и общественных зданий».
3. СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика».
4. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».
5. СНиП КР 23-01:2013 «Тепловая защита зданий».

УДК 620.9.662.92.001.5

А.В. БУРМАКИНА¹, к.т.н.
С.К. ПОПОВ², д.т.н.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр. 1
E-mail: BurmakinaAV@mpei.ru¹, PopovSK@mpei.ru²

Анализ способов переработки лопастей ветрогенераторов

Аннотация. Показана актуальность проблемы утилизации отработавших лопастей ветроэнергетических установок и нарастающая необходимость ее эффективного решения. Приведен обзор исследований в области утилизации лопастей ветроэнергетических установок и переработки композитных материалов, составляющих основу лопастей. Выделены варианты термической переработки.

Ключевые слова: ветроэнергетика, переработка, утилизация, отходы лопастей ветряных турбин.

A.V. BURMAKINA, Candidate of Engineering
S.K. POPOV, Doctor of Engineering,

National Research University "MPEI",
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14, building 1
E-mail: PopovSK@mpei.ru¹, BurmakinaAV@mpei.ru²

Analysis of wind turbine blade recycling methods

Abstract. The relevance of the problem of recycling of used wind turbine blades and the growing need for its effective solution are shown. A review of studies in the field of recycling of wind turbine blades and processing of composite materials that form the basis of the blades is given. Thermal recycling options are highlighted.

Key words: wind energy, recycling, utilization, wind turbine blades waste.

Жизнь композитным материалам, основу которых составляют стекловолокна, дал французский естествоиспытатель Рене Антуан Фершо де Реомюр еще в 18 веке. В 21 веке композитные материалы со стекловолокном уже не поддаются воздействию коррозии, устойчивы к агрессивной среде и обеспечивают надежные электроизоляционные свойства. Поэтому они нашли применение в разных отраслях современной промышленности, например, в изготовлении лопастей ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1].

Установленная мощность ВЭУ увеличивается с каждым годом. Очевидным лидером является Китай, где мощность ВЭУ увеличивается с каждым годом и на сегодняшний день занимает более 40% от суммарной мощности ВЭУ в мире. В России наблюдается (рис. 1) значительный прирост мощности ВЭУ, начиная с 2019 года, которая в 2023 году составила более 2 500 МВт и продолжает расти [2, 3].

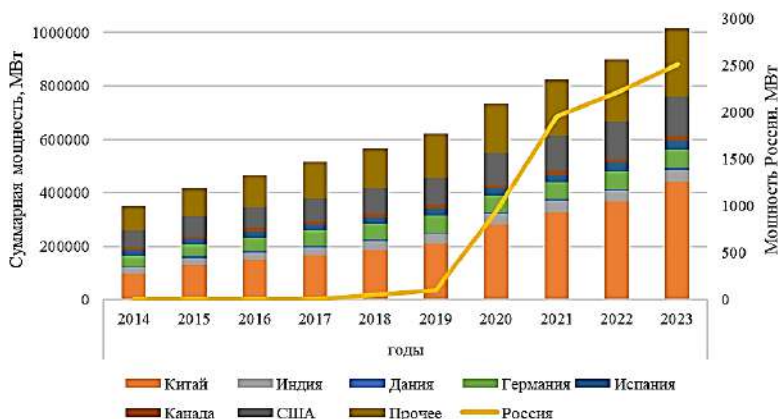


Рис. 1. Изменение мощности ВЭУ в 2014 – 2023 годах

Срок службы лопастей ветряных турбин составляет в среднем около 20 лет [4]. С увеличением объема производства ВЭУ растет актуальность проблемы утилизации установок, выработавших ресурс. Эффективное решение проблемы утилизации лопастей ВЭУ пока не найдено [5], поэтому как временная мера применяется их складирование. По данным Европейской ассоциации ветрогенерации WindEurope, ежегодно складировается более 14000 лопастей, это число увеличивается с каждым годом.

Материал лопастей представляет из себя армированные волокном полимеры (fibre reinforced polymers). Матрицу этого композитного материала преимущественно образует стекловолокно, вырабатываемое из стекла Е. Известные способы переработки лопастей ветроустановок можно разделить на химические, механические и термические [6].

Химический способ состоит в применении растворителей для перевода полимерной смолы в жидкую фазу и высвобождения стекловолокна [7]. Однако, если учесть, что лопасти ветроустановок могут достигать 50 метров в длину, то реализация данного способа требует решения многих вопросов. При этом некоторые растворители могут быть токсичными для окружающей среды [8].

Механические способы переработки основаны на измельчении лопастей до порошкообразного состояния. Измельченный продукт можно добавлять в цемент или в бетон при строительстве, тем самым улучшать их свойства [9, 10]. Задача разделения стекловолокна и смолы при этом не решается. Механические способы сопровождаются значительной запыленностью на производстве с соответствующими негативными последствиями.

Термические способы переработки, к которым относятся пиролиз и газификация, позволяют отделить стекловолокно, сохранив его свойства [11, 12]. Экспериментально установлено, что нагрев и выдержка стеклопластика при 450°C приводит к незначительным повреждениям волокон и дает возможность повторного их применения [13].

Вывод: проведенный литературный анализ приводит к заключению, что перспективным направлением термической переработки лопастей ветроустановок является пиролиз.

Литература

1. Psomopoulos, C., Kalkanis, K., Kaminaris, S., Ioannidis, G., & Pachos, P. (2019). A Review of the Potential for the Recovery of Wind Turbine Blade Waste Materials. *Recycling*, 4(1), 7.
2. Могиленко А. Энергетика и промышленность России №11-12 (487-488) июнь 2024 г. Мировая ветроэнергетика: итоги 2023 года.
3. Renewable capacity statistics 2024, March 2024.
4. Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненашев А. В. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества [Электронный ресурс]. Монография. СПб.: Научное издание, 2021.— 151 с.
5. Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61–99.
6. Paulsen, E. B., & Enevoldsen, P. (2021). A Multidisciplinary Review of Recycling Methods for End-of-Life Wind Turbine Blades. *Energies*, 14(14), 4247.
7. А.Е. Проценко, В.В. Петров, А.Н. Проценко. Сольволиз стеклопластиков с термореактивной матрицей в среде сверхкритического этанола. VI Всероссийская конференция «Химия и химическая технология: достижения и перспективы», 29-30 ноября 2022 г., том 1. С.301.1 -301.3.
8. О. И. Глушкова, Н. С. Лукичева. Технологии вторичной переработки полимерных композитных материалов. Современное состояние и развитие на 2020-е годы. – Композитный мир.
9. Renata Possamai Ribeiro, L. J. Jaramillo Nieves, A. Bernardin, Asmatulu, E-fiberglass waste and fly ash addition on the mechanical performance of Portland cement paste, Published in Cleaner Materials 1 March 2023.
10. Attari, N., Youcef, Y.S., Amziane, S., 2019. Seismic performance of reinforced concrete beam–column joint strengthening by FRP sheets. *Structures* 20, 353–364.
11. G. Jiang, S.J. Pickering, G.S. Walker, K.H. Wong, C.D. Rudd. Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidized bed. *Applied Surface Science* 254 (2008) 2588–2593.

12. Pickering, S. J., Kelly, R. M., Kennerley, J. R., Rudd, C. D., & Fenwick, N. J. (2000). A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites. *Composites Science and Technology*, 60(4), 509–523.

13. Greco A, Maffezzoli A, Buccoliero G, Caretto F, Cornacchia G. Thermal and chemical treatments of recycled carbon fibres for improved adhesion to polymeric matrix. *J Compos Mater* 2013; 47:369 –77.

УДК 661.961.62

В.С. КОРОЛЕВ, аспирант
М.Ю. ШЕВЯКОВ, студент
М.А. КИСЛИЦЫН, аспирант
С.Н. ПЕТИН, к.т.н

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр. 1
E-mail: KorolevVS@mpei.ru

Моделирование и верификация реактора энергохимической аккумуляции для производства синтез-газа

Аннотация. В работе приведены результаты моделирования в Ansys Fluent реактора энергохимической аккумуляции и верификация модели на основании опытно-экспериментальных данных.

Ключевые слова: водород, природный газ, моделирование, черная металлургия, энергохимическая аккумуляция, реактор.

V.S. KOROLEV, graduate student
M.YU. SHEVYAKOV, student
M.A. KISLITSYN, graduate student
S.N. PETIN, Candidate of Engineering

National Research University "MPEI",
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14, building 1
E-mail: KorolevVS@mpei.ru

Modeling and verification of an energy chemical accumulation reactor for synthesis gas production

Annotation. The paper presents the results of modeling an energy chemical accumulation reactor in Ansys Fluent and verification of the model based on experimental data.

Key words: hydrogen, natural gas, modeling, ferrous metallurgy, energy chemical accumulation, reactor

В черной металлургии России значительный потенциал энергосбережения связан с использованием газов сталеплавильных конвертеров, оцениваемый в 1,25 млн тонн условного топлива в год. На данный мо-

мент конвертерные газы на отечественных заводах не применяются в качестве топлива, а просто сжигаются на свечах.

В работах [1-3] предлагаются перспективные способы использования конвертерных газов для получения синтез-газа для производства водорода и синтетического жидкого топлива (СЖУ). Утилизация конвертерных газов для этого производства характеризуется снижением выбросов парниковых газов в атмосферу, что приводит к окупаемости данных проектов в период до 6 лет [4].

Нестандартным оборудованием для прилагаемых способов утилизации конвертерных газов является реактор энергохимической аккумуляции (ЭХА), где происходит прямая подача природного газа в поток конвертерного газа. Для разработки данного реактора в данной работе используется численное моделирование с верификацией данных на существующих экспериментах [5, 6]. При разработке реактора ЭХА необходимо принимать во внимание стойкость к высоким температурам при использовании каталитического действия частиц уноса оксидов железа в потоке конвертерного газа.

Для проведения численного моделирования в программе КОМПАС-3D была создана геометрическая трехмерная модель реактора ЭХА, импортированная впоследствии в Ansys Fluent (рис. 1).

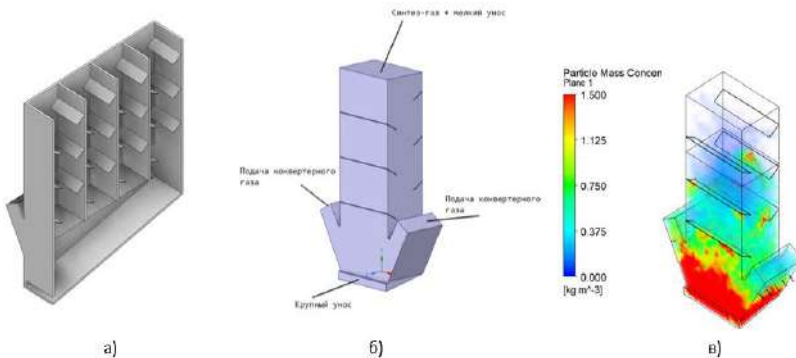


Рис. 1. 3D модель реактора ЭХА:

а – модель четырехсекционного реактора, б – расчетная трехмерная модель внутреннего объема одной секции, в – распределение концентраций частиц уноса после моделирования

Для верификации полученной модели Ansys Fluent используются результаты расчета равновесного состава в программе Mathcad [7] с учетом теплоты уноса. Верификация результатов моделирования реактора энергохимической аккумуляции представлен в табл. 1.

Таблица 1. Верификация результатов моделирования реактора энергохимической аккумуляции

Параметр	Mathcad	Ansys Fluent
Температура синтез-газа, °C	973	990
Состав синтез-газа, %	Объемная доля, %	
CH ₄	0,003	0,0059
CO ₂	6,251	5,82
CO	59,952	60,05
N ₂	9,816	9,59
H ₂	20,651	20,83
O ₂	0	0
H ₂ O	3,326	3,21

Вывод. Разработанная численная модель реактора ЭХА для производства синтез-газа согласуется с экспериментами и другими расчётами, учитывая унос частиц. Модель применима на этапах НИОКР по разработке реакторов ЭХА для утилизации конвертерных газов.

Литература

1. Петин, С.Н. Патент на изобретение №2637439 (РФ), МПК7 C21C5/38. Способ утилизации конвертерных газов для производства водорода / С.Н. Петин, А.В. Бурмакина, В.А. Ипполитов. Заявлено 21.06.2016; опубл. 04.12.2017. Бюл. № 34.
2. Патент РФ на изобретение № 2800904 МПК7: C21C 5/38. Способ утилизации конвертерных газов для производства жидкого топлива из водородосодержащего синтез-газа. Патент на изобретение (РФ), МПК7. / С.Н. Петин, В.С. Королёв, А.А. Борисов, А.В. Бурмакина, А.Г. Гашо – Заявл. 2022132312 от 09.12.2022; опубл. 31.07.2023. Бюл. № 22.
3. Петин, С.Н. Разработка способа производства водорода на базе газовых отходов конвертерного производства стали/ С.Н. Петин, А.А. Борисов, Д.Д. Голдобин, В.С. Королёв, А.В. Бурмакина // Промышленная энергетика. 2023. №6. С. 32-42, DOI: 10.34831/EP.2023/75.53.004
4. Петин, С.Н. Анализ эффективности производства водорода в теплоэнергетической системе металлургического производства / С.Н. Петин, Д.Д. Голдобин, В.С. Королёв, М.Ю. Шевяков, А.В. Бурмакина // Промышленная энергетика. 2024. № 6.
5. Картавцев, С.В. Природный газ в восстановительной плавке. СВС и ЭХА / С.В. Картавцев. Магнитогорск: МГТУ, 2000.
6. Шевяков М.Ю. Анализ и исследование способа производства водорода на основе энергохимической аккумуляции конвертерных газов/ М.Ю. Шевяков, В.С. Королёв, М.А. Кислицын, С.Н. Петин // Технологии будущего: IX Национальная (с международным участием) научно-техн. конф. студентов и аспирантов (13–17 мая 2024 г., Москва): сборник трудов конференции. М.: Изд-во МЭИ, 2024. С. 243–254.
7. Повышение эффективности теплотехнологий при использовании природного газа и кислорода: монография / С.К. Попов, С.Н. Петин, И.Н. Свистунов и др. М.: Изд-во МЭИ, 2018. 192с.

УДК 62.932.2

О.Б.КОЛИБАБА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул.Рабфаковская, 34
E-mail: koli-baba@mail.ru

Применение метода анализа иерархий к выбору технологии обращения с твердыми коммунальными отходами и источника ее финансирования

Аннотация. Предложен научный подход к решению многокритериальной задачи выбора технологии обращения с твердыми коммунальными отходами и источника ее финансирования, в основу которого положен метод анализа иерархий.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, метод анализа иерархий, технологии переработки, критерий, альтернатива

O.B. KOLIBABA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: koli-baba@mail.ru

Application of the Analytical Hierarchy Processing Method to the Selection of Solid Municipal Waste Management Technology and its Financing Source

Abstract: A scientific approach is proposed to solving the multi-criteria problem of selecting a technology for handling municipal solid waste and a source of its financing, based on the method of hierarchy analysis.

Key words: municipal solid waste, hierarchy process analysis, recycling technologies, criterion, alternative.

В настоящее время не существует идеального решения, которое позволило бы наиболее эффективно и в максимальном объеме утилизировать твердых коммунальных отходов (ТКО). Все имеющиеся в настоящее время технологии обладают своими преимуществами и недостатками. Выбор того или иного метода, как правило, осуществляется волюнтаристски, без какого-либо научного обоснования.

Сравнение альтернативных технологических вариантов является комплексной задачей, в которой должны быть учтены экологические, технологические, экономические и социальные критерии. Практически, во всех случаях и на всех стадиях процесса выбора технологии переработки ТКО возникают сложные, плохо формализуемые задачи, описываемые неоднозначными характеристиками, соответственно, для подготовки заключения необходимо прибегать к экспертной оценке.

Ввиду сложности и многоаспектности данной проблемы, постановка задачи выбора технологии переработки ТКО может быть представлена в виде модели многокритериального принятия решений.

Безусловно самым востребованным среди многокритериальных методов на сегодняшний момент является метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process - AHP), который позволяет принимать сложные решения, разделяя их на иерархические уровни [1,2]. Главным достоинством АНР является его универсальность, применимость при анализе вероятных сценариев развития ситуаций, применимость для тех ситуаций, когда имеет значение мнение лица, принимающего решение при выборе оптимального варианта из имеющихся альтернатив.

Идея метода анализа иерархий состоит в структуризации путем построения многоуровневой иерархии, объединяющей все представляющие интерес компоненты, которые сравниваются между собой с использованием матриц попарных сравнений. В результате становится возможным получение численных оценок интенсивности взаимовлияния элементов иерархии, на основе которых оцениваются степени предпочтительности альтернатив относительно главной цели.

Методология использования АНР требует разработки иерархической структуры, включающей цели, основные критерии, альтернативы. Для решения задачи выбора технологии утилизации ТКО составлена схема модели АНР (рис. 1). Предложено 6 критериев (критерий снижения массы ТКО – K_m , критерий количества опасных выбросов – $K_{в.т.в}$, критерий выбросов углерода в атмосферу – $K_{у.с.}$, критерий оценки степени использования энергии ТКО – K_t , критерий экономической привлекательности – $K_э$, критерия доли массы, удаляемой при переработке – $K_{ут}$), сочетание которых образуют 5 альтернатив обращения с ТКО.

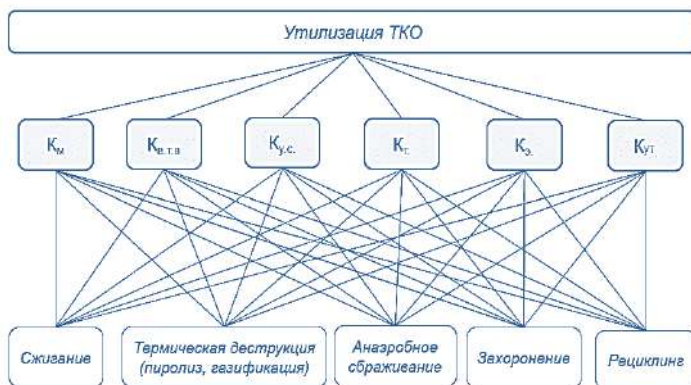


Рис. 1. Схема модели АНР для выбора метода обращения с ТКО

Решение задачи методом АНР показало, что технологии термической деструкции ТКО являются предпочтительными, т.к. обладают наибольшим значением полученного в результате расчета весового коэффициента (0,305). Наименее привлекательно захоронение (0,131).

Для принятия решения об источнике финансирования проекта по переработке ТКО составлена схема модели АНР (рис. 2). На первом иерархическом уровне находится цель - получение прибыли. Она ограничена 4 критериями: стоимость финансирования (СФ), период финансирования (ПФ), льготный период (ЛП), вероятность финансирования (ВФ).

Расчеты показали, что государственно-частное партнерство является предпочтительным источником финансирования проектов по переработке ТКО, т. к. обладают наибольшим значением весового коэффициента (0,425). Наименьший интерес представляет частный бизнес (0,175).

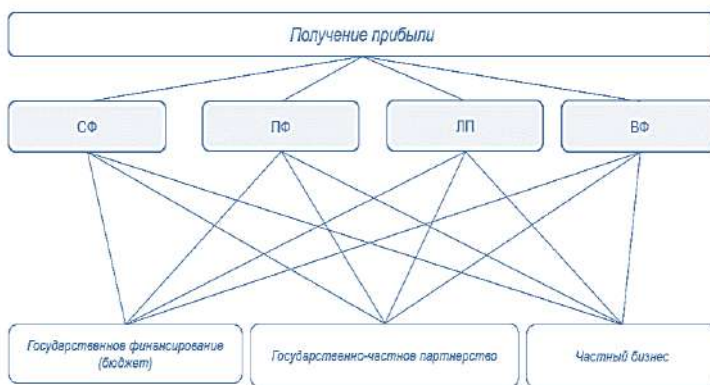


Рис. 2. Схема модели АНР для решения задачи финансирования проекта по переработке ТКО

Выводы. Разработан научный подход к сопоставлению и выбору технологии утилизации ТКО заданного состава на основе комплексного учета энергетических, экологических и экономических факторов; к выбору источника финансирования проектов по переработке ТКО на основе комплексного критерия с учетом стоимости, периода и вероятности финансирования, а также льготного периода.

Литература

1. Саати, Т. Принятие решений: Метод анализа иерархий / Т. Саати; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. - Москва: Радио и связь, 1993. — 314 с.
2. Чечнев, В.Б. Анализ и классификация многокритериальных методов принятия решений/ Онтология проектирования, №4, том 14, 2024, с. 607–624. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-607-624.

УДК 620.9:662.92.001.5

С.К. ПОПОВ, д.т.н.,
А.А. ВАЛИНЕЕВА, к.т.н.

Национальный исследовательский университет "МЭИ"
111250 г. Москва, Красноказарменная улица 14
E-mail: popovsk@mpei.ru, valineevaaa@mpei.ru

Моделирование теплопроводности древесных пеллет в процессе торрефикации

Аннотация. В работе представлен обзор и сопоставительный анализ способов расчета эффективной теплопроводности древесных пеллет, подвергаемых торрефикации.

Ключевые слова: торрефикация, древесные пеллеты, математическое моделирование, теплообмен

S.K. POPOV, Doctor of Engineering,
A.A. VALINEEVA, PhD in Engineering sciences

National Research University "MPEI",
111250, Moscow, Krasnokazaremnaya St. 14
E-mail: popovsk@mpei.ru, valineevaaa@mpei.ru

Modeling thermal conductivity of wood pellets during torrefaction

Abstract. The paper presents a review and comparative analysis of methods for calculating the effective thermal conductivity of wood pellets subjected to torrefaction.

Key words: torrefaction, wood pellets, mathematical modeling, heat exchange.

На мировом рынке древесных пеллет появился новый продукт – пеллеты, подвергнутые торрефикации (низкотемпературному пиролизу) [1]. Такие пеллеты обладают улучшенными теплотехническими характеристиками по сравнению с необработанными. Совершенствование процесса торрефикации возможно на основе создания и исследования математической модели пиролиза углеродсодержащих частиц в газовом потоке [2, 3]. Одна из задач, возникающих при математическом моделировании, – выбор способа расчета эффективной теплопроводности пеллет с учетом их порозности, которая непрерывно возрастает в процессе торрефикации.

Известен ряд зависимостей для расчета λ_{ef} – коэффициента эффективной теплопроводности гетерогенной системы по свойствам фаз. Помимо формулы аддитивности [2, 3], можно выделить зависимости, предложенные Г.Н. Дульневым, Н.Ю. Тайцем, Л.А. Бровкиным, В.И. Оделевским.

Формула аддитивности

$$\bar{\lambda}_{ef} = \frac{\lambda_{ef}}{\lambda_{solid}} = 1 - \varepsilon + \varepsilon v; \quad v = \frac{\lambda_{gas}}{\lambda_{solid}}, \quad (1)$$

где λ_{solid} , λ_{gas} – коэффициенты теплопроводности соответственно твердой фазы и газа, заполняющего поры; ε – порозность. Выбрав λ_{solid} в качестве масштаба, получаем безразмерный симплекс $\bar{\lambda}_{ef} = \lambda_{ef} / \lambda_{solid}$ – относительный коэффициент эффективной теплопроводности пористой частицы.

Формула Г.Н. Дульнева [4]

$$\bar{\lambda}_{ef} = C^2 + v(1-C)^2 + 2vC(1-C)(vC + 1 - C)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь C – геометрический параметр, связанный с порозностью уравнением

$$2C^3 - 3C^2 + 1 - \varepsilon = 0; \quad C \in (0, 1).$$

Формула Н.Ю. Тайца [5]

$$\bar{\lambda}_{ef} = \frac{1 - \varepsilon^{k-1}(1-v)}{1 - \varepsilon^{k-1}(1-v)(1-\varepsilon)},$$

где k – коэффициент формы мелкого тела, образующего садку. Для садки со слоистой структурой $k = 1$, с волокнистой структурой $k = 2$, с зернистой $k = 3$. При $k = 3$ формула принимает вид

$$\bar{\lambda}_{ef} = \frac{1 - \varepsilon^2(1-v)}{1 - \varepsilon^2(1-v)(1-\varepsilon)}. \quad (3)$$

Формула Л.А. Бровкина [6]

$$\bar{\lambda}_{ef} = k_1 k_2 (1 - \varepsilon) + v \varepsilon \quad (4)$$

содержит два поправочных коэффициента. Коэффициент k_1 дает поправку на удлинение траектории тепловых потоков при обтекании пор. Рекомендуется принимать $k_1 = 2/3$. Коэффициент k_2 дает поправку на увеличение термического сопротивления в местах контакта отдельных тел. При достаточно малых зазорах рекомендуется принимать $k_2 = 1$.

Формула В.И. Оделевского [7] для матричной системы с кубическими газовыми включениями

$$\bar{\lambda}_{ef} = 1 + \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)/3 + 1/(v-1)}.$$

Если включения имеют форму длинных призм или цилиндров, то

$$\bar{\lambda}_{ef} = 1 + \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)/2 + 1/(v-1)}. \quad (5)$$

Для температурного уровня не выше температур торрефикации можно не учитывать радиационный теплообмен в порах [8]. Полученные на этой основе результаты расчета представлены на рис. 1.

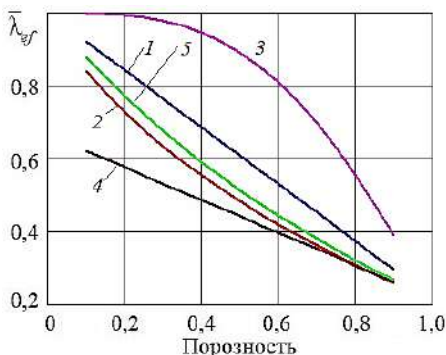


Рис. 1. Зависимость $\bar{\lambda}_{ef}$ от порозности: 1 – формула аддитивности (1); 2 – Г.Н. Дульнев (2); 3 – Н.Ю. Тайц (3); 4 – Л.А. Бровкин (4); 5 – В.И. Оделевский (5)

При отсутствии экспериментальных данных по эффективной теплопроводности целесообразно выбрать формулу аддитивности.

Различные подходы к учету радиационного теплообмена в порах торрефицируемых пеллет вносят существенные расхождения в результаты расчета и потому требуют дополнительных исследований.

Литература

1. <https://www.blackwood-technology.com/offering/torrefied-pellets/>
2. Валинеева А.А. Повышение эффективности установок торрефикации гранулированного биотоплива на основе исследования его низкотемпературного пиролиза. Автореф/ дис. ... канд. тех. наук: 2.4.6. / Валинеева Анна Александровна. М., 2024.
3. Wardach-Swiecicka, I. Modelling thermal behaviour of a single solid particle pyrolysing in a hot gas flow / I. Wardach-Swiecicka, D. Kardaś // Energy, 221 (2021) 119802. – DOI: 10.1016/j.energy.2021.119802
4. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия. 1974.
5. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Metallurgizdat. 1962.
6. Бровкин Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах. Иваново: ИЭИ. 1973.
7. Оделевский, В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем / В.И. Оделевский // Журнал технической физики. 1951. Т.21. Вып. 6. С. 667–677.
8. Nhuchhen, D.R. Investigation into overall heat transfer coefficient in indirectly heated rotary torrefier / D.R. Nhuchhen, P. Basu, B. Acharya // Int J Heat Mass Transf 2016;102:64–76. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.011.

УДК 621.181.172:536.246

С.Н. ПЕТИН, к.т.н.
В.Р. ЖИХАРЕВА, студент
А.В. БУРМАКИНА, к.т.н.
В.Д. ВАНЮШКИН, к.т.н.

Национальный исследовательский университет "МЭИ"
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр. 1
E-mail: PetinSN@mpei.ru

Исследование процессов теплообмена в элементах газотрубного котла

Аннотация. В работе проводится экспериментальное исследование и численное моделирование водогрейного газотрубного котла для определения методики теплового расчета различных элементов котла.

Ключевые слова: газотрубный котел, топочная камера, поворотная камера, дымогарные трубы, конвективный и лучистый теплообмен, свободная конвекция

S.N. PETIN, Candidate of Engineering
V.R. ZHIKHAREVA, student
A.V. BURMAKINA, Candidate of Engineering
V.D. VANIUSHKIN, Candidate of Engineering

National Research University "MPEI",
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14, building 1
E-mail: PetinSN@mpei.ru

Study of heat exchange processes in elements of a gas-tube boiler

Abstract. The paper presents the results of an experimental study for selecting calculation equations for convective and radiant heat exchange for various elements of a fire-tube boiler.

Keywords: fire-tube boiler, combustion chamber, rotary chamber, smoke tubes, convective and radiant heat exchange

Для использования методик расчетов водотрубных котельных агрегатов [1, 2] требуется их корректировка, так как между газотрубными и водотрубными котлами имеются явные различия в конструктивных характеристиках и в режимах движения газовых и водяных сред. Несмотря на наличие большого количества публикаций [3–10], тема теплового расчета газотрубных котлов остается актуальной и на данный момент.

В качестве объекта исследования был выбран газотрубный водогрейный котел "VIESSMANN" Vitomax 200HW тип M238, который оборудован горелками "Weishaupt" G70/3-A ZM-NR (W-FM 100/200). На рис. 1 представлена схема движения газового теплоносителя в котле.

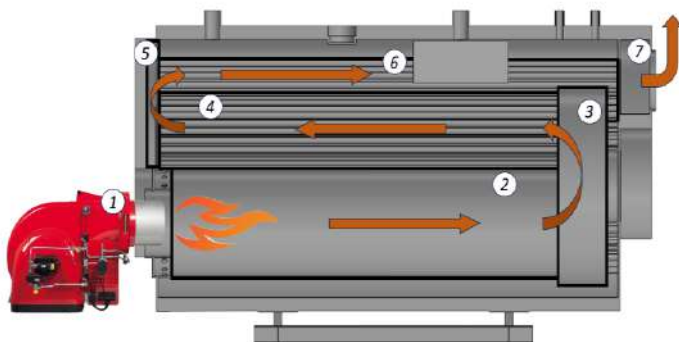


Рис. 1. Схема движения газового теплоносителя в котле

Топливо и воздух подаются в горелочное устройство 1. В топочной камере 2 (первом газоходе) продукты сгорания топлива проходят в направлении к задней поворотной камере 3, разворачиваются на 180° и поступают в первый пучок дымогарных труб (второй газоход) 4. Проходя через фронтальную поворотную камеру 5, газы проходят во второй пучок дымогарных труб (третий газоход) 6, а затем через патрубок отходящих газов 7 поступают в систему удаления дымовых газов в атмосферу.

В процессе проведения физического экспериментального исследования в котле были измерены температуры на выходе из топочной и поворотных камер. Также для различных элементов котла проводились тепловые расчеты, достоверность которых определялась схожестью расчетными и экспериментальными температурами на выходе из элемента котла. В процессе разработки методики теплового расчета определены закономерности, которые не учитываются в [1-3]. Во-первых, необходимо учитывать наличие конвективного теплообмена в поворотной камере с учетом расширения канала, который способствует увеличению коэффициента теплоотдачи со стороны газа [8, 9]. Во-вторых, необходимо учитывать внешний теплообмен со стороны водяного теплоносителя при расчете задней поворотной камеры и дымогарных труб второго и третьего газохода, так как по данным результатов численного моделирования (рис. 2,б) и [10] во внутреннем объеме котла вода движется преимущественно за счет свободной конвекции, что приводит к снижению коэффициента теплопередачи до 10%. Учет внешнего теплообмена со стороны топочной камеры не требуется, так как она принудительно омывается теплоносителем.

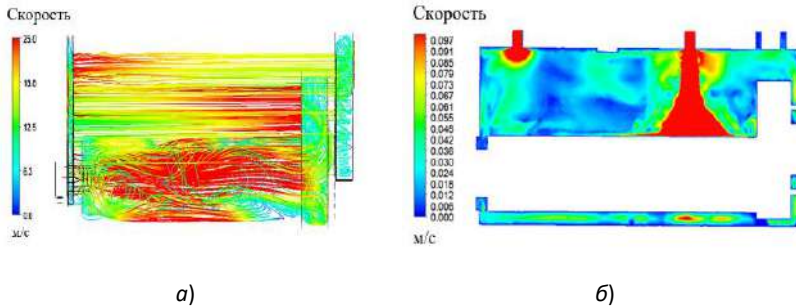


Рис. 2. Численное моделирование продуктов сгорания (а) и водяного теплоносителя (б) в газотрубном котле

Вывод. Проведенное экспериментальное исследование и численное моделирование газотрубного котла позволяет определить закономерности для теплового расчета отдельных элементов. Полученные результаты могут быть использованы для создания уточненных методик расчета газотрубных водогрейных котлов.

Литература

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973.
2. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998.
3. Расчет жаротрубно-дымогарного котла / под ред. А.П. Лумми, В.А. Мунц. ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2009.
4. Сафьянц С.М., Боец Ю.А., Сафьянц А.С. Анализ особенностей теплоотдачи в жаротрубных котлах малой мощности // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. 2010. № 12. С. 213–221.
5. Хаустов С.А., Затворин А.С. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов // Вестник науки Сибири. 2014. № 2 (12). С. 21–28.
6. Анализ проблем проектирования современных жаротрубных котлов / И.И. Комаров, Д.М. Ростова, А.Н. Вегера, П.Г. Жотвяк // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 10. С. 6–16.
7. Исследование режимов работы и методика теплового расчета жаротрубно-дымогарного котла мощностью 3 МВт / К.А. Плешанов, Г.В. Палагин, М.Н. Зайченко, Д.А. Хохлов // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 43–49. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-1-43-49>
8. Local Heat Transfer Downstream of an Abrupt Expansion in a Circular Channel With Constant Wall Heat Flux / J.W. Baughn, M.A. Hoffman, R.K. Takahashi, B.E. Launder // J. Heat Transfer. 1984. V. 106. No. 4. P. 789–796.
9. Бухмиров В.В. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения). Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2007.
10. Васильев А.В., Антропов Г.В., Баженов А.И., Захаров В.В., Лыгин П.А., Кочегаров Н.Н., Попов С.П. Повышение надежности жаротрубных водогрейных котлов // Промышленная энергетика. 1998. №7. С. 19–21.

УДК 697.31

М.С. ПУРДИН, к.т.н., доцент;
В.В. ЮЗЮК, аспирант;
Р. МАГОМЕДОВА, аспирант

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17, В-104
E-mail: PurdinMS@mpei.ru

Теплотехнические проблемы создания систем обеспечения микроклимата в зданиях на основе низкопотенциальных источников теплоты

Аннотация. В докладе рассмотрены современные проблемы создания систем обеспечения тепловых и влажностных режимов зданий на основе низкопотенциальных источников теплоты.

Ключевые слова: микроклимат, низкопотенциальные источники теплоты, аккумулятирование теплоты, низкопотенциальные теплообменные устройства.

M.S. PURDIN, Associate Professor, Ph.D.;
V.V. YUZUK, postgraduate student;
R. MAGOMEDOVA, postgraduate student

National Research University "MPEI",
111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 17, V-104
E-mail: PurdinMS@mpei.ru

Thermal engineering problems of creating systems for ensuring microclimate in buildings based on low-potential heat sources

Abstract. The report examines modern problems of creating systems for providing thermal and humidity conditions for buildings based on low-potential heat sources.

Key words: microclimate, low-potential heat sources, heat accumulation, low-potential heat exchange devices.

В последние десятилетия наблюдается высокий уровень интереса к энергосберегающим технологиям домостроения, расширению области комфортного пребывания человека в помещениях [1] и снижению углеродного следа на фоне глобального потепления [2], увеличения численности населения Земли и роста потребления электроэнергии на вычислительные системы различного назначения [3]. Как показывают многолетние исследования, единственный путь к одновременному учету всех интересов заключается в применении низкопотенциальных вторичных и природных источников теплоты.

Доля отопления, относительно общего количества тепловой энергии, отпущенной в централизованных системах теплоснабжения потребителям в России, составляет 40 % (481,8 млн Гкал в 2021 году) [4]. Для

сравнения, объем потребления электроэнергии в 2021 году – 1090,4 млрд кВт·ч (934,6 млн Гкал) [5]. Учитывая, что большая доля этой электроэнергии в итоге преобразуется во вторичную теплоту, можно утверждать, что в целом низкопотенциальных этих и прочих источников вполне достаточно, чтобы полностью заместить потребление тепловой энергии на отопление. Проблемой в этой области является неглубокая изученность эффективных методов отбора теплоты низкопотенциальных источников и сопутствующих вопросов, не позволяющая проводить оптимизацию технических решений. Будь то грунтовые теплообменники, утилизаторы теплоты дымовых газов с высокой влажностью и коррозионной активностью или различные системы сбора и аккумуляции теплоты окружающей среды. При проектировании грунтовых теплообменников [6] инженеры пользуются грубыми эмпирическими данными и формулами. Многие теплотехнические задачи не решены.

Основной проблемой транспортировки низкопотенциальной теплоты от источника к потребителю является уменьшение работы на трансформации теплоты и перемещение теплового агента, а также тепловых потерь. В этом направлении уже проведено много исследований, однако наибольший интерес представляет оптимизация трансформаторов теплоты. В последние десятилетия изобретены различные многоступенчатые тепловые насосы [7], осуществляется подбор более экологически безвредных и эффективных фреонов [8].

Эффективность всей системы теплоснабжения значительно зависит от эффективности потребителей. Основным критерием при подборе отопительных приборов является температурный график системы отопления, однако существующие работы показывают, что он не оптимален, а минимизации тепловых потерь [9] и повышения эксергетической эффективности [10] системы теплоснабжения можно достичь при более низких температурах в тепловой сети. Для этого нужны такие теплообменные устройства, которые позволят отапливать помещения при минимальной температуре теплоносителя. Для эффективного применения низкопотенциальных источников уровень температуры теплоносителя должен быть значительно ниже верхней границы температур этих источников. В работе [11] приведены диапазоны температур низкопотенциальных источников, откуда следует, что для их эффективного использования необходимо стремиться к применению теплообменных устройств с разницей температур между теплоносителями порядка 1 °C. Иначе термические сопротивления и тепловые потери велики и не позволят эффективно использовать теплоту низкопотенциальных источников. Например, в тепловых насосах современных систем отопления фреон нагревается примерно от 0 °C до 40-70 °C, а коэффициент трансформации теплоты (КТТ) при этом приближается к 3, что нерентабельно, так как он близок к отношению затраченной теплоты к полезной генерации на ТЭЦ, а в таких условиях для отопления выгодно получать теплоту напрямую от котла. Применение правила «1 градуса» позволит

нагревать теплоноситель системы отопления до 25-30 °С, а КТТ составит 5-6 [7].

Уже изобретен целый ряд низкопотенциальных теплообменных устройств: «теплые полы», «теплые стены», потолочные маты, активная теплозащитная ограждающая конструкция [12]. Все они используют существующие поверхности в помещении для поддержания требуемых температурных условий, а температура в них близка к комнатной. Они не занимают полезного объема и максимально расширяют область комфортного пребывания человека в помещении. Проблемой данного подхода является малая изученность теплообмена, надежности, способов реализации и т.д. На данный момент относительно хорошо известно только о системе «теплый пол».

Вывод. Перспективным направлением исследований в области поддержания микроклимата в помещениях, зданиях и сооружениях является решение теплотехнических задач и оптимизация теплообменных устройств для сбора низкопотенциальной теплоты, ее передачи и отопления с учетом правила «1 градуса».

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (гос. задание № FSWF-2023-0017), в части исследования теплотехнических проблем создания систем обеспечения микроклимата, и РФФ (проект № 25-19-00781), в части создания методических основ обеспечения теплового режима в зданиях на основе низкопотенциальных источников.

Литература

1. Бухмиров В.В., Пророкова М.В. Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий // Вестник ИГЭУ. 2015. № 4. С. 5-10.
2. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Безуглеродный мир: возможно ли достижение глобальной климатической нейтральности // Теплоэнергетика. 2024. № 12. С. 3-16.
3. World Energy Outlook 2024 // International Energy Agency. 2024.
4. Отчет о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2021 году // РЭА Минэнерго России. 2022.
5. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году // АО «СО ЕЭС». 2022.
6. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоёв Земли // М.: Граница. 2006. 173 с.
7. Purdin M.S., Yuzyuk V.V. Investigation of the Efficiency of a Two-Stage Isobutane Heat Pump // Tech. Phys., 2024, Vol. 69, No. 9, pp. 2472–2481.
8. Purdin M.S., Yuzyuk V.V. Selection of Efficient and Environmentally Friendly Working Fluids for Ground Source Heat Pumps // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2024. pp. 1-6.
9. Баймачев Е.Э., Манзарханова Л.М., Туфанова М.В., Левицкий А.И. Оптимизация температурного графика централизованного теплоснабжения по критерию минимума затрат эксергии // Вестник ИрГТУ. 2015. № 6(101). С. 68-72.
10. Волков А.В., Маленков А.С., Шелгинский А.Я., Кутько Н.Е. Эксергетический анализ системы теплоснабжения с пониженной температурой обратной сетевой воды // Надеж. и безопас. Эн-ки. 2018. Т. 11. № 3. С. 227-234.

11. Purdin M.S. Thermodynamic analysis for definition of low-potential heat sources // Unconventional Resources. Vol. 5. 2025. P. 100126.

12. Пурдин М.С. Активная теплозащитная ограждающая конструкция // Патент № RU2809426C1, 11.12.2023.

УДК 621.311.24:621.313.12

Н.М. САВЧЕНКОВА, к.т.н.,
М.С. СИНЬБУХОВА, студент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1
E-mail: savchenkovnm@mpei.ru

Параметризация упорядоченной пористой структуры тепловой трубы

Аннотация. В работе представлено описание 3d моделей единичных элементов упорядоченной пористой структуры тепловых труб и оценка преимуществ параметризации образцов.

Ключевые слова: тепловые трубы, пористые структуры, параметризация, CAD-системы.

N.M. SAVCHENKOVA, Ph.D.,
M.S. SINBUKHOVA, student

National Research University "MPEI",
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st.14, 1
E-mail: savchenkovnm@mpei.ru

Parameterization of ordered porous structure of heat pipe

Abstract. This article presents the description of 3d models of single elements of ordered porous heat pipe structure and an evaluation of the advantages of sample parameterization.

Key words: heat pipes, porous structures, parameterization, CAD-systems.

Пористые структуры выполняют две главные задачи: они обеспечивают необходимую разницу в капиллярном давлении, что позволяет конденсированной жидкости возвращаться обратно в испаритель, и способствуют улучшенному теплообмену благодаря высокому соотношению площади поверхности к объему. Ключевым элементом тепловой трубы является фитиль с пористой структурой[1].

Создание 3D-модели единичного элемента с заданной геометрией пор является важным этапом в первоначальном проектировании упорядоченной пористой структуры. Ключевыми параметрами при расчете теплообмена в тепловой трубе являются извилистость траектории движения рабочего вещества, площадь сечения и показатель пористо-

сти. В отличие от образца, выполненного методом спекания, упорядоченная структура характеризуется отсутствием хаотичного распределения пор.

На данном этапе были спроектированы два вида единичных элементов упорядоченных пористых структур с помощью 3d моделирования. Ниже будут рассмотрены эти виды.

Первый образец, известный как Алмаз [2], имеет внутри прямые сквозные отверстия круглой формы со всех сторон, которые предназначены для улучшения процесса смешивания и равномерного распределения вещества по объему. Все грани куба скруглены, что снижает сопротивление (рис.1). Кроме того, имеются пути для прохождения жидкости по граням куба. Такое движение способствует смешиванию потоков жидкости внутри пористой структуры. Элементы соединяются между собой с помощью плоских симметричных поверхностей сторон куба.

Второй образец, известный как I-WP элемент [3], имеет более извилистую траекторию движения, так как пути теплоносителя располагаются не в центре куба, а вдоль его краев. Его структура отличается сглаженной обтекаемой формой. Элементы соединяются между собой благодаря плоским симметричным угловым частям, расположенным в каждой вершине и имеющим плавную изогнутую линию.

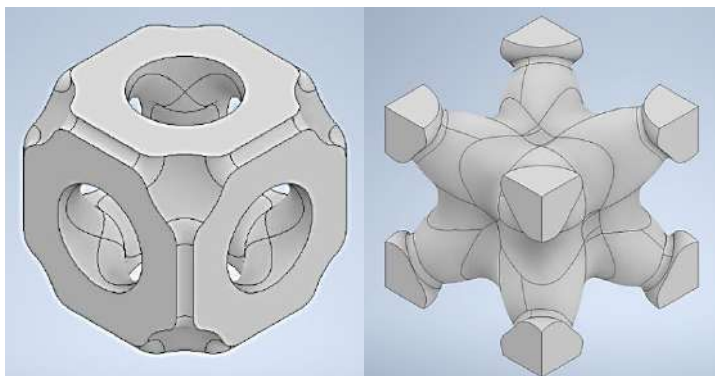


Рис. 1. Модели единичного элемента: слева – Алмаз, справа – I-WP

Параметризация габаритных размеров 3D модели является важным этапом в процессе проектирования, направленным на оптимизацию рабочих характеристик изделия. Этот подход позволяет устанавливать взаимосвязи между различными размерами, что дает возможность гибко адаптировать модель под конкретные требования и условия эксплуатации.

Первым преимуществом параметризации является возможность уменьшения веса изделия. Легкие конструкции становятся особенно

актуальными для авиационной, автомобильной и космической отраслей, где сокращение массы может привести к значительному повышению эффективности.

Вторым важным аспектом является повышение прочности. Параметризация позволяет изменять толщину и размеры элементов, что может увеличить прочностные характеристики. Особенно это актуально для деталей, которые подвергаются значительным механическим нагрузкам. Таким образом, можно создать более надежные конструкции, способные выдерживать серьезные испытания.

Третьим аспектом является влияние на аэродинамические и гидродинамические характеристики. Изменение форм моделей может существенно улучшить их взаимодействие с потоками воды.

Для реализации успешной параметризации необходимо использовать специализированное программное обеспечение, такое как CAD-системы (рис. 2). Эти системы позволяют эффективно управлять параметрами, визуально отслеживая изменения и их влияние на рабочие характеристики модели. Инженеры могут вносить коррективы в процессе проектирования, оптимизируя детали под конкретные условия эксплуатации.

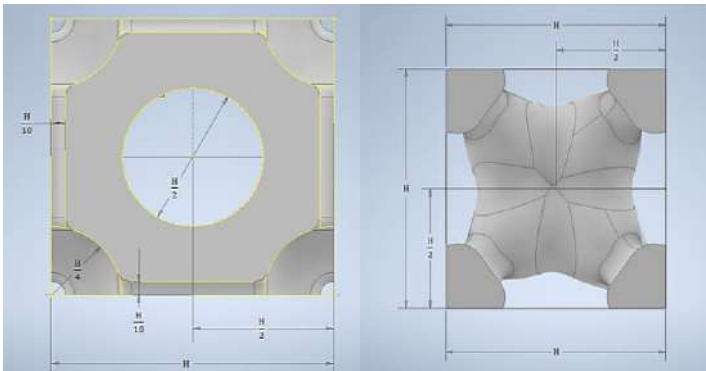


Рис. 2. Модели единичного элемента Алмаз (слева) и I-WP (справа) после параметризации при помощи CAD-системы

Параметризация размеров компонентов теплообменного устройства увеличивает его эффективность и помогает достичь требуемых характеристик.

Литература

1. Л.П. Пилиневич, М.В.Тумилович, А.Г.Кравцов, Д.М. Румынцев, К.В. Гриб "Исследование процесса получения капиллярно-пористых материалов из металлических порошковых для тепловых труб," Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 5-12.
2. Surendra Singh Rathorea, Balkrishna Mehtaa, Pradeep Kumarb, Mohammad Asferc "Flow Characterization in Triply-Periodic-Minimal-Surface (TPMS) based Po-

rous Geometries", Applied Energy, 2022

З.Н.М. Савченкова, В.С. Булаева, М.С. Синьбухова, А.М. Савченков "Создание и практическое применение: 3D-моделирование и расчет пористой упорядоченной структуры", Новое в российской электроэнергетике. 2024. № 7. С. 31-37. EDN IEVXUS.

УДК 697.93

Р.Е. ЦУКАНОВ, аспирант,
А.Б. ГАРЯЕВ, д.т.н., профессор
И.Ф. САМСОН, к.т.н., доцент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная 17
E-mail: tsukanovre@gmail.com

Исследование процессов, происходящих в роторном адсорбционном осушителе

Аннотация: Статья посвящена исследованию работы сорбционных роторных осушителей. Рассмотрены основные области их использования, описан принцип действия. Представлена математическая модель, включающая уравнения энергии и баланса массы для воздуха и насадки, а также кинетику сорбции. Для определения равновесного влагосодержания предложены модели Ленгмюра, БЭТ и Дубинина-Астахова.

Ключевые слова: сорбционные осушители, адсорбция, влажность, математическое моделирование.

R.E. TSUKANOV, Ph.D. candidate,
A.B. GARYAEV, Doctor of Engineering, Professor.
I.F. SAMSON, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

National Research University "MPEI"
111250, Moscow, 17 Krasnokazarmennaya str.
E-mail: tsukanovre@gmail.com

Investigation of the processes occurring in the rotary adsorption dryer

Abstract: The article is devoted to the study of sorption rotary desiccant dryers operation. The main areas of their use are considered, the principle of operation of desiccant dryers is described. A mathematical model including energy and mass balance equations for air and nozzle as well as sorption kinetics is presented. To determine the equilibrium moisture content, Langmuir, BET and Dubinin-Astakhov models.

Key words: sorption dryers, adsorption, moisture, mathematical modeling.

В системах кондиционирования воздуха необходимо обеспечивать не только необходимый уровень температур в помещениях, но и требу-

емое значение относительной влажности. Добиться необходимого уровня влажности возможно с помощью различных методов, одним из которых является использование сорбционных роторных осушителей.

Сфера применения сорбционных роторных осушителей довольно обширна. Холодильные склады, бассейны, пищевая и целлюлозно-бумажная промышленность, производство пластических масс. Роторные осушители используют также на литейном производстве, где их применение вызвано тем, что литий активно вступает в химическую реакцию с водой. Помимо этого, вращающиеся сорбционные осушители используют в фармакологии для поддержания стерильности помещений, так как в сухом воздухе не размножаются бактерии и плесень.

Принцип действия основан на использовании вращающегося ротора, матрица которого сделана из стекловолокна, покрытого адсорбентом, который попеременно проходит через зоны адсорбции и регенерации. В зоне адсорбции влажный воздух осушается - адсорбент поглощает влагу, обеспечивая на выходе осушенный воздух с очень низкой относительной влажностью. В зоне регенерации ротор обдувается горячим воздухом, который удаляет накопленную влагу из адсорбента. Этот влажный регенерационный воздух затем выбрасывается в атмосферу или охлаждается для повторного использования.

Для исследования процессов, происходящих в роторном адсорбционном осушителе предлагается использовать следующую математическую модель, описывающую распределение температуры воздуха T_B , насадки T_H , влагосодержание воздуха x и сорбента w по продольной координате z и по времени τ в канале.

$$G c_B \frac{\partial T_B}{\partial z} + P \alpha (T_B - T_H) = c_B \rho_B s_B \frac{\partial T_B}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\lambda_H s_H \frac{\partial^2 T_B}{\partial z^2} + P \alpha (T_H - T_B) + q_{\text{адс}}(\tau) = c_H \rho_H s_H \frac{\partial T_H}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$G \frac{\partial x}{\partial z} - P \beta (x - x_H) = \rho_B s_B \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$\rho_H s_H D \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + P \beta (x - x_H) = \rho_H s_H \frac{\partial w}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где G - расход воздуха в канале, s , P - периметр и площадь поперечного сечения канала, α , β - коэффициенты тепло и массоотдачи, c , ρ , λ , D - теплоемкость, плотность, теплопроводность и коэффициент диффузии. Индекс "в" соответствует воздуху индекс "н" насадки. Модель включает нестационарные уравнения энергии для воздуха (1) и для насадки (2). Уравнения (3) и (4) - балансовые уравнения для массы влаги в воздухе и насадке соответственно, где $q_{\text{адс}}(\tau)$ - теплота сорбции, определяющаяся по формуле:

$$q_{\text{адс}}(\tau) = \Delta H P \rho_H \frac{\partial w}{\partial \tau}, \quad (5)$$

где ΔH – удельная теплота адсорбции примерно равная теплоте фазового перехода. Для замыкания математической модели необходимо учесть кинетику сорбции [1]:

$$\left(\frac{dw}{d\tau}\right) = \frac{F_0 D}{R_p^2} (w_{eq} - w(\tau)), \quad (6)$$

где F_0 – безразмерный параметр, R_p -характерный размер пор материала. Для определения равновесного влагосодержания в сорбенте необходимо использовать одну из существующих моделей сорбции. Для расчета в инженерных целях обычно используют модель Ленгмюра.

$$w_{eq} = \frac{bP}{1 + bP}, \quad (7)$$

где b – адсорбционный коэффициент, равный отношению констант адсорбции и десорбции, P – парциальное давление пара [2]. Такая модель проста и удобна для расчетов, однако она не учитывает неоднородность поверхности силикагеля и становится менее точна при высоких давлениях.

В таких случаях более справедлива модель БЭТ, она подходит для анализа изотерм адсорбции при широком диапазоне давлений, также она описывает полимолекулярную адсорбцию [3].

$$w_{eq} = \frac{w_0 CK \left(\frac{p}{p_0}\right)}{\left[\left(1 - K \left(\frac{p}{p_0}\right)\right) \right] \left[\left(1 - K \left(\frac{p}{p_0}\right)\right) + CK \left(\frac{p}{p_0}\right) \right]}, \quad (8)$$

где w_0 – максимальная сорбционная емкость, C, K – константа связанная с энергией сорбции и константа зависящая от температуры. Для точного моделирования с учётом пористости силикагеля можно воспользоваться уравнением Дубинина-Астахова [4].

$$w_{eq} = w_0 e^{-\beta \left(T \ln \left(\frac{p_0}{P}\right)\right)^n}, \quad (9)$$

где β и n константы, определяемые в процессе подгонки к экспериментальным данным.

Литература

1. Shazia H., Suryadijaya A. Adsorption Characteristics of Silica Gel-Water Pairs in Personal Protection Equipment // *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*. 2023. №22. - С. 50-58.
2. Gun'ko V.M., Turov V.V., Zarko V. I. et al. Adsorption of water on activated carbons and silica gels // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001. Vol. 236, № 1. P. 26–42.
3. Nguyen T.X., Bhatia S.K., Nicholson D. et al. A new isotherm model for water adsorption in nanoporous silica // *Journal of Physical Chemistry C*. 2007. Vol. 111, № 5. P. 2212–2222.
4. Hang L., Wang Y., Li J. et al. Water adsorption on hydrophobic silica gels: fitting with Dubinin-type equations // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 608. P. 1921-1930

УДК 669.2

М.Г. СУЛЕЙМАНОВ, аспирант,
В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор,
Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Разработка компьютерной программы по расчету нагрева садки в камерных печах

Аннотация. Разработана компьютерная программа по расчету нагрева садки в камерной печи, которая учитывает фильтрацию продуктов горения через садку и изменение теплофизических свойств садки по времени, а также ее форму, размеры и расположение в рабочем пространстве печи. Использование программы позволит сократить сроки разработки и внедрения рациональных конструкций и режимов работы промышленных печей.

Ключевые слова: камерная печь, садка, математическая модель нагрева, компьютерный расчёт

M.G. SULEYMANOV, PhD student,
V.V. BUKHMIROV, Doctor of Technical Sciences,
E.N. BUSHUEV, Doctor of Technical Sciences

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Development of a computer program for calculating the heating of a charge in chamber furnaces

Annotation. A computer program has been developed to calculate the heating of a charge in a chamber furnace, which takes into account the filtration of combustion products through the charge and the change in the thermophysical properties of the charge over time, as well as its shape, dimensions and location in the furnace working space. The use of the program will reduce the time required to develop and implement rational designs and operating modes for industrial furnaces.

Key words: chamber furnace, charge, mathematical heating model, computer calculation

Камерные печи получили широкое распространение в машиностроении и металлургии для нагрева и термообработки насыпных загрузок. Используемые режимы нагрева в печах не всегда оптимальны и не учитывают протекание продуктов сгорания через загрузку, что приводит к завышенному времени пребывания ее в печи и, как следствие, к перерасходу энергоресурсов на нагрев металла. Условиями, необходимыми для получения высококачественной продукции и повышения производительности являются правильная организация их работы и точное выдерживание температурного графика обработки изделий. Экспериментальные исследования являются

дорогостоящими и длительными процессами, в то время как численное моделирование позволяет получать достаточно полную и точную информацию о тепловых процессах путем проведения вычислительных экспериментов.

Была разработана математическая модель тепловой работы газовой нагревательной печи периодического действия для нагрева насыпных садов [1], которая учитывает следующие факторы, определяющие тепловую работу рассчитываемой печи:

- сгорание топлива в подподовых топках с образованием дымовых газов, заполняющих рабочее пространство печи;
- радиационно-конвективный теплообмен между продуктами сгорания топлива и поверхностями футеровки и садки;
- перенос теплоты теплопроводностью в футеровке и теплоотдачу от поверхности кожуха в окружающую среду;
- перенос теплоты теплопроводностью в насыпной садке.

Адекватность разработанной математической модели проверена путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными.

Созданная математическая модель реализована в виде компьютерной программы для персонального компьютера на языке программирования Delphi. В качестве среды разработки использована среда Turbo Delphi 2006, одним из главных преимуществ которой являются визуальные методы построения интерфейса пользователя.

На начальном этапе работы с программой необходимо задать следующие необходимые исходные данные:

- особенности конструкции печи – геометрические параметры ее рабочего пространства и футеровки, а также теплофизические свойства футеровки;
- режимные параметры работы – расход газа в период предварительного подогрева печи и в период термообработки, а также время нагрева;
- химический состав природного газа, используемого для отопления печи;
- геометрические и теплофизические параметры нагреваемой садки;
- настроечный коэффициент, в качестве которого выступает доля конвективной составляющей теплового потока;
- параметры численного метода решения – шаги по времени и пространству.

В программе предусмотрена возможность считывания необходимых исходных данных из заранее подготовленного текстового файла.

После ввода необходимых исходных данных выполняется расчет температуры газа в зонах, температурного поля садки и температуры поверхности обмуровки.

Компьютерная программа состоит из нескольких основных расчетных и вспомогательных блоков. Вспомогательные блоки предназначены для расчета характеристик горения топлива и геометрических угловых коэффициентов излучения. Основные расчетные блоки позволяют решать внутреннюю, внешнюю и сопряженную задачи теплообмена. При решении внешней задачи поверхности сопряжения рассматривались как зоны третьего рода, для которых уравнениями теплового баланса являются разностные аналоги граничных условий задач теплопроводности. В ходе расчета сопряженных задач нестационарного теплообмена использовались численные методы решения – метод конечных разностей.

На начальном этапе проводится расчет предварительного нагрева футеровки печи до достижения поверхностью пода заданной температуры. Расчет в каждый расчетный момент времени при этом проводится с использованием методом прямой и обратной прогонки в футеровке пода, стен, застенок и свода, производится также решение системы зональных уравнений итерационным методом Ньютона.

В ходе основного этапа рассчитывается теплообмен в рабочем пространстве печи в течение периода нагрева садки. В начале решается система разностных уравнений для отдельных участков футеровки, с целью определения прогонных и балансовых коэффициентов. Далее решается внешняя задача теплообмена с определением зональных значений плотностей потоков результирующего излучения на поверхностях эквивалентной садки. По найденным значениям плотностей потока производится решение системы разностных уравнений с определением средних температур поверхностей садки в конце шага по времени. Расчет проводится итерационным методом, что требует значительных затрат машинного времени.

Блочный принцип структуры реализации расчетного алгоритма позволяет с минимальными изменениями в компьютерном коде создавать расчетные программы и для других видов печей.

После завершения расчета на экран выводятся результаты расчета в виде графиков изменения во времени температур поверхности и центра садки, температуры газа в рабочем пространстве печи. Имеется также возможность получения в текстовом виде отчета, в котором приводятся исходные данные и основные результаты расчёта.

Вывод: на основе разработанной модели создана компьютерная программа по расчету процесса нагрева садки в камерной печи учитывающая

фильтрацию продуктов горения через садку и изменение теплофизических свойств садки по времени, а также ее форму, размеры и расположение в рабочем пространстве печи. Созданная программа позволяют с высокой точностью рассчитывать характеристики тепловых процессов, способствуя сокращению сроков разработки и внедрения рациональных конструкций и режимов работы промышленных печей. Блочный принцип структуры реализации расчетного алгоритма позволяет с минимальными изменениями в компьютерном коде создавать расчетные программы и для других видов нагревательных печей камерного типа.

Литература

1. Бухмиров, В.В. Инженерный метод расчета тепловой работы нагревательной печи / В.В. Бухмиров, М.Г. Сулейманов, Е.Н. Бушуев, О.Б. Колибаба, Н.П. Гусенкова // Промышленная энергетика. М: ЗАО НТФ «Энергопрогресс». 2022. №10. С.39–45

УДК 697.9: 621.311.22

В.В. БУХМИРОВ д.т.н.
Д.А. ДОЛИНИН, к.т.н.
И.И. СВЕТУШКОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г.Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: bao6095@mail.ru, ilia.svet@gmail.com

Экспериментальное исследование вытяжной вентиляции при помощи аэрационных фонарей

Аннотация. В работе представлены результаты натурного пассивного эксперимента по оценке эффективности вытяжной вентиляции в турбинном зале с применением аэрационных фонарей. Цель исследования – снижение влажности и улучшение качества воздуха на рабочих местах за счёт усиления естественного воздухообмена. В процессе замеров в январе 2024 года зафиксировано снижение относительной влажности и концентрации летучих органических веществ, а также умеренное снижение температуры.

Ключевые слова: аэрационные фонари, вентиляция, микроклимат, влажность, температура, летучие органические соединения, ТЭЦ.

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering,
D.A. DOLININ Candidate of Engineering,
I.I. SVETUSHKOV, PhD student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: bao6095@mail.ru, ilia.svet@gmail.com

Experimental study of exhaust ventilation by means of aeration lanterns

Abstract. The paper presents the results of a full-scale field experiment conducted in January 2024 at Ivanovo CHPP-2, aimed at evaluating the efficiency of natural exhaust ventilation in a turbine hall using roof aeration lights. The goal of the study was to reduce air humidity and improve air quality at workplaces. Monitoring was carried out at floor level (0.00 m) and turbine foundation level (8.00 m) near turbines TA-4 and TA-5. The parameters studied included relative humidity, air temperature, and concentration of total volatile organic compounds (TVOC).

Keywords: aeration lights, ventilation, microclimate, humidity, temperature, volatile organic compounds, CHP.

Эффективное функционирование вытяжной вентиляции в помещениях турбинных цехов играет ключевую роль в поддержании санитарно-гигиенических условий труда. Повышенная влажность и накопление вредных летучих соединений способствуют коррозии оборудования, ухудшают условия труда и повышают риск отказов. Одним из решений является использование аэрационных фонарей как элемента естественной вытяжной вентиляции.

С апреля 2023 года по апрель 2025 года на Ивановской ТЭЦ-2 проводится мониторинг показателей микроклимата главного корпуса. Параметрами мониторинга микроклимата являются температура – T , °C, относительная влажность – W , %, содержание углекислого газа в атмосфере CO_2 , см³/м³, массовая концентрацию микрочастиц PM_{2.5}, мг/м³ и концентрация летучих органических соединений (tVOC) мг/м³, где часть результатов исследований года представлены в работе [1].

В январе 2024 года на Ивановской ТЭЦ-2 был проведён дополнительный эксперимент в районе турбин TA-4 и TA-5, направленный на оценку влияния естественной вытяжной вентиляции через аэрационные фонари на параметры воздушной среды. В течение трёх суток в исследуемой зоне были открыты аэрационные фонари на кровле турбинного зала, в результате чего обеспечивалась направленная вытяжка тёплого и влажного воздуха. Одновременно в нескольких точках на отметках 0.00 м и 8.00 м проводился мониторинг параметров микроклимата: относительной влажности, температуры воздуха и концентрации летучих органических соединений. Измерения выполнялись с интервалами в 3–4 часа.

Температура на отметке 8.00м. у TA-4 снизилась с 26,3°C до 24,7°C (уменьшение на 1,6°C) при нормативном значении в 21,0°C [2]. На отметке 0.00 м температура у TA-4 снизилась на 1,4°C – с 12,9°C до 11,5°C что также ниже допустимой нормы в 18°C [1] на 6,5°C. На отметке 8.00м. у TA-5 температура изменилась с 24,9°C до 22,8 что также не соответствует требуемым нормам. На отметке 0.00м. у TA-5 температура снизилась с 15,4 до 13,1°C, что также ниже допустимой нормы на 2,9°C.

Показатель летучих органических веществ (tVOC) на отметке 8.00м. у TA-4 в начале эксперимента составлял 2,998 мг/м³, что выше допустимой нормы в 1 мг/м³ [3] на 1,998 мг/м³. К концу эксперимента данный показатель снизился на 1,043 мг/м³ и составил 1,955 мг/м³, что также

является выше допустимой нормы. У ТА-5 на отметке 8.00м. за этот же период данный показатель изменился с 2,151 мг/м³ до 1,324 мг/м³, что также выше допустимой нормы на 0,324 мг/м³. На отметке 0.00м. концентрация tVOC у ТА-4 составила 1.284 мг/м³, что выше нормы на 0,284 мг/м³. В конце эксперимента данное значение снизилось до 0.725 мг/м³ (снижение на 0.387 мг/м³), что является допустимым. У ТА-5 на отметке 0.00м. также снизился данный показатель с 1.112 мг/м³ до 0.725 мг/м³ (снижение на 0.387 мг/м³), что является допустимым.

В начальный момент времени на отметке 8.00 м в районе ТА-5 зафиксировано максимальное значение относительной влажности – 91.9% на 21.9% [1]. За время проведения мониторинга данное значение снизилось до 70.6%, что также превышает допустимое значение на 10,6%, однако не превышает временно ограниченную влажность в 75%. На отметке 0.00 м у ТА-5 влажность снизилась с 72.5% до 57.2% (снижение на 15.3%) и является в зоне допустимых значений. У ТА-4 на отметке 0.00 м изменение составило с 57.2% до 54.9% (снижение на 2.3%). На отметке 8.00м. у ТА-4 влажность же изменилась с 59,8% до 58,3%, что также соответствует требуемым норма. Влажность наружного воздуха во время эксперимента изменилась с 87,2 до 95,6%.

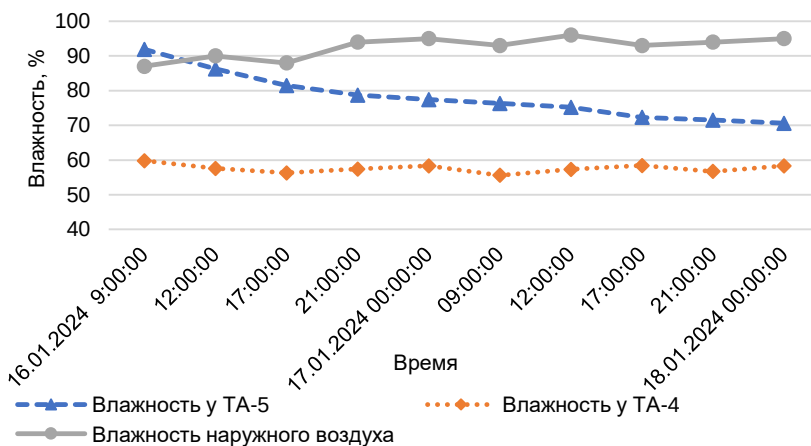


Рис.1. Изменение влажности в течение эксперимента на отм.8.00 м около турбоагрегатов

Вывод. Результаты эксперимента подтверждают, что вытяжная вентиляция способствует приведению параметров микроклимата производственного помещения к нормативным значениям, поэтому аэрационные фонари, установленные на крыше в главном корпусе Иванов-

ской ТЭЦ-2, могут служить эффективным инструментом регулирования вытяжной вентиляции.

Литература

1. Бухмиров В.В., Бушуев Е.Н., Светушков И.И., Родионова М.В., Долинин Д.А. Экспериментальное микроклимата котлотурбинного цеха Ивановской ТЭЦ-2 // Промышленная теплоэнергетика. 2024. №9. С.31-35
2. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы микроклимата рабочих зон. М.: Минздрав РФ, 2021.
3. ГОСТ 12.1.005-88. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. М.: Госстандарт, 1988.

УДК 620.92

Т.Е. СОЗИНОВА¹, к.т.н., доцент,
Д.А. СМЕРНОВ¹, студент

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина¹
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: ste@tcf.ispu.ru

Анализ процессов теплообмена в условиях свободной конвекции

Аннотация. В программной среде Excel разработан алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи, тепловых потоков и количества выделенной теплоты в условиях естественной конвекции, выполнено сравнение инженерных методик определения коэффициента теплоотдачи между собой и с экспериментальными данными.

Ключевые слова: теплоэнергетика, инженерные методики, коэффициент теплоотдачи, конвекция, теплообмен.

T.E. SOZINOVA¹, Candidate of Engineering, docent
D.A. SMIRNOV¹, student

Ivanovo State Power Engineering University¹
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: ste@tcf.ispu.ru

Analysis of heat transfer processes under free and forced convection conditions

Abstract. In the Excel software environment, an algorithm has been developed for calculating the heat transfer coefficient, heat flows and the amount of heat released under conditions of natural convection, a comparison of engineering methods for determining the heat transfer coefficient between them and with experimental data has been performed.

Key words: thermal power engineering, engineering methods, heat transfer coefficient, convection, heat exchange

На платформе Microsoft Excel с использованием математических

функций и встроенного комплекса Visual Basic for Applications разработан специализированный программный модуль для расчета коэффициента теплоотдачи и тепловых потоков в условиях свободной конвекции.

Программа включает библиотеку критериальных уравнений ведущих учёных: Михеева М.А., Исаченко В.П., Михеевой И.М., Кириллова П.Л., Леонтьева А.И. и Цветкова Ф.Ф.

В качестве текучих сред доступны для выбора: воздух, дымовые газы, вода, жидкий аммиак, трансформаторное масло, масла марок МК и МС-20.

Расчёт выполнен для вертикальных и горизонтальных пластин, вертикальных и горизонтальных цилиндров, шаров, ограниченных щелевых пространств. Для выполнения расчета пользователю необходимо задать следующие исходные данные: температуры стенки и текучей среды, тип теплоносителя, геометрические формы и размеры твердого тела.

Достоинства вычислительной программы:

- 1) интуитивно понятный интерфейс, обеспечивающий удобство работы;
- 2) гибкость настройки с возможностью добавления пользователем новых инженерных методик и дополнительных типов текучих сред;
- 3) быстрое выполнение расчётов и гарантированная точность результатов;
- 4) возможность использования программного модуля в научных исследованиях для анализа процесса теплоотдачи.

Для сравнительного анализа инженерных методик определения коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции был разработан макрос. В ходе исследования макрос автоматически изменял исходные данные. Для каждого случая получено и проанализировано 80 значений коэффициента теплоотдачи. Всего было решено около 5,5 тысяч задач. Результаты систематизированы в сводные таблицы.

Расчет выполнялся для таких рабочих сред, как воздух, вода и трансформаторное масло. Рассмотрены различные размеры тел и температурные перепады между текучей средой и твердой стенкой.

Анализ результатов расчета выявил следующие расхождения между методиками:

- Михеева М.А. и Исаченко В.П. $\approx 18\%$,
- Михеева М.А. и Михеевой И.М. $\approx 12\%$,
- Михеева М.А. и Цветкова Ф.Ф. $\approx 23\%$,
- Исаченко В.П. и Цветкова Ф.Ф. $\approx 36\%$.

Проведено сравнение результатов расчета коэффициента теплоотдачи по критериальным уравнениям разных авторов с экспериментальными данными И.М. Пчелкина [2] для труб из нержавеющей стали со следующими параметрами:

- труба 1 – диаметр $d = 25$ мм, высота $h = 0,48$ м;
- труба 2 – $d = 12$ мм, $h = 0,42$ м;
- труба 3 – $d = 6$ мм, $h = 0,50$ м;

- труба 4 – $d = 6$ мм, $h = 1,258$ м;
- труба 5 – $d = 12,4$ мм, $h = 1,525$ м;
- труба 6 – $d = 19$ мм, $h = 1,500$ м.

В качестве рабочих сред использовались вода и масло марки ВМ-4. На рис. 1 представлена погрешность между расчетными и экспериментальными значениями коэффициента теплоотдачи для исследуемых объектов и жидкостей.

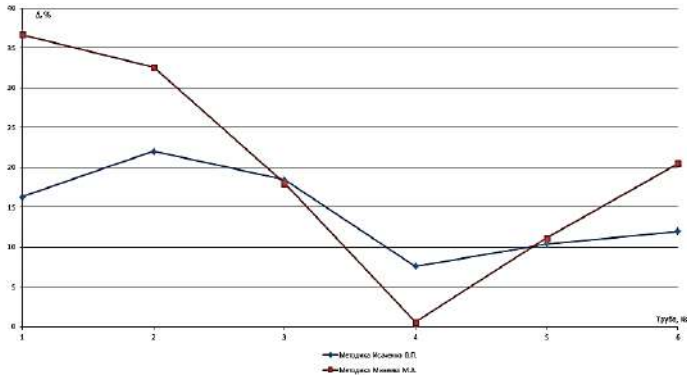


Рис. 1. Погрешность расчета коэффициента теплоотдачи для труб разных диаметром и высот

Анализ погрешности, представленной на рис. 1, позволяет сделать следующие выводы:

- для труб больших диаметров формулы Михеева М.А. демонстрируют значительную погрешность: 37% для трубы № 1 ($d = 25$ мм) и 20% для трубы № 6 ($d = 19$ мм). По критериальным уравнениям Исаченко В.П. погрешность существенно меньше и составляет 16 % для трубы № 1 и 12% для трубы № 6;
- для труб с меньшими диаметрами (образцы № 3 и № 5) обе методики дают сопоставимые результаты: 18% погрешности для обоих методов (труба № 3) и 11% погрешности – (труба № 5);
- труба номер 4 отличается маленьким диаметром и большой высотой. Методика Михеева М.А. показывает идеальную сходимость. Методика Исаченко В.П. дает погрешность 8%.

В среднем, погрешность расчета коэффициента теплоотдачи для всех труб по методике Михеева М.А. составляет 19,9%, по методике Исаченко В.П. 14,4%.

Выводы: разработан эффективный программный комплекс для теплотехнических расчетов, проведён комплексный анализ точности раз-

личных инженерных методик. Установлено, что методика Исаченко В.П. демонстрирует лучшую сходимость с экспериментом. Наименьшая погрешность наблюдается для труб малого диаметра.

Литература

1. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2014. 360 с.

2. Пчелкин И.М. Теплоотдача вертикальных труб при естественной конвекции. В кн.: Конвективный и лучистый теплообмен. М.: АН СССР, 1960. с. 56-64.

УДК 620.9

Д.В. РАКУТИНА, к.т.н.,
Д.А. МИХАЛЬЦОВ, студент,
А.Е. МАЛЕЕВА, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Экономия тепловой энергии за счет внедрения индивидуального учета теплопотребления

Аннотация. В работе выполнен анализ экономии тепловой энергии при внедрении индивидуального учета теплопотребления. Разработано мобильное приложение для дистанционной передачи данных с тепловычислителей.

Ключевые слова: экономия тепловой энергии, энергосбережение, тепловычислитель, мобильное приложение, дистанционная передача данных.

D.V. RAKUTINA, Candidate of Engineering,
D.A. MIKHALTSOV, student,
A.E. MALEEVA, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Saving thermal energy through the introduction of individual heat consumption accounting

Abstract. The paper analyzes the savings of thermal energy in the implementation of individual accounting of heat consumption. A mobile application for remote data transmission from thermal calculators has been developed.

Key words: heat energy saving, energy saving, heat calculator, mobile application, remote data transmission.

Актуальность внедрения индивидуального учета потребления тепловой энергии очевидна не только для специалистов, но и жителям многоквартирных домов [1]. Тарифы на отопление растут постоянно и единственная возможность сэкономить – это начать регулировать потребление тепла и платить по индивидуальным приборам. Следует отметить, что индивидуальный учет теплопотребления стал обязательным с принятием федерального закона №261 «Об энергосбережении», который предписывает обязательную установку приборов индивидуального учета тепла в новом строительстве и реконструкции с 1 января 2012 года.

Принцип работы теплового счётчика заключается в вычислении количества тепловой энергии, потребляемой в доме или офисе. Датчики расхода теплоносителя и температур фиксируют объём воды, проходящий через систему отопления, а также разницу температуры воды на входе и выходе из системы. Эти данные отправляются на главное устройство теплосчетчика – тепловычислитель. Здесь происходит обработка информации, где путём умножения массового расхода воды на разницу температур вычисляется общее количество потреблённой тепловой энергии. Результаты сохраняются во внутреннем архиве прибора.

Современные системы учета тепловой энергии требуют высокой степени автоматизации и достоверности данных. Как правило, передача показаний с тепловычислителей требует личного посещения места установки счетчика, что не всегда удобно и приводит к большим временным затратам при удалённом расположении объекта. Введение дистанционного сбора данных позволяет решить эту проблему.

В данной работе разработано удобное мобильное приложение (рис.1), которое позволяет получать информацию о потреблении тепла без необходимости выезда на объект и ручного снятия показаний. Также создан специальный модуль для передачи данных с тепловычислителя на основе Arduino и ESP8766. Программа позволяет подключать несколько тепловычислителей в одном приложении и имеет интуитивно понятный и удобный интерфейс. Мобильное приложение дистанционно считывает данные теплового счетчика, имеет доступ к архиву прибора, а также присылает уведомления пользователю о нештатных ситуациях на узле учета.

Для подключения нового прибора необходимо присоединить разработанный нами модуль к тепловычислителю. Затем в приложении нажать кнопку «Добавить новый прибор» и ввести ip-адрес модуля. Приложение автоматически через защищённый протокол MQTT установит связь с модулем, который находится на тепловычислителе. Чтобы получить информацию с теплового счетчика необходимо нажать кнопку «Сбор данных» и выбрать период, за который надо считать данные с прибора. Все считанные архивы хранятся во вкладке «Архивы».

Кроме этого, приложение позволяет анализировать потребление тепловой энергии. При резком увеличении расхода, приложение присы-

ляет уведомление пользователю о необходимости устранить проблемы с утечкой теплоносителя. Как показал расчет для пятиэтажного жилого дома экономия за счет ликвидации утечек может составлять до 100 тыс. руб. в год.



Рис. 1. Мобильное приложение для передачи данных с тепловычислителя

Можно значительно экономить на оплате тепловой энергии, благодаря установке приборов учета и регулирования, а также внедрению разработанного мобильного приложения. В данной работе выполнен анализ данных по экономии тепловой энергии за пять лет после установки теплового счетчика в многоквартирном жилом доме. На рис. 2 показано теплопотребление по нормативу, по счетчику и экономия тепловой энергии в Гкал после установки счетчика. Как видно из представленных данных, экономия составляет от 35 до 63 %, при этом среднее годовое значение за пять лет ~55 %. Срок окупаемости теплового счетчика при такой экономии меньше 1 года.

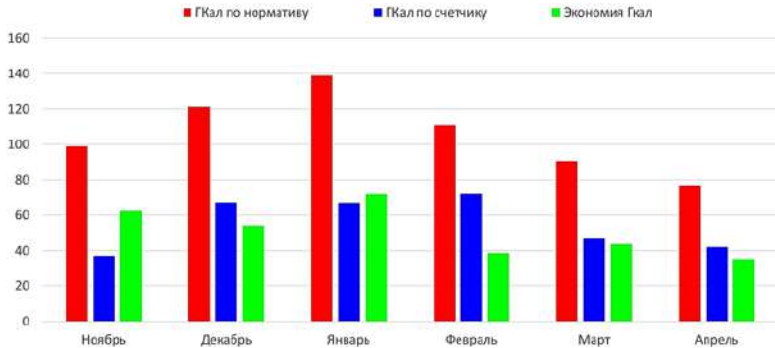


Рис. 2. Потребление тепловой энергии по нормативу, по счетчику и экономия в Гкал для многоквартирного дома

Таким образом, мы видим, что срок окупаемости теплосчётчика достаточно мал, но при этом он позволяет значительно экономить на оплате за тепловую энергию, а с разработанным мобильным приложением процент экономии можно увеличить за счёт встроенного анализа данных по теплопотреблению.

Разработанное мобильное приложение для дистанционной передачи данных с тепловычислителей было предложено в качестве стартап-проекта на акселерационной программе ИГЭУ в 2024 году [2].

Литература

1. Ракутина Д.В. Энергетическое обследование системы теплоснабжения дошкольного образовательного учреждения // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): сборник научных трудов по материалам Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции, 29–31 мая 2019 г., г. Иваново. Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина". 2019. Т.2. С.276–279

2. SmartТепло [Электронный ресурс].
https://pt.2035.university/project/smartteplo_2024_09_09_17_41_50 (дата обращения: 07.04.2025).

УДК 62.932.2

О.И. ГОРИНОВ¹, к.т.н., доцент
Р.Н. ГАБИТОВ², к.т.н., доцент
О.Б. КОЛИБАБА³, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: gorinov.oleg2019@yandex.ru

Методика расчета скорости газификации углеродного остатка твердых органических отходов

Аннотация. Предложена методика расчета скорости газификации углеродного остатка пиролиза твердых органических отходов при их переработке в реакторе шахтного типа.

Ключевые слова: твердые органические отходы, газификация, углеродный остаток

О.И. GORINOV¹, Candidate of Engineering, docent
R.N. GABITOV², Candidate of Engineering, docent
O.B. KOLIBABA³, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: gorinov.oleg2019@yandex.ru

Methodology for calculating the rate of gasification of the carbon residue of solid organic waste

Abstract: A method for calculating the gasification rate of the carbon residue from the pyrolysis of solid organic waste during its processing in a shaft-type reactor is proposed.

Key words: solid organic waste, gasification, carbon residue

Развитие современных безотходных энергоэффективных технологий предоставляет возможность извлечения полезной энергии из такого ценного энергетического ресурса, как твердые органические отходы. Широкое распространение на сегодняшний день получили термические методы переработки твердых органических отходов (сжигание, пиролиз, газификация), для реализации которых существуют разнообразные технические решения теплотехнологических установок. Наиболее распространенным типом реакторов являются шахтные печи, в которых материал перемещается под действием силы тяжести. Они отличаются простотой конструкции и эксплуатационной надежностью [1-3].

По высоте шахты органическое сырье проходит три стадии процесса термообработки: сушку, пиролиз и газификацию. В верхней части шахты, где осуществляется загрузка сырья, происходит сушка при температурах 100-220°C. Ниже находится зона, в которой осуществляется процесс пиролиза при температурах 220-650 °C. В зоне пиролиза, кроме горючих газов, образуется твердый углеродный остаток (ТУО), состоящий в основном из углерода. В нижней части шахты, куда подается газообразное топливо для сжигания и обеспечения тепловой энергией процессов термопереработки, осуществляется газификация углерода ТУО в атмосфере продуктов горения при температурах выше 650 °C.

Процесс газификации является лимитирующим производительность термического реактора. Поэтому, для разработки методики проектирования термических реакторов, необходимо определить скорость процесса газификации.

Обобщенная реакция газификации углерода в среде газифицирующего агента CO_2 запишется как:



Эта реакция – эндотермическая, протекает с затратами тепла Q_{CO_2} , которое расходуется на разрушение кристаллической решетки углерода и на синтез монооксида углерода. Скорость реакции зависит от температуры углерода и тепловой энергии, поступающей на поверхность ТУО. Тепловая энергия на газификацию поступает от газов, имеющих температуру t_r , излучением q_l и конвекцией q_k (рис.1).

$$q = q_l + q_k, \quad (2)$$

Выделим на поверхности слоя ТУО площадку в 1 м^2 и будем считать, что в период газификации эта площадка за время Δt переместится на величину Δx . То есть за время Δt произойдет уменьшение объема на величину $\Delta V = \Delta x \times 1\text{ м}^2$. Тогда удельная производительность газификации выразиться как:

$$V = \frac{\Delta V}{\Delta \tau} = \frac{\Delta x \cdot 1 \text{ м}^2}{\Delta \tau} = \omega \quad (3)$$

где ω – скорость газификации, м/с.

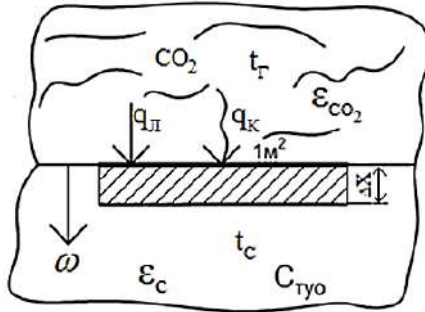


Рис. 1. Расчетная схема процесса

В выражении (1) величина Q_{CO_2} , кДж/моль, выражает затраты теплоты на газификацию одного моля углерода. Тогда, количество теплоты, требуемое на газификацию углерода в объеме ΔV определится выражением:

$$Q_c = \frac{\Delta V \cdot 10^3 \cdot \rho_{TYO}}{M_c} Q_{CO_2} \quad (4)$$

где ρ_{TYO} – плотность углеродного остатка; M_c – масса.

Уравнение баланса тепла, поступающего на рассматриваемую площадку, имеет вид:

$$q \cdot \Delta \tau \cdot 1 \text{ м}^2 = \frac{\Delta x \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot \rho_{TYO} \cdot 10^3}{M_c} Q_{CO_2} \quad (5)$$

Из уравнения (5) выражается скорость процесса газификации ТУО и, соответственно, удельная производительность установки

$$\dot{V} = \omega = \frac{q \cdot M_c \cdot 10^3}{\rho_{TYO} \cdot Q_{CO_2}} \quad (6)$$

Выводы. Разработана методика, позволяющая рассчитать скорость газификации твердого углеродного остатка, полученного в результате деструкции твердых органических отходов в реакторе шахтного типа.

Литература

1. Шубов, Л.Я. Технологии отходов / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, Д.В. Шехирев // ГОУВПО «МГУС». М., 2006. 410 с.

2. Патент РФ №2645029 Установка для термического разложения несортированных твердых органических отходов / Горинов О.И., Колибаба О.Б., Долинин Д.А., Габитов Р.Н., Самышина О.В., Скворцов И.А. Опубл.: 15.02.2018, Бюл. №5.

3. Габитов, Р.Н. Разработка конструкции печи для утилизации твердых отходов и оценка эффективности ее работы / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, А.И. Сокольский, А.В. Грошева // Вестник ИГЭУ. 2019. №5. С.23–30.

УДК 621.867.7:62-84

Е.Е. КОРОЧКИНА¹, к.т.н.,
И.Н.ПАХОТИНА², к.т.н.
И.В. КОЛБАШОВ³, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,^{1,3}
153003г.Иваново, Рабфаковская, 34

Ивановский государственный политехнический университет,²
153000 г.Иваново, Шереметьевский проспект, 21

E-mail: fmkee@yandex.ru¹, 89106973496@mail.ru², kolbashov04@mail.ru³

Исследование влияния регенерированного моторного масла на теплообмен в гидроцилиндре гидропривода экскаватора

Аннотация. В данной статье рассматривается влияние регенерированного моторного масла на теплообмен в гидроцилиндре гидравлической системы экскаватора, как основного силового элемента.

Ключевые слова: гидропривод, гидроцилиндр, оптимизация, экскаватор.

KOROCHKINAE. E.¹, ph.d., assistant professor
PACHOTINA I. N.², ph.d., assistant professor
KOLBASHOV I.V.³, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
153000, Ivanovo State Polytechnic University
Ivanovo, Sheremetyevsky Avenue, 21

E-mail:fmkee@yandex.ru¹, 89106973496@mail.ru², kolbashov04@mail.ru³

Study of the effect of regenerated motor oil in the hydraulic cylinder of the hydraulic drive of an excavator

Abstract. This article discusses the use of regenerated engine oil for heat exchange in the hydraulic cylinder of the excavator hydraulic system, as the main power element.

Keywords: heat exchange, hydraulic drive, optimization, excavator.

В работе рассмотрен расчет теплообмена в гидроцилиндре гидропривода одноковшового экскаватора. Приводиться так же расчет расчет перегревов поршня гидроцилиндра при использовании в гидросистеме

масла после его регенерации и влияние этого на коэффициент линейного расширения материала гидроцилиндра экскаватора.

Основным силовым элементом в гидравлической системе экскаватора является гидроцилиндр. Рабочей жидкостью в гидросистеме является моторное масло. Данная рабочая жидкость имеет ряд преимуществ, одним из которых является то, что масло служит одновременно и смазкой элементов гидросистемы. В гидросистеме экскаватора может циркулировать до 15 литров масла. Моторное масло обладает достаточно высокой стоимостью. Отработанное моторное масло требует дополнительных затрат по утилизации, чтобы не загрязнять окружающую среду. Поэтому рационально провести регенерацию моторного масла и использовать его повторно. Целью регенерации является восстановление рабочих свойств использованного масла. Регенерация включает физическую и химическую обработку, в результате которой из масел практически полностью удаляются механические примеси, продукты старения, а также присадки, сохранившиеся в масле. В процессе регенерации получают базовые масла, из которых, после введения присадок, могут быть приготовлены товарные масла.

Температура, при которой работает моторное масло в гидросистеме, может быть от 60 до 80 °С, а давление 10 Мпа и выше. Это влияет на поршень гидроцилиндра. Он может нагреваться и воздействовать на стенки гидроцилиндра из-за сил трения. Ранее нами были проведены исследования влияния регенерированного моторного масла на тепловой и гидравлический режим работы гидросистемы экскаватора [1].

Нами была разработана математическая модель работы гидроцилиндра в пакете прикладных программ. В которой поршень омывается новым и регенерированным моторным маслом с рабочей температурой 80 °С. Данная модель симулирует процесс теплопроводности в поршне гидроцилиндра при граничных условиях III рода [2]. В результате моделирования были получены температурные поля поршня гидроцилиндра, омываемого новым моторным маслом рис. 1.

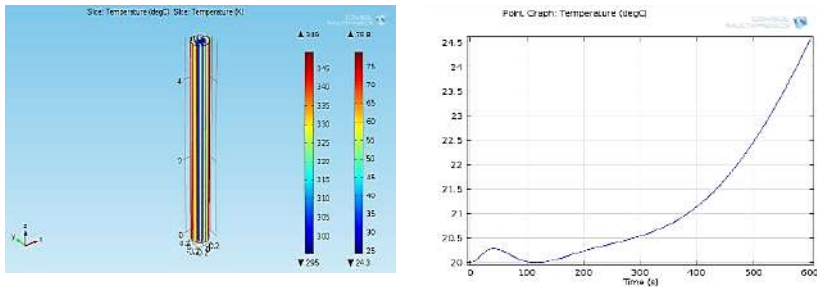


Рис. 1. Температурное поле поршня гидроцилиндра на новом моторном масле

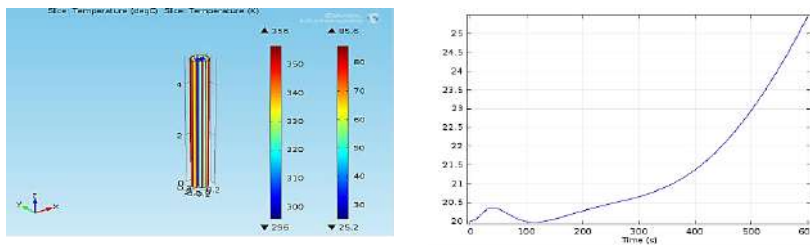


Рис. 2. Температурное поле поршня гидроцилиндра на регенерированном моторном масле

Получены температурные поля гидроцилиндра, который омывается регенерированным моторным маслом рис. 2.

В процессе моделирования было установлено, что поршень гидроцилиндра при работе на регенерированном моторном масле нагревается на 1°C сильнее, что на 3.5% выше, чем при работе на новом моторном масле.

В процессе исследования нами было установлено, что работа на регенерированном моторном масле влияет на линейное расширение металла поршня гидроцилиндра. Из выражения для коэффициента линейного (1) расширения мы определили на сколько удлинился поршень.

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta T} \quad (1)$$

где $\alpha = 0,000012 \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ коэффициент линейного расширения стали, ΔT - разность температур (град), L - длина поршня.

В процессе расчётов мы установили, что при работе на регенерированном моторном масле поршень удлиняется на 0,003624 (м), а при работе на новом масле – на 0,003274 (м). Длина поршня увеличивается на 9,76% при работе на регенерированном моторном масле. Это может повлиять на внутренние утечки масла.

Литература

1. Исследование эффективности теплообмена и работы гидропривода экскаватора при использовании регенерированного масла / Е.Е. Корочкина, И.Н. Пахотина // Энергетические системы. Белгород: ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». 2023. №2. С. 67-74.
2. Исследование нестационарной теплопроводности в ПК COMSOL MULTIPHYSICS: методические указания / В.В. Бухмиров, Е.Е. Корочкина, А.К. Гаськов. Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019.

УДК 66.048

В.А. КЛОЧКОВА, аспирант,
А.Г. ЛАПТЕВ, д.т.н.

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Конструкция и математическая модель охлаждения и очистки газов в прямоточно-противоточном насадочном скруббере

Аннотация Рассмотрена задача математического моделирования очистки газов от дисперсной фазы совместно с процессом теплообмена при непосредственном контакте газа с жидкостью. Представлено описание схемы насадочного скруббера с комбинированным прямоточно-противоточным движением фаз.

Ключевые слова: тепломассообмен, сепарация, аэрозоли, насадки, нисходящий прямоток, турбулентность, межфазный перенос

V.A. KLOCHKOVA, postgraduate,
A.G. LAPTEV, DScTech.

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, 51 Krasnoselskaya Str.
E-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Design and mathematical model of gas cooling and purification in a direct-flow-countercurrent nozzle scrubber

Abstract The problem of mathematical modeling of gas purification from a dispersed phase in conjunction with the heat exchange process in direct contact of gas with liquid is considered. A description of the scheme of a nozzle scrubber with direct-flow-countercurrent movement of phases is presented.

Key words: heat and mass transfer, separation, aerosols, nozzles, downward flow, turbulence, interphase transfer.

В различных отраслях промышленности и энергетики актуальны задачи совместного охлаждения газов с очисткой от различного вида дисперсной фазы. Это могут быть как технологические газы на реакторных и массообменных установках при получении разнообразных целевых продуктов, так и дымовые газы, и другие газовые выбросы в атмосферу. Для проведения таких процессов довольно часто используется контактный тепломассообмен совместно с сепарацией дисперсной фазы в газожидкостных аппаратах-скрубберах – колоннах с хаотичными или регулярными насадками (контактными устройствами), а также с барботажными (пенными) тарелками или вихревыми элементами [1].

Математические следствия фундаментальных законов сохранения представляются в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных в трехмерной или двухмерной постановках [2]. В упрощенной форме применяются и одномерные уравнения, чаще всего

в виде моделей гидродинамической структуры потоков (диффузионной или ячеечной). При применении двумерных или трехмерных моделей для газожидкостных сред основной проблемой является задание граничных условий на межфазной поверхности, которая является подвижной и хаотично распределена в пространстве (объеме слоя в аппарате). В таких случаях используются упрощенные выражения модели многофазного континуума с применением объемных локальных межфазных источников импульса, массы и энергии.

Хаотичные насадки, барботажные тарелки и вихревые устройства обеспечивают интенсивный турбулентный режим и высокую эффективность проводимых процессов. Однако, каждая конструкция аппарата имеет свои преимущества и недостатки. Одной из проблем является очистка и охлаждение газов, содержащих твердую дисперсную фазу, которая способна прилипнуть к поверхности контактных устройств и забивать насадку или отверстия тарелок. В таких случаях целесообразно применять провальные тарелки с большими отверстиями, или струйные прямоточные тарелки, а также высокоскоростной прямоточный режим с нисходящим движением фаз с вихревыми насадками с большим свободным объемом (>90%). При тепломассообмене прямоток фаз имеет меньшую движущую силу, чем при противотоке, однако для сепарации гетерогенных газовых смесей это не имеет значения, так как дисперсная частица покидает газовую фазу попав в жидкую и не влияет на движущую силу находясь в жидкости. Поэтому для очистки таких газов от дисперсной фазы представляется целесообразным применять нисходящий турбулентный прямоток газа и жидкости, где также будет происходить и охлаждение газа, пусть с меньшей эффективностью, чем при противотоке. Разработка математической модели такого совместного процесса с расчетами эффективности сепарации и тепловой эффективности охлаждения газа в насадочных скрубберах является важной задачей.

Представлена принципиальная схема, где прямоточный насадочный скруббер можно выполнить комбинированным если в кольцевом пространстве между центральной обечайкой с насадкой и стенкой колонны разместить кольцевую рулонную насадку или засыпать в это пространство хаотичные элементы (рис.1).

На схеме показан колонный аппарат, в котором находится цилиндрическая обечайка с хаотичным насадочным слоем. Газ и жидкость поступают в аппарат через верхние патрубки 1 и 2, где далее проходят через распределительную решетку – 5 с большим свободным сечением, поступают в хаотичный насадочный слой – 6. Хаотичная насадка обеспечивает интенсивный турбулентный прямоток. Между обечайкой с насадкой и конструкций аппарата имеется кольцевой зазор для удаления газа после очистки и охлаждения. Газовый поток на выходе в нижней части аппарата из слоя насадки меняет направление движения на 180°, а жидкая фаза с уловленной дисперсной фазой по инерции продолжает прямоточное движение к нижней эллиптической крышке и

выводится через патрубок -3; газовый поток двигаясь по кольцевому зазору выходит из аппарата через патрубок -4. На выходе из насадочного слоя с прямотоком фаз газовый поток изменяет направление своего движения и поступает в слой насадки – 7, где в противотоке взаимодействует со стекающей пленкой жидкости, которая подается в верхней части аппарата с расходом L_2 через патрубок 8 и распределяется на слой насадки через кольцевой ороситель.

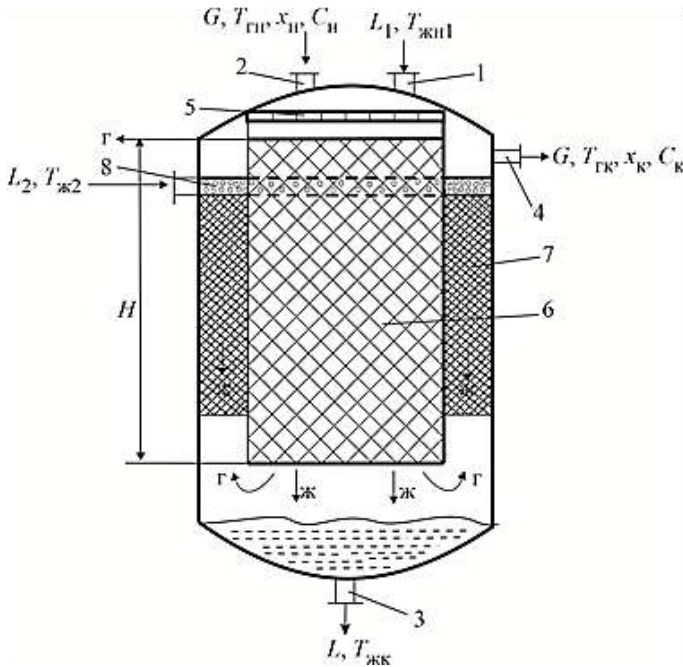


Рис. 1 Схема насадочного скруббера с прямоточно-противоточным движением фаз. 1,2-патрубки для входа жидкости и газа; 3,4- патрубки для выхода жидкости и газа; 5- решетка – распределитель фаз; 6- хаотичный насадочный слой; 7 – слой насадки с противоточным пленочным режимом взаимодействия фаз; 8 – патрубок для подачи жидкости через распределитель на слой насадки 7

В результате выполненных исследований с применением математической модели получены результаты по тепловой и сепарационной эффективности двухзонного насадочного скруббера с прямоточным и противоточным взаимодействием газовой и жидкой фаз.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00129, <https://rscf.ru/project/25-29-00129/>

Литература

1. Аронов, И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И. З. Аронов. 2-е изд.. Ленинград: Недра, 1990. 280 с.
2. Laptev A.G., Lapteva E.A. Determining the efficiency of packed gas separators of droplets taking into account the nonuniformity of the gas velocity profile // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021. Т. 55. № 2. С. 301–306.

УДК 66.074.5

С.У. ОГЛЫ АЛАСГАРЛИ, аспирант,
Р.Н. ХАМИДУЛЛИН, доцент,
А.Г. ЛАПТЕВ, д.т.н.

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Экспериментальные гидравлические и массообменные характеристики рулонной сетчатой насадки

Аннотация Представлены экспериментальные данные и обобщенные эмпирические выражения для гидравлического сопротивления, объемного коэффициента массоотдачи и эффективности увлажнения воздуха водой в колонне с рулонной сетчатой насадкой. Сделаны выводы о небольшом удельном перепаде давления и высокой массообменной эффективности (80–88%). Полученные результаты могут применяться при проектировании и модернизации пленочных градирен и скрубберов охлаждения газов.

Ключевые слова: массообмен, эффективность процессов, насадочные аппараты, эксперимент.

S.U. OGLU ALASGARLI, postgraduate,
R.N. KHAMIDULLIN, Candidate of Technical Sciences,
A.G. LAPTEV, DScTech.

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, 51 Krasnoselskaya Str.
E-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Experimental hydraulic and mass transfer characteristics of a rolled mesh nozzle

Abstract: The presented experimental data and generalized empirical expressions for hydraulic resistance, volumetric mass transfer coefficient and efficiency of humidification of air with water in a column with a rolled mesh nozzle. Conclusions are drawn about a small specific pressure drop and high mass transfer efficiency (80-88%). The obtained results can be used in the design and modernization of film cooling towers and gas cooling scrubbers.

Key words: mass transfer, process efficiency, nozzles, experiment.

В тепломассообменных колонных аппаратах для проведения процессов ректификации, абсорбции, а также охлаждения и очистки газов

от дисперсной фазы применяются разнообразные контактные устройства – тарельчатые, насадочные, вихревые и комбинированные [1]. В нефтехимии и нефтегазопереработке примерно половина массообменных колонн оборудуются насадочными контактными устройствами – регулярного и нерегулярного (хаотичного) типов. При ограничениях по перепаду давления (например, в вакуумных колоннах) в основном применяются регулярные насадки – рулонные, пакетные, пластинчатые и другие. Регулярные насадки также применяются в пленочных градирнях для охлаждения воды воздухом. Поэтому целью данной работы является представление гидравлических и массообменных характеристик исследованной рулонной сетчатой насадки из полимерных материалов.

Экспериментальные исследования выполнялись в колонне диаметром 200 мм и высотой два метра из оргстекла на системе воздух-вода при противотоке фаз (пленочной режим) [2]. Исследовался процесс увлажнения воздуха водой при температуре 20°C т.е. когда основное сопротивление массообмену сосредоточено в газовой фазе. Скорость воздуха w_r в колонне составляла от 0,5 до 2,5 м/с, плотность орошения $q_{ж}$ от 4,9 до 15,9 м³/(м²час).

Удельная поверхность полимерной сетки, свернутой в рулон, имеет значение $a_v = 240$ м²/м³, при условно сплошной поверхности, высота насадки в колонне один метр. Удельный свободный объем $\varepsilon_{св} = 0,95$ (95%), эквивалентный диаметр каналов $d_3 = 0,015$ м.

Экспериментально исследован перепад давления ΔP_r воздуха для сухой и орошаемой насадки. Измерялись расходы фаз и влагосодержание воздуха. Для сухой насадки (без орошения) получен и обобщен в виде эмпирической зависимости коэффициент гидравлического сопротивления.

$$\xi_{сух} = 0,015 Re_r^{0,15} + 7,1 \cdot 10^{-7} Re_r^{1,5}, \quad (1)$$

где $\xi_{сух} = 2\Delta P_r d_3 / \left[H \rho_r (w_r / \varepsilon_{св})^2 \right]$, при $450 < Re_r < 2500$; $Re_r = 4w_r / (a_v \nu_r)$

– число Рейнольдса; ρ_r – плотность газа, кг/м³.

Коэффициент сопротивления орошаемой насадки

$$\xi_{ор} = \xi_{сух} (1 + 0,1 Re_{ж}^{0,18}), \quad (2)$$

где $Re_{ж} = 4q_{ж} / (a_v \nu_{ж})$ – число Рейнольдса по жидкой фазе; $20 < Re_{ж} < 160$.

Перепад давления орошаемой насадки получен в интервале от 2-3 Па/м до 60 Па/м при скорости воздуха от 0,5 до 2,5 м/с. По сравнению со многими регулярными насадками перепад давления не большой.

Из эксперимента измерено влагосодержание воздуха на входе x_n и выходе x_k слоя насадки, вычислен поток массы $M = G(x_k - x_n)$, где G – массовый расход воздуха, кг/с и из уравнения массоотдачи определен объемный коэффициент массоотдачи в газовой фазе β_{xV} , кг/(м³с).

Значение β_{xV} установлен в интервале от 1,0 до 6,0 кг/(м³с).

В результате обобщения опытных данных получено выражение для расчета объемного коэффициента массоотдачи в виде

$$\beta_{xV} = 1,75L^{1,16}\lambda^{0,98}, \quad (3)$$

где $\lambda = G/L$; G , L – удельные массовые расходы газа и жидкости, кг/(м²с).

По выражению

$$E_{ГХ} = \frac{x_k - x_n}{x_k^* - x_n} \quad (4)$$

экспериментально определена эффективность массообмена при увлажнении воздуха водой, где x_k^* – влагосодержание на линии равновесия при температуре жидкой фазы на входе. Получено при $q_{ж} = 4,9$ м³/(м²ч) значение $E_{Г}$ от 0,81 до 0,83, при $w_{Г} = 0,5 - 2,5$ м/с $E_{Г} = 0,85$ до 0,8 при $q_{ж} = 15,9$ м³/(м²ч). Отсюда следует высокая эффективность массообмена, которая находится от 80 до 88 % при различных нагрузках по газу и жидкости. Установлено, что применение модели идеального вытеснения газа в виде выражения

$$E_{Г} = 1 - \exp[-\beta_{ГV}H / (\rho_G w_{Г})] \quad (5)$$

удовлетворительно описывает экспериментальные данные с расхождением не более 2–6 % относительных.

Полученные результаты могут применяться в расчетах пленочных градилен и скрубберов охлаждения газов, а также абсорберов для легко растворимых газов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00129, <https://rscf.ru/project/25-29-00129/>.

Литература

1. Витковская Р.Ф., Пушнов А.С., Шинкунас С. Аэрогидродинамика и тепло-массообмен насадочных аппаратов. СПб.: Лань-Пресс, 2019. 288 с.
2. A.G. Laptev, E.A. Lapteva A method for determining the heat and mass transfer efficiency in a film cooling tower with intensified fill packs // Thermophysics and Aeromechanics. 2024. Vol. 31, № 3 P. 469–479.

УДК 9

Р.Н ШИХТА, студент,
Д.С. ПИСАРЕВ, к.т.н.,

Национальный исследовательский университет "МЭИ"
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: ShikhtaRN@mpei.ru, PisarevDS@mpei.ru

Расчётный анализ эффективности ТЭС с углекислотным рабочим телом

Аннотация. В данной работе исследуется применение цикла Брайтона на сверхкритическом CO_2 (sCO_2) для повышения эффективности тепловых электростанций (ТЭС). Рассмотрены преимущества использования sCO_2 в качестве рабочего тела. Представлены результаты моделирования цикла Брайтона с различными параметрами, демонстрирующие потенциал увеличения КПД электростанций. Рассмотрены циклы Брайтона на сверхкритическом CO_2 с регенерацией, с промежуточным охлаждением.

Ключевые слова: тепловые электростанции, КПД, сверхкритический CO_2 , цикл Брайтона, регенерация, промежуточное охлаждение

R.N. SHIKHTA, master's student
D.S. PISAREV, PhD,

National Research University "MPEI"
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14
E-mail: ShikhtaRN@mpei.ru, PisarevDS@mpei.ru

Computational analysis of the efficiency of thermal power plants with a carbon dioxide working fluid

Abstract. This work explores the use of the Brighton cycle on supercritical CO_2 (sCO_2) to increase the efficiency of thermal power plants (CHP). The advantages of using sCO_2 as a working fluid are considered. The results of modeling the Brighton cycle with various parameters are presented, demonstrating the potential for increasing the efficiency of power plants

Key words: thermal power plants, efficiency, supercritical CO_2 , Brighton cycle, regeneration, intercooling.

В течение многих десятилетий инженеры и учёные активно исследовали различные способы повышения КПД тепловых электростанций. В настоящее время увеличение КПД традиционными методами: снижение потерь теплоты с уходящими газами, система утилизации тепла, совершенствование системы водоподготовки, понижение давления пара в конденсаторе турбины, улучшение материалов и конструкции котлов и турбин – всё это при использовании водяного пара в качестве рабочего тела фактически достигло своего предела, поэтому необходимо использовать альтернативные методы, а именно – использование нового рабочего тела.

Одним из вариантов нового рабочего тела в цикле может быть CO_2 на сверхкритических параметрах. CO_2 обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным пароводяным теплоносителем, а именно: низкие критические параметры, низкая агрессивность, высокая плотность, малая требуемая степень расширения, небольшая вязкость. Также стоит отметить, что цена CO_2 сопоставима с водяным теплоносителем. Основные физические параметры CO_2 представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные физические параметры CO_2

Параметр	Значение	Единицы измерения
Критическая температура	31.0	$^{\circ}\text{C}$
Критическое давление	7.38	МПа
Критическая плотность	468	кг/м^3
Динамическая вязкость	0.015 - 0.04	мПа·с
Теплопроводность	0.02 - 0.2	Вт/(м·К)

Наиболее известные на сегодняшний день циклы на сверхкритическом CO_2 - это цикл с регенерацией и цикл с промежуточным охлаждением. Схемы этих циклов представлены на рис. 1.

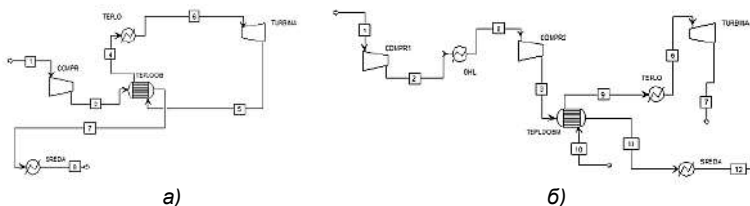


Рис. 1. Циклы Брайтона с регенерацией (а), с промежуточным охлаждением (б)

Для схемы с циклом Брайтона с регенерацией в настоящей работе были рассмотрены два случая и получены следующие зависимости: зависимость КПД Брутто от начальной температуры и начального давления рабочего тела при неизменном давлении после турбины (а) и зависимость КПД Брутто от начальной температуры и давления после турбины при неизменном начальном давлении (б). Данная информация представлена в виде диаграмм на рис. 2.

Из диаграмм видно, что КПД Брутто незначительно возрастает при больших значениях давления после турбины, несмотря на достаточно большие значения начального давления и температур. При уменьшении давления потока CO_2 после турбины виден существенный прирост КПД Брутто, при этом не требуется задавать относительно больших значений начальных температур и давлений для достижения высоких значений КПД.

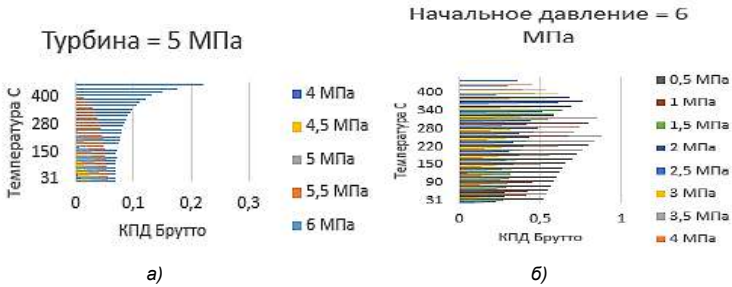


Рис. 2. Диаграммы анализа цикла Брайтона с регенерацией при постоянном давлении после турбины (а), при постоянном начальном давлении (б)

Из диаграмм видно, что КПД Брутто незначительно возрастает при больших значениях давления после турбины, несмотря на достаточно большие значения начального давления и температур. При уменьшении давления потока CO_2 после турбины виден существенный прирост КПД Брутто, при этом не требуется задавать относительно больших значений начальных температур и давлений для достижения высоких значений КПД.

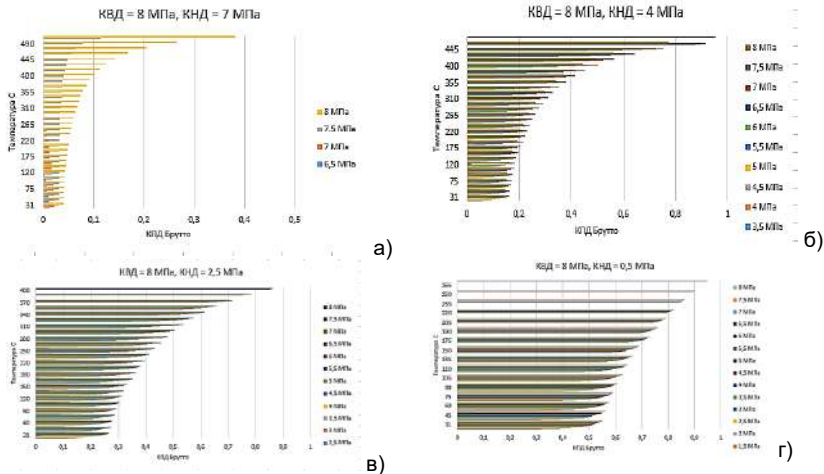


Рис. 3. Диаграммы анализа цикла Брайтона с промежуточным перегревом при давлении потока CO_2 после турбины низкого давления: а – 7 МПа, б – 4 МПа, в – 2,5 МПа, г – 0,5 МПа

Для схемы с циклом Брайтона с промежуточным перегревом была получена зависимость КПД Брутто от начальных параметров и давления после компрессора низкого давления потока CO_2 при постоянном

давлении после компрессора высокого давления и турбины. Данная информация представлена в виде диаграмм на рис. 3.

Из данных диаграмм видно, что чем меньше давление после компрессора низкого давления, тем выше КПД Брутто даже при небольших значениях начальных температур рабочего тела. Плавная картина увеличения КПД (без большой разницы минимальных и максимальных значений входных параметров) прослеживается с момента, когда давление рабочего тела после компрессора низкого давления становится меньше 2,5 МПа.

Использование в качестве рабочего тела сверхкритического углекислого газа видится перспективным, поскольку при относительно невысоких начальных параметрах (температура в диапазоне 150-500 °С и давления в диапазоне 2,5–6 МПа) КПД Брутто может достигать 50%, что может превысить КПД циклов ТЭС на пароводяном теплоносителе, уровень КПД которых составляет около 45–48%.

Литература

1. Исследование влияния ключевых параметров на эффективность АЭС с углекислотным теплоносителем (ГЗ, НРЭ, 2022)
2. Исследование тепловых схем углекислотных энергоблоков с пылеугольными котельными агрегатами (ГЗ, НРЭ, 2021)
3. Разработка и исследование тепловых схем комбинированных установок с утилизационным циклом (ГЗ, НРЭ, 2022)
4. Разработка и исследование тепловых схем комбинированных установок с утилизационным циклом (ГЗ, НРЭ, 2022)
5. Разработка моделей оценки стоимости энергетического оборудования на сверхкритическом диоксиде углерода (ГЗ, НРЭ, 2022)
6. Теплогидравлическая оптимизация формы каналов углекислотных пластинчатых теплообменников (ГЗ, конф РНКТ, 2022)
7. Термодинамические циклы на сверхкритическом диоксиде углерода для ТЭС и АЭС (РФФИ-CO₂, НРЭ, 2021)

УДК 621.3.049.7, 621.3.036.29

И.С. ТУРЧЕНКО, к.т.н
Д.С. ЗОТОВ, студент

Московский Авиационный Институт, Кафедра 310
125080 г. Москва, Волоколамское шоссе 4
E-mail: i.s.turchenko@yandex.ru, drozd24.11@yandex.ru

Анализ теплового состояния блока управления авиационным синхронным генератором

Аннотация. В работе приведены результаты проектирования компоновки блока регулирования, защиты и управления генератором. Проведен анализ теплообмена и выполнены тепловые расчеты для сравнительной оценки эффективности нескольких вариантов радиаторов силовой части блока.

Ключевые слова: тепловое моделирование, система генерирования, синхронный генератор, блок регулирования, пассивное охлаждение.

I.S. TURCHENKO, PhD
D.S. ZOTOV, student

Moscow Aviation Institute, department 310
125080 Moscow, Volokolamskoe shosse 4
E-mail: i.s.turchenko@yandex.ru, drozd24.11@yandex.ru

Analysis of the thermal condition of the aviation generator control unit

Abstract. This article presents the results of the generator control unit construction design. An analysis of heat transfer and thermal calculations was performed for comparative assessment of efficiency of several types of power side radiators.

Key words: thermal modeling, power generation system, synchronous generator, generator control unit, passive cooling.

Основным источником напряжения переменного тока в системе электроснабжения летательного аппарата (далее – ЛА) служит бесконтактный синхронный генератор (далее – СГ). Обеспечение стабилизации выходного напряжения СГ осуществляется посредством применения блока регулирования, защиты и управления (далее - блок), который также управляет линейным контактором системы генерирования и обеспечивает защиту компонентов системы генерирования от аварий [1].

Современная элементная база и средства компьютерного моделирования позволяют по-новому взглянуть на процесс проектирования электронных изделий, в результате которого должны быть получены характеристики, соответствующие повышенным требованиям перспективных ЛА.

На рис. 1 приведена структурная схема блока, где обозначены: 1 – силовая часть блока (далее – СЧ), 2 – блок преобразования аналоговых сигналов (БПАС), 3 – драйвер, 4 – система управления и защиты (СУЗ), 5 – блок вспомогательных напряжений (БВН), 6 – блок согласования.

В результате моделирования электрических процессов в СЧ блока были получены значения потерь мощности в полупроводниковых элементах СЧ блока в режиме работы при следующих условиях:

- стабилизация выходного напряжения основного каскада генератора на уровне 115 В (фазное, действующее);
- номинальное значение тока нагрузки;
- минимальное допустимое значение оборотов вращения вала.

Результаты представлены в табл. 1, где приведены: P_{rect} – потери в диоде выпрямителя, P_{vt} – потери в транзисторе регулятора, P_{vd} – потери в диоде регулятора.

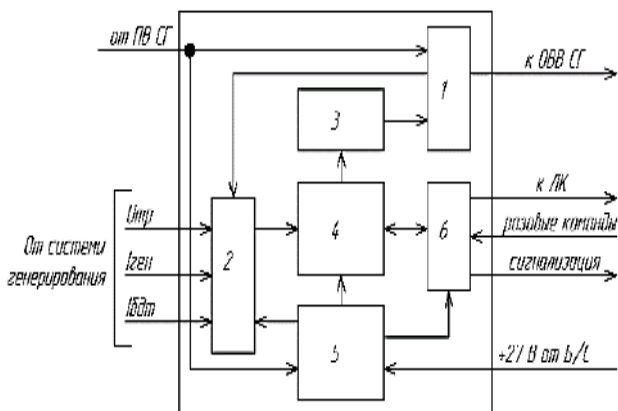


Рис. 1. Структурная схема блока

Таблица 1. Потери в полупроводниковых элементах СЧ блока

Потери в ЭРИ СЧ блока	$P_{rect}, \text{Вт}$	$P_{vt}, \text{Вт}$	$P_{vt}, \text{Вт}$
	0,43	0,716	0,94

Разработана конструкция блока для анализа температурного распределения при тепловых потерях на транзисторах и диодах СЧ (в корпусах КТ-94-1) (рис. 2) с учетом пассивного охлаждения: 1 – плата СУЗ, 2 – плата СЧ, 3 – плата БПАС, 4 – плата блока согласования, 5 – плата БВН, 6 – приборная часть соединителя.

3D-модель платы СЧ блока приведена на рис. 3, где показаны: 1 – элементы в корпусах типа КТ-94-1, 2 – электролитические конденсаторы, 3 – датчик тока.

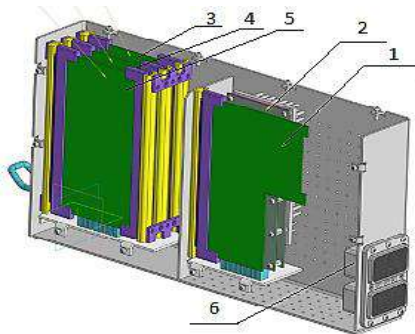


Рис. 2

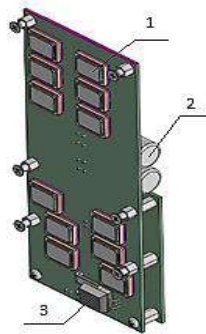


Рис. 3

Для сравнительного анализа эффективности теплоотвода были выбраны три различных типа радиатора (рис. 4):

- И-120 – игольчатой конструкции (4а);
- АВ1320 – ребристый с профилированными гранями (рис. 4б);
- АВ0099 – классический ребристый (рис. 4в).

Радиаторы имеют идентичные базовые геометрические параметры: толщина основания 4 мм, и высота ребер 17 мм, что обеспечивает корректность сравнения их тепловых характеристик.

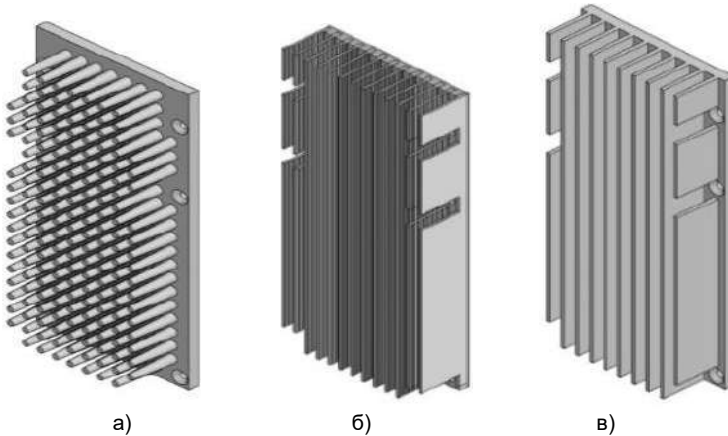


Рис. 4. Рассматриваемые варианты радиаторов

При проектировании конструкции силовой части блока необходимо обеспечить температуру элементов не более 90°C в указанном режиме работы. Нагрев элементов без применения радиатора не приемлем, т. к. температуры могут достигать значений более 100°C.

Заданное значение температуры обеспечивается геометрическими параметрами радиатора, свойствам теплопроводности материала, а также характеристикой поверхности излучения радиатора.

Результаты моделирования теплового состояния СЧ блока представлены на рис. 5 без радиатора (а) и с радиатором АВ0099 (б).

Исходные настройки моделирования: «Течение в газах и жидкости», «Теплопроводность в твердых телах», «Радиационный теплообмен». Гравитация задана по оси Y. Текучая среда – «воздух». Материал по умолчанию «Aluminum». Задаем начальные и внешние условия, нормальное давление, температуру окружающей среды 50°C.

Результаты моделирования сведены в табл. 2, где: T_{rect} – температура диода выпрямителя, T_{vt} – температура транзистора, T_{vd} – температура диода регулятора, $T_{рад}$ – температура основания радиатора.

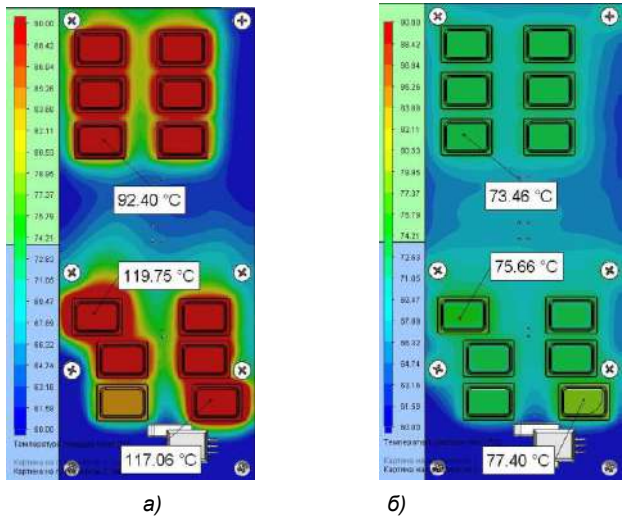


Рис. 5. Картины распределения температур по элементам СЧ

Таблица 2. Результаты теплового моделирования

Температура	T _{rect} , °C	T _{vt} , °C	T _{vd} , °C	T _{рад} , °C
Без радиатора	98	98	120	-
И-120	77,5	76,5	85	73,2
AB-1320	73,3	73	76,8	71,2
AB-0099	73,5	73,3	76,6	71,8

Анализ полученных результатов

Применение радиатора И-120 оказалось менее эффективным, вероятно причина этого в способе размещения внутри конструкции блока при заданных условиях охлаждения и компоновке источников нагрева.

Значения температур, полученных при сравнении радиаторов АВ1320 и АВ0099 составили не более 1% для основания радиатора, и не более 0,5% на поверхности наиболее нагреваемых ЭРИ, при этом радиатор АВ0099 более прост в изготовлении, а значит обладает меньшей стоимостью при обеспечении требуемых показателей теплового состояния конструкции проектируемого изделия.

Литература

1. Грузков, С.А. Системы электроснабжения летательных аппаратов. Т. 1. / С.А. Грузков, С.Ю. Останин, А.М. Сугробов, А.Б. Токарев, П.А. Тыричев. Учебник

для вузов в двух томах. Под ред. С.А. Грузкова. М.: Издательство МЭИ, 2005, 568 с.

2. Кольтюков Н.А., Белоусов О.А. Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств: учеб. пособие / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 84 с.

3. Дульнев Г. И. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по спец. «Конструирование и произв. Радиоаппаратуры». М.: Высш. шк., 1984. 247 с.

4. Лигра: литые игольчатые радиаторы [сайт]. Режим доступа: <https://www.ligra-spb.ru/index.html>, свободный.

УДК 669.02

С.В. ЛУКИН, д.т.н.,
М.Д. ИВАНОВ, аспирант

Череповецкий государственный университет, Инженерно-технический институт,
162600 г. Череповец, ул. Дзержинского, 30
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Использование теплоты, отводимой от слябов в машине непрерывного литья заготовок

Аннотация. В статье обоснована возможность утилизации низкопотенциальной теплоты, образующейся в системе охлаждения машины непрерывного литья заготовок. Также предложен способ использования данной теплоты в системе теплоснабжения металлургического завода и близлежащего города.

Ключевые слова: Утилизация, низкопотенциальная теплота, машина непрерывного литья заготовок.

S.V.LUKIN, Doctor of Engineering,
M.D. IVANOV, postgraduate student

Cherepovets State University, Engineering and Technical Institute,
162600 Cherepovets, st. Dzerzhinsky, 30
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

The use of heat removed from slabs in a continuous casting machine

Abstract. The paper bases the possibility of utilization of low potential heat in the cooling system of continuous casting machine. Also the way of using the utilized heat in the heat supply system of the metallurgical plant and the nearby town is proposed.

Key words: Utilization, low potential heat, continuous casting machine.

В настоящее время теплота, отведенная от металла в пределах машины непрерывного литья заготовок, практически никак не используется и теряется в окружающей среде. Так, на пяти слябовых криволинейных

МНЛЗ ЧерМК ОАО «Северсталь» может разливаться до 9 млн. тонн стали в год; при числе часов в году, равном 8760 ч, средняя производительность 5-ти МНЛЗ составит примерно 106 кг/ч. Количество теплоты, поступающей с жидким металлом в МНЛЗ, составляет 1500 ГДж/ч.

В настоящее время наиболее реально осуществить утилизацию теплоты воды, охлаждающей кристаллизатор и ролики МНЛЗ, эта теплота составляет примерно 70 % всей теплоты, отводимой от сляба в МНЛЗ.

Если не изменять конструктивных размеров кристаллизатора и роликов, то расходы охлаждающей воды на кристаллизатор и ролики и скорости воды в каналах следует оставить такими же, какие применяются в настоящее время, но при этом вода будет нагреваться в кристаллизаторе, например, не от 30 °С до 40 °С, а от 90 до 100 °С; в роликах вода будет нагреваться не от 30 °С до 50 °С, а от 80 до 100 °С. В промежуточном противоточном теплообменнике химочищенная вода будет охлаждаться, нагревая вторичную сетевую воду, например, от 70 °С до 95 °С. При этом надежность работы оборудования и производительность МНЛЗ практически не изменятся.

Другой проблемой является сбор и использование горячей воды, полученной на МНЛЗ. Примем, что при работе пяти криволинейных слябовых МНЛЗ ЧерМК при охлаждении кристаллизатора и роликов можно в среднем утилизировать $Q_{\text{ср}} = 0,7 \cdot 750 = 525$ ГДж/ч теплоты охлаждения металла (0,7 – доля теплоты охлаждения металла, отводимая в кристаллизаторах и роликах). Максимальное количество утилизированной теплоты составит $Q_{\text{max}} = Q_{\text{ср}}/\varphi = 656$ ГДж/ч, где $\varphi \approx 0,8$ коэффициент загрузки МНЛЗ в течение года. Чтобы использовать теплоту, полученную от МНЛЗ, для нужд теплоснабжения, можно использовать схему, показанную на рис. 1.

Примем, что тепловая сеть работает по графику 50-130 °С, где $t_{\text{o.c}} = 50$ °С, $t_{\text{n.c}} = 130$ °С – расчетные температуры обратной и прямой сетевой воды. Расход сетевой воды $G_{\text{с.в.}}$, подогреваемой на всех МНЛЗ, определяется из условия, что при расчетном режиме температура сетевой воды после всех МНЛЗ равна $t_{\text{м}} = 95$ °С. Отсюда определяем:

$$G_{\text{с.в.}} = \frac{Q_{\text{max}}}{c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{м}} - t_{\text{o.c}})} = \frac{656}{4,19 \cdot (95 - 50)} = 3,48 \text{ тыс. т/ч.} \quad (1)$$

При пониженной температуре обратной сетевой воды ($t_{\text{o.c}} < 50$ °С) при расчетном режиме работы 5-ти МНЛЗ ($Q = Q_{\text{max}}$) подогрев сетевой воды в МНЛЗ будет неизменным и равным: $\delta t_{\text{max}} = t_{\text{м}} - t_{\text{o.c}} = 45$ °С. Если какие-то МНЛЗ работают на нерасчетном режиме или вообще не работают ($Q < Q_{\text{max}}$), то подогрев сетевой воды будет равен: $\delta t = (Q/Q_{\text{max}}) \cdot \delta t_{\text{max}}$. Температура сетевой воды, нагретой в МНЛЗ и поступающей на ТЭЦ, в общем случае определяется выражением:

$$t_{\text{м}} = t_{\text{o.c}} + \delta t_{\text{max}} \cdot (Q/Q_{\text{max}}). \quad (2)$$

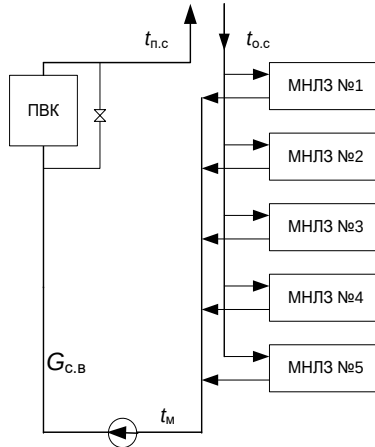


Рис. 1. Схема утилизации теплоты МНЛЗ

Например, при $t_{o.c} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $Q/Q_{\max}=3/5$ (работают 3 МНЛЗ из 5-ти), подогрев сетевой воды на МНЛЗ составит $\delta t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура подогретой воды – $t_M = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При утилизации теплоты в количестве $Q = Q_{\text{ср}} = 525\text{ ГДж/ч}$ (работают в среднем 4 МНЛЗ), экономия условного топлива, сжигаемого в ПВК, составит:

$$\Delta B = \frac{Q}{\eta_{\text{кот}} \cdot 29,3} = 525 \cong 17,9\text{ т.у.т/ч}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{кот}} \approx 0,9$ – КПД пикового котла; 29,3 – теплота сгорания условного топлива, ГДж/т.

В течение отопительного периода, длящегося 8 месяцев в году, экономия топлива на ПВК составит 103,1 тыс. т.у.т., или 86 млн. м^3 природного газа. При настоящей цене на природный газ на внутреннем рынке РФ в 3 руб/ м^3 , экономия денежных затрат на топливо, сжигаемого в ПВК, в течение отопительного периода составит примерно 260 млн. руб. Кроме того, теплота, полученная на машинах непрерывного литья заготовок, в летнее время может использоваться для горячего водоснабжения, обеспечивая дополнительную экономию топлива и денежных затрат.

Вывод: в данной работе показано, что, не изменяя конструкции охлаждаемых элементов криволинейных слябовых МНЛЗ можно утилизировать примерно 70 % теплоты охлаждения разливаемого металла, отводимой в системе охлаждения МНЛЗ, нагревая при этом сетевую воду до $95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Окончательный подогрев сетевой воды следует производить в

пиковой водогрейной котельной. Результатом данного мероприятия является значительный экономический и экологический эффекты.

Литература

1. Лукин, С.В. Использование теплоты охлаждения стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия / С.В. Лукин, Д.В. Поселужный, А.Н. Кибардин // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 7–9.
2. Лукин, С.В. Утилизация низкопотенциальной теплоты в системе охлаждения машины непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, В.В. Мухин // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. № 2. Т. 1. С. 11–14.
3. Лукин, С. В. Исследование теплового баланса криволинейной машины непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, А.А. Кочкин // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. № 3 (64). С. 29–32, 36.

УДК 523. 526

Г.В. КУЗНЕЦОВ, д.ф.-м.н.,
С.В. СЫРОДОЙ, д.т.н.,
М.С. ТАМАШЕВИЧ, аспирант

Томский политехнический университет
г. Томск, пр. Ленина 30а
E-mail: syrodoy@tpu.ru, mst15@tpu.ru

Тепловой режим подложки при испарении группы капель с ее поверхности

Аннотация. В работе приведены экспериментальные результаты измерения характерных температур в приповерхностном слое подложки при испарении группы (двух) капель воды.

Ключевые слова: капля воды, подложка, тепловой поток, испарение, охлаждение, температурное поле.

S. V. SYRODY, PhD
G.V. KUZNETSOV, PhD
M.S. TAMASHEVICH, postgraduate student

Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Lenin Ave. 30a
E-mail: syrodoy@tpu.ru, mst15@tpu.ru

Thermal regime of the substrate during evaporation of a group of droplets from its surface

Abstract. The paper presents experimental results of measuring characteristic temperatures in the near-surface layer of the substrate during the evaporation of a group (two) of water droplets.

Key words: water drop; substrate; heat flow; evaporation; cooling; temperature fields.

Необходимость соблюдения регламентного температурного режима в интенсивно нагреваемых элементах электронного и радиоэлектронного

оборудования приводит к поиску методов эффективного отвода теплоты в таких условиях. По этой причине в последние годы много внимания уделяется исследованием систем капельного охлаждения нагретых до высоких температур поверхностей. Но до последнего времени анализ процессов капельного охлаждения проводился без непосредственного измерения температур охлаждаемого элемента в зоне расположения капли охлаждающей жидкости. При этом температуры в прилегающем к поверхности контакта с каплей слое нагретого материала являются основной характеристикой работы такой системы охлаждения.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение температур в тонком прилегающем к границе раздела «капля воды – пластина нагретого металла» слое материала в типичном для практики диапазоне изменения тепловых потоков и температур нагреваемых элементов оборудования.

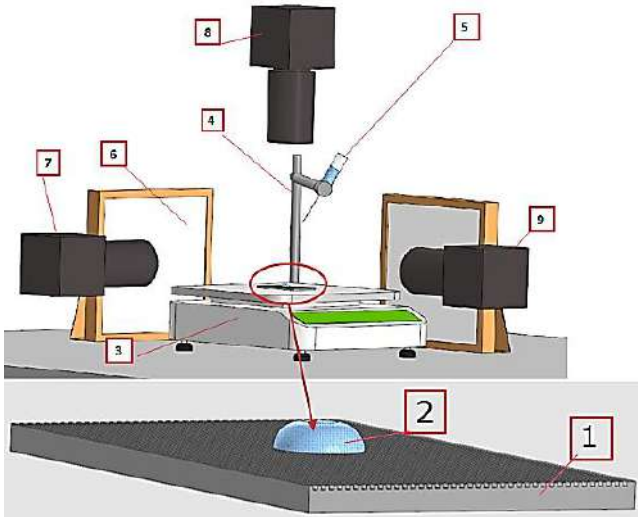


Рис. 1. Экспериментальный стенд:

- 1 – металлическая текстурированная подложка; 2 – капля воды;
- 3 – Нагревательная плита; 4 – Штатив; 5 – Шприц с водой; 6 – Прожектора;
- 7 – Камера EverCam с видом поперек канавок; 8 – Камера EverCam с видом сверху; 9 – Камера EverCam с видом вдоль канавок.

Эксперименты проводились на установке, представленной на рис. 1. Экспериментальная установка состояла из нагревательной плиты, на поверхность которой крепилась подложка. Над последней устанавливался дозатор, подключенный к двухшприцевому насосу. Весь процесс растекания и испарения капель снимался комплексом из трех высоко-

скоростных камер. Процесс испарения капель изучался с помощью теневого метода. В экспериментах изучались процессы испарения группы капель дистиллированной воды с характерным значением начального (в момент времени, предшествующий непосредственному касанию капли сферической формы поверхности подложки) диаметра $D = 3$ мм. Расстояние между центрами капель варьировалось s : 6; 14; 18 мм.

На рис. 2 приведены результаты измерения характерных температур в приповерхностном слое подложки при испарении группы капель.

Хорошо видно, что во всех четырёх вариантах нагрева температуры во всех точках измерения за время испарения капли (около 200 с) изменяются не более чем на 4-6 К. Т.е. испарение группы капель не оказывает существенного влияния на температуру пластины под каплями. Также было проанализировано влияние расстояния между каплями и было установлено, что с ростом расстояния между каплями с 6 мм до 18 мм степень охлаждения подложки в центральной термопаре снижается с 6 К до 1,5 К, что логично.

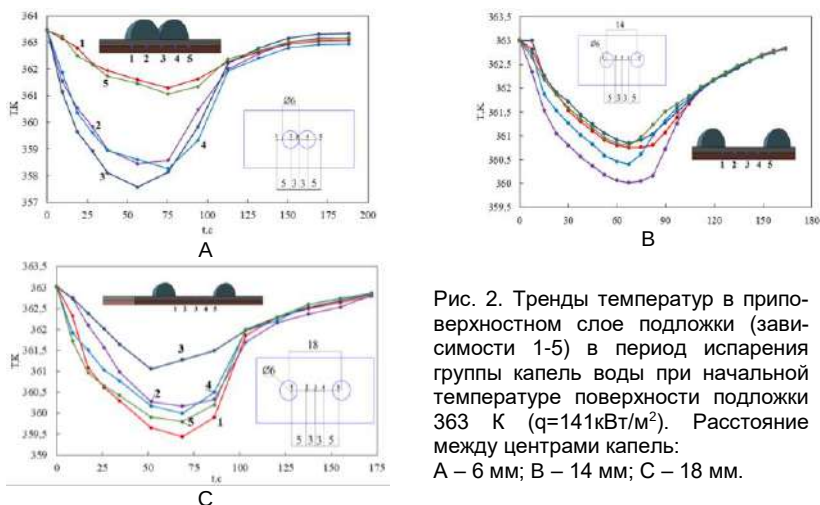


Рис. 2. Тренды температур в приповерхностном слое подложки (зависимости 1-5) в период испарения группы капель воды при начальной температуре поверхности подложки 363 К ($q=141\text{ кВт/м}^2$). Расстояние между центрами капель:

А – 6 мм; В – 14 мм; С – 18 мм.

Вывод. Результаты проведенных экспериментов дают основания для вывода о слабом влиянии испаряющейся группы (двух) капель воды на температуру приповерхностных слоев нагретых элементов конструкции (в пределах 4-6 К) в зоне непосредственно под каплями. Установленный эффект обусловлен существенно более быстрым перетоком теплоты в зону под каплями по всем трем координатным направлениям по сравнению с оттоком теплоты в каплю из зоны её непосредственного влияния. Этот эффект является следствием того, что коэффициенты теплопроводности всех металлов использующихся для изго-

товления элементов электронной и радиоэлектронной техники во много раз больше коэффициента теплопроводности воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФ (грант РФФ №23-79-10092).

Литература

1. Feoktistov, D.V., Abedtazehabadi, A., Dorozhkin, A.V., Laga, E.Yu., Pleshko, A.O., & Orlova, E.G. (2024). Biphilic heat exchange surfaces for drip irrigation cooling systems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 224, 125316. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125316>
2. Pan, Z., Dash, S., Weibel, J. A., & Garimella, S. V. (2013). Assessment of water droplet evaporation mechanisms on hydrophobic and superhydrophobic substrates. Langmuir, 29(51), 15831–15841. <https://doi.org/10.1021/la4045286>
3. Syrodoy, S., Kuznetsov, G., Voytkova, K., & Gutareva, N. (2023). Mathematical modeling of the evaporation of a water drop from a heated surface. Langmuir, 39(14), 5041–5055. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00059>

УДК 662.9

Н.С. НАЧКЕБИЯ, аспирант

Донецкий национальный технический университет,
283001, г. Донецк, ул. Артема 58
E-mail: nata@nachkebiya.ru

Цифровой двойник теплообменных процессов микрорегенеративных насадок регенеративных горелок, проверка адекватности

Аннотация. В статье представлена математическая модель (цифровой двойник), разработанная на кафедре «Техническая теплофизика» ДонНТУ для определения теплотехнических параметров регенеративной насадки. Модель основана на методе элементарных тепловых балансов и учитывает термомассивность шариков с использованием явной конечноразностной схемы. Для подтверждения адекватности модели была создана лабораторная установка. Проведены экспериментальные исследования. Рассмотрено влияние теплоизоляции на характеристики теплообменной насадки. Полученные экспериментальные данные были аппроксимированы полиномиальным уравнением для использования в математической модели. Сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных данных показало хорошую сходимость, подтверждающую релевантность разработанной модели.

Ключевые слова: энергоэффективность, регенеративные горелки, теплообмен, тепловой баланс, цифровой двойник

N.S. NACHKEBIYA, Postgraduate Student

Donetsk National Technical University,
283001 Donetsk, Artyoma Street 58
E-mail: nata@nachkebiya.ru

Digital twin of heat exchange processes of microregenerative nozzles of regenerative burners, adequacy check

Abstract. The article presents a mathematical model (digital twin) developed at the Department of Technical Thermophysics of DonNTU to determine the thermal engineering parameters of a regenerative nozzle. The model is based on the method of elementary thermal balances and takes into account the thermomassivity of the balls using an explicit finite difference scheme. A laboratory facility was created to confirm the adequacy of the model. Experimental studies have been conducted. The influence of thermal insulation on the characteristics of the heat exchanger nozzle is considered. The experimental data obtained were approximated by a polynomial equation for use in a mathematical model. A comparison of the results of mathematical modeling and experimental data showed good convergence, confirming the relevance of the developed model.

Key words: energy efficiency, regenerative burner, heat exchange, heat balance, digital twin

На кафедре «Техническая теплофизика» ДонНТУ была создана математическая модель (цифровой двойник) для определения теплотехнических параметров регенеративной насадки. Модель основывается на принципе элементарных тепловых балансов, а также учитывает в себе термомассивность шариков по средствам явной конечноразностной схемы. Детальнее методика описана в [1].

Для подтверждения достоверности цифрового двойника была создана лабораторная установка, эмитирующая «дымовую» фазу работы регенеративной горелки. Через слой стеклянных шариков пропускали нагретый воздух и в непрерывном режиме отслеживали изменение температуры воздуха до и после слоя шариков.

Измерения температуры производилось при помощи термопар, а также производилось дополнительное фиксирование эксперимента при помощи тепловизора. Проводились замеры входящей температуры воздуха, непосредственно перед шариковой теплообменной насадкой и температура воздуха сразу после насадки. Результаты измерений показаны на рис. 1 и 2.

Установка диаметром 200мм с металлической сеткой. На сетку засыпаны стеклянные шарики, высота засыпки шариков 137 мм. Для подогрева воздуха были использованы 2 спирали общей мощностью 3,5 кВт. Экспериментально установлено, что вентилятор обеспечивает скорость потока 3 м/с на входе в теплообменную насадку.

Были проведены опыты с применением теплоизоляции и без теплоизоляции.

При проведении первого эксперимента в сети имел место скачек напряжения, поэтому было принято решение продлить время наблюдения. При проведении второго эксперимента наблюдения проходили в штатном режиме и были закончены при установлении стационарного режима работы насадки, когда температура перестала менять значение.

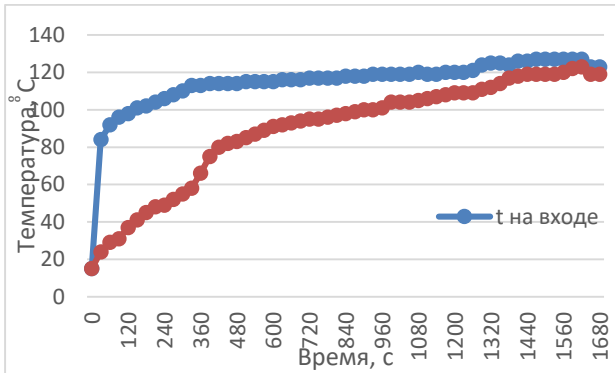


Рис. 1. Эксперимент 1, без применения теплоизоляции

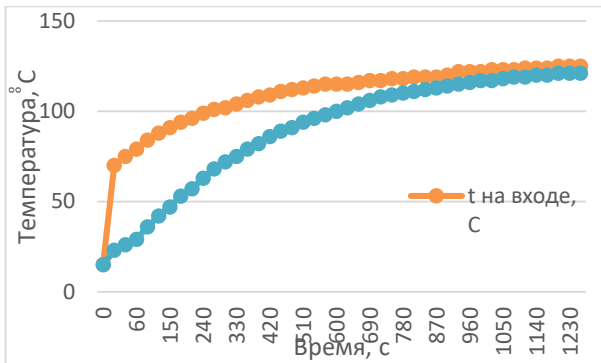


Рис. 2. Эксперимент 2, с теплоизоляцией из синтепона

При сравнении полученных графиков на рис. 1 и 2 можно сделать следующие наблюдения, что при применении теплоизоляции разница температур в условно зоне стационарного состояния меньше, чем в аналогичной зоне без теплоизоляции. Это наблюдение позволяет сделать вывод что при применении теплоизоляции имеем уменьшение теплотер в окружающую среду.

Далее результаты, полученные опытным путем, были апробированы на математической модели. Для введения в мат. модель начальной температуры греющей среды получены полиномиальные уравнения. Для полученных экспериментально данных была построена линия тренда и определено полиномиальное уравнение второго порядка со сходимостью $R=0,9926$.

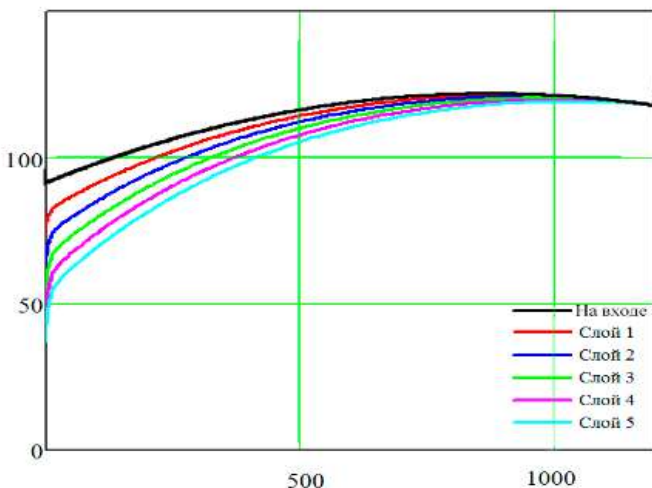


Рис. 3. Изменение температуры греющей среды, результат математического моделирования работы лабораторной установки

На рис. 3 изображены изменение температур во времени на входе в насадку, и после прохождения каждого условно выделенного слоя насадки. Результаты расчета математической модели и результаты, полученные опытным путем, сходятся с достаточной точностью, это позволяет нам сделать вывод о релевантности математической модели.

Литература

1. Начкебия, Н.С. Моделирование температурного поля насадок регенеративных горелок/ Н.С. Начкебия, А.Б. Бирюков, Я.Ю. Асламова // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г: Технические науки. 2024. № 4. С. 218-227.

УДК 621.783.2(043)

Ю.О. ТУРУЛИНА, ст. преподаватель

Донецкий национальный технический университет,
283001, г. Донецк, ул. Артема 58
E-mail: turulinay@mail.ru

Способ модификации алгоритмов управления процессом нагрева металла в проходных печах, работающих в условиях изменяющейся производительности

Аннотация. В работе приведена методика определения температурного профиля и результаты исследования проходной печи, работающей в условиях изменяющейся производительности.

Ключевые слова: проходная печь, температурный профиль, производительность, уравнения регрессии.

Y.O. TURULINA, senior lecturer

Donetsk National Technical University,
283001, Donetsk, Artyoma Street 58
E-mail: turulinay@mail.ru

A method for modifying algorithms for controlling the metal heating process in pass-through furnaces operating under conditions of varying productivity

Abstract. The paper presents a method for determining the temperature profile and the results of a study of a pass-through furnace operating under conditions of varying productivity.

Key words: pass-through furnace, temperature profile, performance, regression equations.

В прокатном производстве особую роль играет подготовка металла перед дальнейшим прокатом, а именно нагрев заготовок в проходных печах. При этом наибольший интерес представляет работа печи в условиях переменной производительности. От выбранного режима нагрева зависит качество получаемого металла и расход топлива. В связи с этим задача определения рациональных технологических параметров, в частности, температурного профиля печи, работающей в условиях изменяющейся производительности, является весьма актуальной.

Вопросу оптимизации процесса нагрева металла в проходных печах при номинальном режиме работы посвящено достаточно много работ [1,2 и др.]. Однако при работе печей, работающих в условиях изменяющейся производительности, не существует универсальных методов проектирования режимов нагрева. В связи с этим, необходимо определять рациональные технологические параметры (температурный профиль печи) для каждого отдельного случая.

В работе [3] предлагается методика определения температурного профиля печи, работающей в условиях пониженной производительности. При этом гарантируется получение заданного теплосодержания металла в конце нагрева.

Температура печи в начале и конце каждой зоны определяется из выражения:

$$t_r = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q}{C_{гкм}} + \left(\frac{t_n + 273}{100}\right)^4} - 273, \quad (1)$$

Где t_r – температура газа в соответствующей зоне печи, °C; q – плотность теплового потока, Вт/м²; $C_{гкм}$ – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м² · К⁴); t_n – температура поверхности металла в соответствующей зоне печи, °C.

В работе [4] предложен новый метод, позволяющий определить температурное состояние металла в процессе его нагрева для заданной продолжительности (соответствующей производительности печи) и температуре в печи.

Температура поверхности заготовки определяется методом последовательных приближений по формуле:

$$t_n = \bar{t} + \frac{q \cdot r_0}{K_2 \cdot \lambda} \cdot \frac{K_3 - 1}{K_3}, \quad (2)$$

где t_n – температура поверхности металла в конце соответствующей зоны печи, °C; $\bar{t}$ – среднемассовая температура металла в конце соответствующей зоны, °C; q – плотность теплового потока в конце соответствующей зоны, Вт/м²; r_0 – толщина прогреваемого слоя, м; λ – коэффициент теплопроводности металла при t_n , Вт/(м·К); K_2 , K_3 – коэффициенты усреднения плотности теплового потока и температуры, соответственно.

Таким образом, достижение требуемого температурного состояния металла осуществляется за счет выбора рационального температурного профиля печи.

Практически реализация полученных результатов исследований выражается в модификации алгоритмов управления процессом, осуществляемого АСУ ТП.

При разработке программного алгоритма для АСУ ТП в качестве примера были произведены расчеты нагрева металла в пятизонной нагревательной печи, работающей в условиях изменяющейся производительности.

Для определения теплового состояния металла в качестве номинального был принят режим нагрева заготовок 150x150 мм при производительности печи 120 т/ч.

Расчеты модифицированных режимов выполнялись для заготовок следующих типоразмеров: 100x100 мм, 120x120 мм и 125x125 мм. Производительность печи варьировалась от 120 т/ч до 40 т/ч с шагом 10 т/ч.

Для обработки результатов использовался регрессионный анализ с применением метода наименьших квадратов (табл. 1).

Таблица 1. Регрессионные уравнения зависимости температуры по зонам печи от производительности и коэффициенты детерминации для различных типов заготовок

Зона	Тип заготовки	Уравнение
Подогревательная	100x100	$t = -0,0167 \cdot P^2 + 6,5135 \cdot P + 501,52$
	120x120	$t = -0,0164 \cdot P^2 + 6,3682 \cdot P + 491,52$
	125x125	$t = -0,0161 \cdot P^2 + 6,31 \cdot P + 490$
Первая сварочная	100x100	$t = -0,0125 \cdot P^2 + 5,7481 \cdot P + 722,63$
	120x120	$t = -0,012 \cdot P^2 + 5,5652 \cdot P + 716,82$
	125x125	$t = -0,0122 \cdot P^2 + 5,5631 \cdot P + 714,33$
Вторая сварочная	100x100	$t = -0,0066 \cdot P^2 + 3,926 \cdot P + 886,93$
	120x120	$t = -0,0063 \cdot P^2 + 3,8076 \cdot P + 883,34$
	125x125	$t = -0,0063 \cdot P^2 + 3,7909 \cdot P + 882,38$
Первая томильная	100x100	$t = -0,0024 \cdot P^2 + 2,2212 \cdot P + 1003,2$
	120x120	$t = -0,0023 \cdot P^2 + 2,154 \cdot P + 1000,9$
	125x125	$t = -0,0024 \cdot P^2 + 2,1476 \cdot P + 1000,3$
Вторая томильная	100x100	$t = -0,0019 \cdot P^2 + 1,3978 \cdot P + 1074,9$
	120x120	$t = -0,0011 \cdot P^2 + 1,2666 \cdot P + 1076,5$
	125x125	$t = -0,0007 \cdot P^2 + 1,1944 \cdot P + 1079,1$

Для уравнений рассчитаны коэффициенты детерминации. Все коэффициенты близки к 1, что свидетельствует о высоком качестве и значимости построенных уравнений.

Литература

1. Парамонов, А.М. Повышение тепловой эффективности и экономичности работы нагревательных печей / А.М. Парамонов, В.В. Крайнов. М.: Спутник+, 2006. 225 с.
2. Панферов, В.И. Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах / В.И. Панферов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. № 2. Т.18. С. 71–80.
3. Бирюков, А.Б. Методика определения температурного профиля методической печи, работающей в условиях пониженной производительности / А. Б. Бирюков, А.Н. Лебедев, Ю.О. Турулина // Сталь. 2017. № 10. С. 74–77.
4. Бирюков, А.Б. Инженерная методика определения температурного состояния металла при его нагреве / А.Б. Бирюков, Ю.О. Турулина // Вестник ИГЭУ. 2024. №. 2. С. 24–31.

УДК 697.3

Н.С. МОЛЬКОВ, аспирант
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент
П.А. ШОМОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34
E-mail: nik-molk@yandex.ru

Повышение энергетической эффективности системы теплоснабжения района на основе прогнозирования класса энергетической эффективности зданий

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы улучшения системы тепло-снабжения района, связанные с задачами эффективного управления использованием теплоносителя конечным потребителем с использованием методов математического моделирования.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, теплоснабжение, тепловые потери, потребление энергии, математическое моделирование.

N.S.MOLKOV, postgraduate
O.B.KOLIBABA, PhD, Associate Professor
P.A.SHOMOV, PhD, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University
34 Rabfakovskaya str., 153003, Ivanovo
E-mail: nik-molk@yandex.ru

Improving the energy efficiency of the district's heat supply system based on forecasting the energy efficiency class of buildings

Annotation. The paper considers the issues of improving the district's heat supply system related to the tasks of effective management of the use of coolant by the end user using mathematical modeling methods.

Keywords: energy efficiency, heat supply, heat losses, energy consumption, mathematical modeling.

За время развития систем централизованного теплоснабжения повышение эффективности достигается путем совершенствования оборудования и схем источников тепла, что влечет за собой применение новых типов оборудования, а, следовательно, ощутимых капиталовложений. Развитие тепловых сетей происходило по пути сокращения затрат на их модернизацию, что привело к использованию не надежных и малоэффективных конструкций теплопроводов. Тепловые потери в магистральных, распределительных, квартальных сетях (через изоляцию и с сетевой водой) достигают более 30 %, при циркуляции сетевой воды на 20–25 % больше необходимой. Во многих европейских странах с хорошо

развитыми системами теплоснабжения потери в сетях составляют 2–10 % [1]. На практике теплоснабжающие организации определяют величину фактических тепловых потерь как разницу между отпущенной и реализованной тепловой энергией. Многолетние наблюдения за показаниями теплосчетчиков, установленных на источниках и у потребителей при осуществлении теплоснабжения по графику 150/70, позволяют сделать вывод о том, что практически не встречаются случаи, когда фактические потери не превышали бы нормативные значения.

Все технические мероприятия для улучшения эффективности работы систем теплоснабжения можно разделить на три группы:

1) мероприятия непосредственно в тепловых сетях (оптимизация диаметров сетей, улучшение теплоизоляционных характеристик, совершенствование схем теплоснабжения);

2) мероприятия на источнике теплоснабжения (оптимизация режимов отпуска тепла, перераспределение мощностей, использование нового генерирующего оборудования);

3) мероприятия в системах теплоснабжения (улучшение характеристик ограждающих конструкций зданий, применение средств КИП и автоматики, доведение показателей режимов до требований нормативных документов, контроль состояния внутренних систем теплоснабжения и ГВС).

Проведению мероприятий в системах теплоснабжения, у конечного потребителя теплоносителя не уделяется должного внимания, не смотря на всю эффективность и потенциальное влияние на систему теплоснабжения всего рассматриваемого объекта (района или целого населенного пункта), при значительно небольших капиталовложениях. Энергосберегающий эффект при таких мероприятиях проявляется в виде снижения расхода и температуры сетевой воды, что выражается в экономии на выработке и транспортировке теплоносителя.

Предлагается производить прогнозирование потребления энергии и на этой основе осуществлять проектирование и конструирование систем теплоснабжения, а не на основе мощности источника теплоснабжения, как это принято на практике. Рассмотрение существующих систем теплоснабжения от потребителя позволит оказать существенное влияние на источник тепла (напр. сокращение расхода топлива на котлы при снижении температуры обратной воды), при значительно меньших капиталовложениях, чем мероприятия, проводимые на источнике теплоснабжения или в тепловых сетях.

Проектирование новых систем теплоснабжения и их санацию (требующих модернизации), предлагается проводить исходя из наличия энергетического паспорта зданий, которые непосредственно являются потребителями тепловой энергии. В случае санации существующих систем при уменьшении расхода теплоносителя в следствии повышения энергоэффективности зданий потребителей возможно уменьшение диаметров существующих трубопровода, снижение существующих

мощностей ТЭЦ. Такой подход позволит соблюдать действующее законодательство, в частности [2], позволит снизить затраты на потребление энергоресурсов потребителей и позволит производить системную оценку энергоэффективности здания. При этом существующая система определения классов энергетической эффективности несовершенна и нуждается в пересмотре и изменении, так как на основании проведенных энергообследований можно констатировать, что здания, построенные в период 1960–1980 годов не соответствуют классам энергоэффективности А-В. К сожалению, вновь возводимые здания также фактически нельзя отнести к классу А и В [3]. Коэффициенты термического сопротивления стен у большинства современных зданий не соответствуют нормативным требованиям и проектной документации.

Для увеличения эффекта влияния энергоэффективности потребителя на систему теплоснабжения в масштабах рассмотрения, в частности района или города, особенно при проектировании и строительстве новых районов и зданий, предлагается использование системного подхода и математического моделирования объекта, который включает в себя использование BIM, BEM и CFD технологий в одном проекте. На практике энергетическое моделирование осуществляется отдельно и не связано с проектированием здания. Использование технологий информационного моделирования (BIM), энергетического моделирования (BEM) и численного моделирования (CFD) на базе одной геометрической модели позволит добиться повышения энергетической эффективности здания, системы вентиляции и микроклимата в них.

В настоящее время собрана статистика по энергетическому потреблению зданий и ведется работа по созданию математической модели для изучения влияния проведения мероприятий по улучшению энергоэффективности жилых и административных зданий на систему теплоснабжения района с возможностью использования результатов исследования и модели на различные районы в зависимости от температуры наружного воздуха.

Литература

1. «Энергоэффективность в России: скрытый резерв» (отчет Всемирного банка). М.: ЦЭНЭФ, 2009. 166 с.
2. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»
3. Н.С. Мольков, О.Б. Колибаба, П.А.Шомов. Методология определения класса энергетической эффективности здания на основе показаний приборов коммерческого учета тепла и электроэнергии – Иваново: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии», т.2, 2023 с. 312-315.

УДК 66.046

Е.В. ГУСЕВ, к.т.н.
А.И. СОКОЛЬСКИЙ, д.т.н.,
А.А. СЕРГИЕНКОВА, соискатель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

Энергетическая способность глинозольного материала в процессе высокотемпературного нагрева

Аннотация. В работе рассмотрена оценка возможности повышения энергетической эффективности глинозольного материала различного состава с использованием видоизменной техногенных золоотвалных отходов гидроудаления Ивановской ТЭС-2 в процессе высокотемпературного нагрева на основе термического анализа.

Ключевые слова: глина, зола гидроудаления, состав, обжиг, температура, потеря массы, ресурсо- и энергосбережение, термический анализ

E.V. GUSEV, Ph.D.
A.I. SOKOLSKY, Doctor of Engineering,
A.A. SERGIENKOVA, applicant

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

Energy capacity of clay-ash material during high-temperature heating

Abstract. The paper examines the possibility of increasing the energy efficiency of clay-ash material of various compositions using modified man-made ash dump waste from hydraulic removal of Ivanovo TPP-2 in the process of high-temperature heating based on thermal analysis.

Key words: clay, hydro-removal ash, composition, firing, temperature, mass loss, resource and energy saving, thermal analysis

Большинство керамических предприятий испытывают трудности с сырьем из-за выработки большей части качественного сырья. В связи с непрерывным возрастающим спросом на стеновые изделия, обладающие меньшей средней плотностью и большей прочностью, использование малопластичных легкоплавких глин и золоотвалов ТЭС в качестве основного сырья является одним из перспективных решений в области ресурсо- и энергосбережения при производстве эффективных керамических материалов [1].

В производстве стеновых керамических изделий стройиндустрии имеется промышленный опыт утилизации техногенных золоотвалных

отходов гидроудаления, используемых в качестве технологической добавки и основного сырья [2-3]. Это обусловлено не только сходством химико-минералогических составов глинистого вещества с золой, наличием свыше 10% остаточного органического твердого топлива (П.П.П. табл.1), но и возможностью повышения энергоэффективности при проведении стадий тепловой обработки (сушки и обжига).

В процессе обжига высушенных керамических материалов протекают фазовые и физико-химические превращения, сопровождающиеся тепловыми эффектами различной природы и массообменом, которые определяют энергетические затраты и качество готовой продукции. Исследование характера этих проявлений способствует разработке рациональных режимов обжига керамического изделий и выбору теплоиспользующего оборудования (печей).

В качестве исследуемого объекта высокотемпературной обработки методом термического анализа использовались: глина Норского месторождения (50–70%) и классифицированная зола гидроудаления ИвТЭС-2 (30–50%), пригодных в соответствии с классификацией Августиника А.И. (по отношению $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 0,1\text{--}0,16$ химического состава) для изготовления строительной керамики (табл.1).

Таблица 1. **Химический состав компонентов глинозольного материала (%)**

Компоненты	SiO_2	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	K_2O	MnO	P_2O_5	SO_3	П.П.П.
Зола	54,16	13,1	9,88	3,23	1,14	—	2,76	—	—	0,18	14,65
Глина	50,64	13,02	5,71	8,39	0,79	4,15	2,46	0,09	0,12	—	11,8

Результаты термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) глинистого вещества и глинозольного материала различного состава представлены на рис. 1 и табл. 2.

Экспериментальные исследования кинетики процесса термического нагрева глинозольного материала различного состава были проведены на установке синхронного термического анализа фирмы NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. Испытания проведены в окислительной среде в интервале температур 20–950°C со скоростью нагрева среды 10°C/мин.

Приведенные экспериментальные данные по термическому нагреву глинозольного материала показывают, что в зоне температур 250–720°C энергетическая эффективность выделения тепла от природной органики в глинах и несгоревшего топлива в золе в период дегидратации и беспламенного горения остаточного твердого топлива возрастает 4–6 раз при потерях массы в 1,7–2,1 раза (табл. 2).

В процессе нагрева в интервале температур 700–950°C усиливается действие карбонатных и железистых включений, что способствует появлению окислительно-восстановительной среды в нагреваемом мате-

риале и дополнительному в нем расплаву, обуславливающие повышение прочностных свойств конечного продукта.

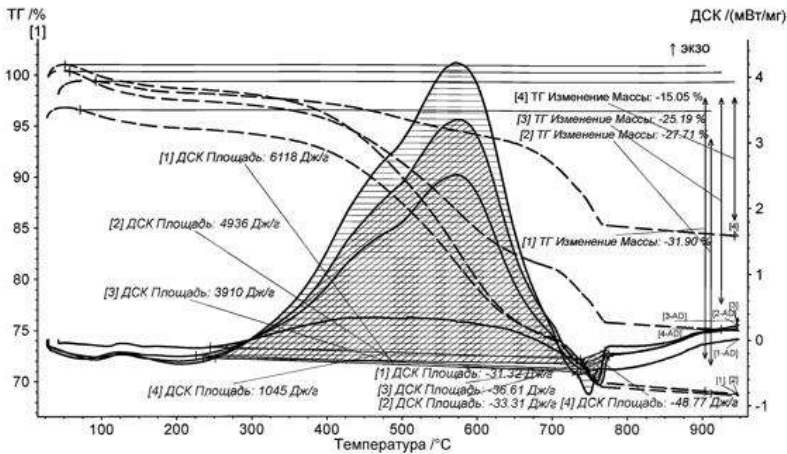


Рис. 1. Термограмма и дериватограмма глинозольного материала различного состава (%): 1 – Г:З=50:50; 2 – Г:З=60:40; 3 – Г:З=70:30; 4 – Г:З=100:0

Таблица 2. Экспериментально-расчетные данные термического анализа

Состав материала %	Потери массы %	Эндотермическая теплота кДж/кг	Экзотермическая теплота кДж/кг	Экзотермическая теплота на усл. т. %
Г:З=100:0	15,05	48,8	1045	3,5
Г:З=70:30	25,19	36,6	3910	13,3
Г:З=60:40	27,71	33,3	4936	16,8
Г:З=50:50	31,90	31,3	6118	20,9

Появление внутреннего теплового источника при обжиге глинозольного материала способствует снижению перепада температур между его внутренними и поверхностными слоями, неравномерности проявления деформационных изменений по объему, что приводит к повышению темпа нагрева, экономии энергетических ресурсов и качественных характеристик продукции [3].

В результате термического анализа исследуемого глинозольного материала различного состава выявлено повышение теплоэнергоэффективности при обжиге на нагревательной стадии в пересчете на условное топливо составляет от 3,5% до 20,9% с ростом содержания золы от 0 до 50 % (табл. 2).

Литература

1. Волженский А.В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / А.В. Волженский, И.А. Иванов, Б.Н. Виноградов. М.: Стройиздат, 1984. 255 с.

2. Сайбулатов С.Ж. Ресурсосберегающая технология керамического кирпича на основе зол ТЭС / С.Ж. Сайбулатов. М.: Стройиздат, 1990. 248 с.

3. Сайбулатов С.Ж. Золой ТЭС в производстве строительной керамики / С.Ж. Сайбулатов, С.Т. Сулейменов, М. Кулбеков. Алма-Ата: Казахстан, 1986. 260 с.

УДК 66.047

Е.В. ГУСЕВ, к.т.н.,
В.Г. ПАК, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

К вопросу интенсификации процесса сушки листового шпона

Аннотация. В работе рассмотрены основные пути интенсификации сушки тонко-листового шпона при конвективном подводе теплоты за счет режимных параметров теплоносителя и анализа проявления анизотропных свойств материала.

Ключевые слова: шпон, сушка, температура, скорость, усадка, коробление

E.V. GUSEV, Ph.D.,
V.G. PAK, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

On the issue of intensifying the drying process of sheet veneer

Abstract. The paper examines the main ways of intensifying the drying of thin-sheet veneer with convective heat supply due to the operating parameters of the heat carrier and the analysis of the manifestation of the anisotropic properties of the material

Key words: veneer, drying, temperature, speed, shrinkage, warping

Одним из важнейших этапов технологического процесса получения листовых и рулонных материалов (фибра, картон, шпон, ткани и им подобных) является сушка, в значительной мере определяющей качество продукта. Проектирование и выбор сушильного агрегата связаны с кинетическими закономерностями сушки с учетом усадочных изменений и анизотропии свойств высушиваемого материала.

Одним из направлений интенсификации процесса конвективной сушки листового шпона является исследование кинетики термовлажностных и гидродинамических параметров с выбором оптимальных режимных условий термообработки [1].

В качестве исследуемого объекта тепловой обработки используется тонкий листовый шпон размером $100 \times 50 \times 1$ мм хвойных пород древесины, применяемый в производстве фанеры и отделке мебели.

Процесс тепловой обработки листовых образцов осуществлялся в сушильной камере с замкнутой рециркуляцией сушильного агента при различных режимах сушки в условиях двухстороннего продольного обтекания высушиваемого материала.

Комплекс полученных экспериментальных данных по кинетике сушки (кривые сушки и температурные кривые) листовых образцов шпона при изменении их влагосодержания в диапазоне $160 \pm 0\%$ в условиях симметричного обдува материала теплоносителем при различных его параметрах (температура – $t_c = 80 \div 150^\circ\text{C}$, скорости $v_c = 1,5 \div 3$ м/с, относительной влажности 5%) приведены на рис. 1–2.

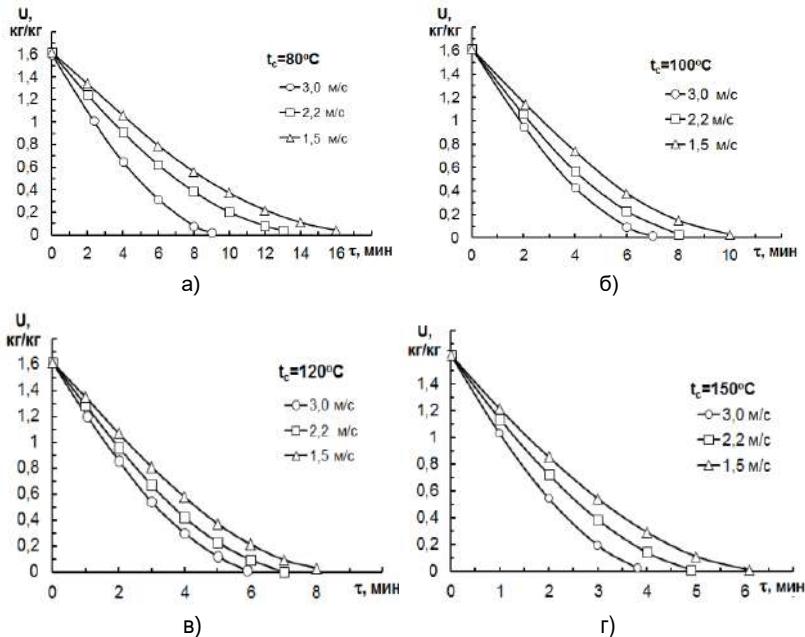


Рис.1. Кривые сушки листового шпона при различных температурах (t_c) и скоростях воздуха ($1,5 \div 3$ м/с): а – $t_c = 80^\circ\text{C}$; б – $t_c = 100^\circ\text{C}$; в – $t_c = 120^\circ\text{C}$; г – $t_c = 150^\circ\text{C}$

В процессе сушки помимо удаления влаги из листового шпона протекают деформационные усадочные изменения с разной интенсивностью по геометрическим параметрам, особенно существенно по ширине листа (В), что говорит об анизотропии свойств и возможности проявления коробления материала. Изменение ширины высушиваемого листа и

коэффициент усадки при различных температурах воздуха показывает тесную взаимосвязь с влагосодержанием материала и интенсивностью сушки (рис. 3).

В процессе сушки помимо удаления влаги из листового шпона протекают деформационные усадочные изменения с разной интенсивностью по геометрическим параметрам, особенно существенно по ширине листа (B), что говорит об анизотропии свойств и возможности проявления коробления материала. Изменение ширины высушиваемого листа и коэффициент усадки при различных температурах воздуха показывает тесную взаимосвязь с влагосодержанием материала и интенсивностью сушки (рис. 3).

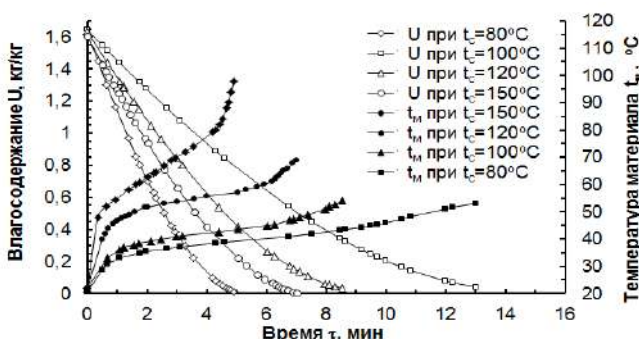


Рис. 2. Термовлажностные кривые сушки листового шпона при различных температурах воздуха и его скорости 2,2 м/с

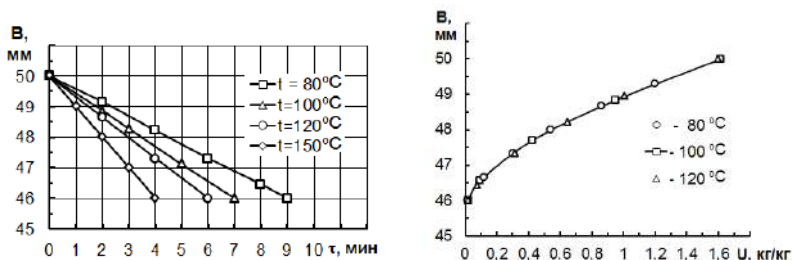


Рис. 3. Кривые усадочных изменений по ширине листового шпона при различных температурах воздуха при скорости теплоносителя 3 м/с.

Процесс усадки по ширине листа можно рассчитать по выражению:

$$B = B_0(1 + \beta_{\text{ш}}U), \quad (1)$$

где $B_0 = 46$ мм – ширина сухого образца, $\beta_{\text{ш}}$ – коэффициент линейной усадки по ширине (поперек волокон) шпона, $\beta_{\text{ш}} = -0,0262 \ln(U) + 0,065$.

По кинетическим закономерностям образцов листового шпона установлено, что с увеличением температуры и скорости теплоносителя интенсивность обезвоживания материала повышается и продолжительность термообработки существенно сокращается с повышением температуры от 80 до 150°C в среднем на 60%, а с ростом скорости воздуха от 1,5 до 3 м/с на 30÷40% (рис. 1–2).

Процесс усадки по ширине листа можно рассчитать по выражению:

$$B = B_0(1 + \beta_{\text{ш}}U), \quad (1)$$

где $B_0 = 46$ мм – ширина сухого образца, $\beta_{\text{ш}}$ – коэффициент линейной усадки по ширине (поперек волокон) шпона, $\beta_{\text{ш}} = -0,0262 \ln(U) + 0,065$.

По кинетическим закономерностям образцов листового шпона установлено, что с увеличением температуры и скорости теплоносителя интенсивность обезвоживания материала повышается и продолжительность термообработки существенно сокращается с повышением температуры от 80 до 150°C в среднем на 60%, а с ростом скорости воздуха от 1,5 до 3 м/с на 30÷40% (рис. 1–2).

Различная интенсивность усадочных изменений по геометрическим параметрам листа, особенно существенно по ширине (поперек волокон) в сравнение с незначительным изменением по длине (вдоль волокон) говорит о возможности проявления коробления (изменения формы - прогиба) и снижения качества высушиваемого материала.

На основе анализа полученных экспериментальных данных по кинетики сушки и поведения листового шпона в процессе сушки можно сделать предположение, что необходимо применять более низкую температуру сушильного агента и существенно повысить интенсивность теплообмена за счет роста скорости теплоносителя.

Литература

1. Стерлин Д.М. сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит/ Д.М. Стерлин. М: Лесная промышленность, 1977. 384 с.

УДК 536.3:66.041.45

О.Ю. КУЛЕШОВ, д.т.н., профессор
А.А. ОВЧИННИКОВ, соискатель
В.А. ОЧЕРЕТИН, магистрант

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: o-yu-kul@yandex.ru

Повышение равномерности теплоподвода в вертикальной цилиндрической трубчатой печи с центральным рассекателем-распределителем

Аннотация. Проведено расчетное исследование теплообмена в вертикальной цилиндрической трубчатой печи нефтепереработки типа ЦД4 с подовыми

горелками и центральным рассекателем-распределителем при двухступенчатом подводе воздуха на горение.

Ключевые слова: цилиндрическая трубчатая печь, подовые горелки, рассекатель-распределитель, расчетное исследование теплообмена

O.YU. KULESHOV, Doctor of Technical Sciences, Professor

A.A. OVCHINNIKOV, applicant

V.A. OCHERETIN, Master's student

Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

410054, Saratov, Politechnicheskaya str., 77

E-mail: o-yu-kul@yandex.ru

Increasing the uniformity of heat supply in a vertical cylindrical tube furnace with a central divider-distributor

Abstract. Calculation investigation of heat exchange in a vertical cylindrical tubular oil refining furnace of the CD4 type with bottom burners and a central divider-distributor with a two-stage air supply for combustion is carried out.

Key words: cylindrical tube furnace, bottom burners, divider-distributor, calculation investigation of heat exchange

Вертикальные цилиндрические трубчатые печи (типа ЦД4) с центральным рассекателем-распределителем, на грани которого настилаются факелы подовых горелок, разработаны институтом ВНИИНЕФТЕМАШ и получили широкое распространение в нефтеперерабатывающей промышленности благодаря компактности и большой тепловой мощности до 34,1 МВт [1].

Конструкция печи, представленная на рис. 1, позволяет регулировать выгорание топлива в настильных диффузионных факелах за счет двухступенчатого подвода воздуха. Первичный воздух подается через диффузионные подовые горелки. Вторичный воздух подается через отверстия в верхней части полого рассекателя-распределителя (в дальнейшем просто рассекателя). При подаче существенно большей части воздуха, идущего на горение, через подовые горелки развиваются факелы, длины которых равны высоте настильных стенок рассекателя. Вторичный воздух в этом случае идет просто на дожигание.

Рассекатель занимает только половину высоты радиационной камеры печи. Поскольку основная часть теплового потока передается к трудным экранам путем излучения от горящих факелов и настильных стенок рассекателя, то профиль плотности тепловых потоков (теплонпряжений) по высоте получается сильно неравномерным. Для выравнивания профиля теплонпряжений необходимо увеличение длины факелов существенно выше рассекателя. Для этого нужна организация полноценного двухступенчатого сжигания топлива за счет перераспределения воздуха, идущего на горение, в пользу увеличения доли вторичного воздуха, подаваемого через верхнюю часть рассекателя. Практическая реализация этого предложения является сложной задачей.

Поэтому требуется расчетно-теоретический анализ процессов в радиационной камере печи на основе методов расчета детальных характеристик факельного горения газообразного или жидкого топлива и сложного теплообмена в распределенных системах.

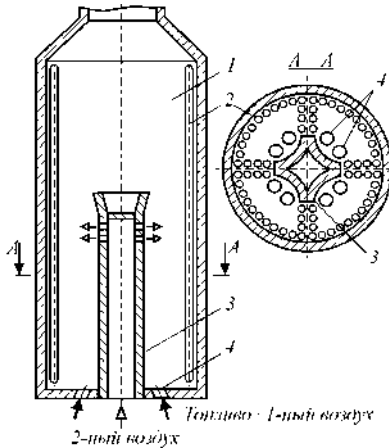


Рис. 1. Конструктивная схема печи ЦД4:
1 – радиационная камера; 2 – трубный экран; 3 – рассекатель-распределитель; 4 – горелки

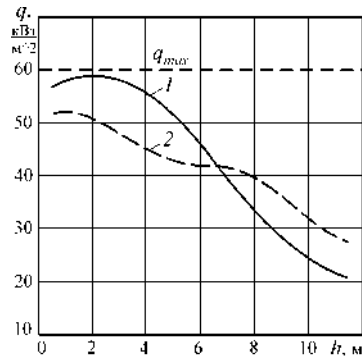


Рис. 2. Распределение теплонпряжений по высоте труб:
1 – доля 1-го воздуха 100%; 2 – доля 1-го воздуха 60%, 2-го воздуха 40%

Для расчетного анализа сложного теплообмена использован зональный метод теплового расчета трубчатых печей, разработанный в работах авторов [2], совместно с полуэмпирическим методом расчета факельного горения газообразного топлива [3].

Для проведения зонального расчета рабочее пространство радиационной камеры печи было разбито на характерные зоны, в пределах которых температуру, радиационные и другие теплофизические свойства сред и поверхностей можно считать постоянными. Рассматривалась трехмерная расчетная область, которая представляет собой 1/2 одной секторальной части цилиндрической топки, ограниченную двумя плоскостями симметрии, проходящими в радиальных направлениях – с одной стороны между рядами радиального экрана, а с другой стороны между двумя подовыми горелками. Всего было выделено 82 зоны, включая объемные зоны факела и продуктов сгорания, а также поверхностные зоны трубного экрана, кладки и фиктивных ограждающих поверхностей, создающих замкнутую излучающую систему (зеркальные зоны в плоскостях симметрии, поверхностная зона, закрывающая выходное отверстие топки).

В рамках зонального подхода радиационные тепловые потоки меж-

ду зонами определяются на основе разрешающих обобщенных угловых коэффициентов (РОУК), которые учитывают поглощение и отражение (при необходимости также рассеивание) излучения в объемных и поверхностных зонах. Для определения РОУК применен численный метод вероятностно-статистического моделирования излучения в многозонных системах, реализованный в виде универсальной методики и программы расчета для ПК. РОУК слабо зависят от температуры. Поэтому моделируются они только один раз для начального приближения поля температур в зональной расчетной области, а затем могут просто корректироваться в ходе итерационного решения тепловой задачи.

При известных РОУК определение температур и тепловых потоков для зон расчетной области проводится простым решением системы алгебраических уравнений тепловых балансов зон, которые включают в себя все составляющие теплопереноса – радиационный, конвективный тепловые потоки и внутреннее тепловыделение в объемных зонах за счет горения топлива в факеле.

В зональном методе широко используются эмпирические методы расчета отдельных характеристик топочных процессов, что делает общий метод эффективным, относительно простым и позволяет решать сложные многофакторные задачи с достаточно высокой точностью.

Проведено расчетное исследование факельного горения и сложного теплообмена в типовой цилиндрической трубчатой печи ЦД4 (рис.1). Подробное описание конструкции печи приводится в каталоге [1]. Расчеты выполнены для условий работы конкретной печи, работающей на установке АВТ-6 НПЗ и служащей для нагрева и частичного испарения нефти перед разделительными колоннами. В качестве топлива используется нефтезаводской газ с теплотой сгорания $Q_{н}^p = 84870 \text{ кДж/м}^3$.

Расчетное исследование проведено для различных соотношений первичного и вторичного воздуха, подаваемого на горение. В базовом варианте расчета доля первичного воздуха, подаваемого через горелки, составляла 100%. При других вариантах через верхнюю часть раскателя подавалось определенное количество вторичного воздуха, позволяющее осуществлять двухступенчатое сжигание топлива и таким образом управлять процессом факельного горения.

Результаты исследования представлены на рис. 2 в виде графической зависимости средних в сечении теплонапряжений экранных труб от высоты радиационной камеры печи. Для базового варианта теплоподвода (рис. 2, кривая 1) характерно быстрое достижение максимума теплонапряжений экрана в нижней части топки и далее интенсивное снижение, так что верхняя часть экранных труб работает не эффективно – максимальная плотность теплового потока превышает наименьшее значения в 3 раза.

На основании проведенных расчетов установлено, что с увеличением доли вторичного воздуха увеличиваются длины факелов и соответственно равномерность теплоподвода к экранным трубам. Оптималь-

ным является вариант, когда доля первичного воздуха составляет 60%, а вторичного воздуха – 40%. При меньшей доле вторичного воздуха по сравнению с оптимальным вариантом влияние удлинения факела было менее выраженным. При большей доле вторичного воздуха нарушается стабильность факельного горения топливного газа и возрастает химический недожег. Из графика (рис. 2, кривая 2) видно, что при оптимальном варианте максимальную плотность теплового потока к экранным трубам в нижней части удалось существенно снизить и повысить теплонапряжение экрана в верхней части топки. При этом тепловая нагрузка на радиационную секцию печи составляет 21 МВт при среднем теплонапряжении экрана 42,0 кВт/м².

На основе анализа результатов зонального расчета предложено увеличить теплопроизводительность рассматриваемой печи на 20% при оптимальном соотношении первичного и вторичного воздуха, подаваемого на горение, без превышения максимально допустимого теплонапряжения экранных труб – $q_{max} = 60$ кВт/м². При этом тепловая нагрузка на радиационную секцию печи возрастает до 25,2 МВт при среднем теплонапряжении экрана 50,0 кВт/м².

Литература

1. Трубчатые печи: каталог / ВНИИНЕФТЕМАШ. М., 1990. 31 с.
2. Кулешов О.Ю., Седелкин В.М. Зональная математическая модель и методика расчета сопряженного теплообмена в радиантной секции трубчатых печей // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №1(52), Вып. 1. С. 181–187.
3. Кулешов О.Ю., Седелкин В.М., Ершов Е.С. Полуэмпирический метод расчета характеристик диффузионных газовых факелов в промышленных печах // Проблемы теплоэнергетики. Сб. науч. трудов XII Международной научно-технической конференции. Саратов, 2014. С. 394–397.

УДК. 62-65

В.Ю. СОКОЛОВ¹, к.т.н, доцент

А.П. КОЗЛОВЦЕВ¹, д.т.н., профессор

С.О. КАЛЕТИН², исп. директор ООО «Олимп»

¹ Оренбургский государственный университет.

460014, г. Оренбург, пр. Победы 13

² ООО «Олимп»

460052, г. Оренбург, ул Автомобилистов 37/1

E-mail: teploosu@mail.ru, ap_kozlovcev@mail.ru, info@air-olimp.ru

Теплонасосная установка для систем жизнеобеспечения

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы применения теплонасосной установки, обеспечивающей фильтрацию подаваемого и откачиваемого воздуха, в условиях холодного периода года – нагрев и в условиях высоких темпе-

ратур – охлаждения (кондиционирования) в быстровозводимом пневмокаркасном модуле. Представлена экспериментальная конструкция теплонасосной установки.

Ключевые слова: теплонасосная установка, отопление, кондиционирование, фильтрация воздуха, автономность.

V.Y. SOKOLOV¹ Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
A.P. KOZLOVTSEV¹, Doctor of Technical Sciences, Professor
S.O. KALETIN² Executive Director of Olymp LLC

¹ Orenburg State University.

460014, Orenburg, 13, Pobedy ave.

² Orenburg State University

460052, Orenburg, Avtomobilistov St., 37/1

E-mail: teploosu@mail.ru, ap_kozlovceb@mail.ru, info@air-olimp.ru

Heat pump installation for life support systems

Annotation. The paper considers the issues of using a heat pump system that provides filtration of supplied and pumped air, heating in the cold season, and cooling (air conditioning) in a prefabricated pneumatic frame module at high temperatures. An experimental design of a heat pump installation is presented.

Keywords. Heat pump system, heating, air conditioning, air filtration, autonomy.

Необходимость в использовании автономных систем тепло- и холодоснабжения в последнее время значительно расширяется. Существующие современные модели, функционирующие на основе использования традиционных источников энергии, обеспечивают высокую экономическую эффективность. Однако при условии эксплуатации в суровых климатических условиях не всегда имеется возможность обеспечения подвода жидкого или газообразного топлива для работы данных автономных систем. В таких случаях перспективно применять системы отопления и кондиционирования на основе тепловых насосов (ТН), обладающих высокими экологическими показателями [1].

Учитывая уникальные характеристики данного вида оборудования, высокий энергосберегающий эффект и безопасность при эксплуатации, спектр применения ТН постоянно растёт. Опыт использования подтверждает и стимулирует востребованность инновационной технологии, которая обеспечивает минимизацию расходов на содержание объектов, повышает уровень комфорта для потребителей и выводит на принципиально новый уровень их обслуживание [2, 3].

Одним из вариантов применения ТН, изучаемой нами в работе, предлагается ее размещение в переносной мобильной лаборатории, предназначенной для использования, например, в случаях ЧС.

Для автономного проведения лабораторных исследований методами экспресс и ускоренной диагностики и секвенирования разработана переносная мобильная лаборатория (ПМЛ), представляющая собой лабораторную базу с комплектом оборудования. ПМЛ изготовлена на

базе быстровозводимой пневмокаркасной конструкции, которая упаковывается и транспортируется любыми видами транспорта.

Для данной лаборатории, дополнительно к основному функционалу, нами решены вопросы обеспечения комфортного жизнеобеспечения обслуживающего персонала, которое заключается в организации систем кондиционирования, отопления и фильтрации воздуха в зависимости от условий работы. Отличительной особенностью предлагаемой системы является то, что она представлена единым модулем, позволяющим максимально уменьшить общие габаритные размеры по сравнению с тремя отдельными модулями (кондиционер, тепловая пушка и система фильтров), удобством транспортировки и снижением веса. Общий вид предлагаемой теплонасосной установки представлен на рис. 1.

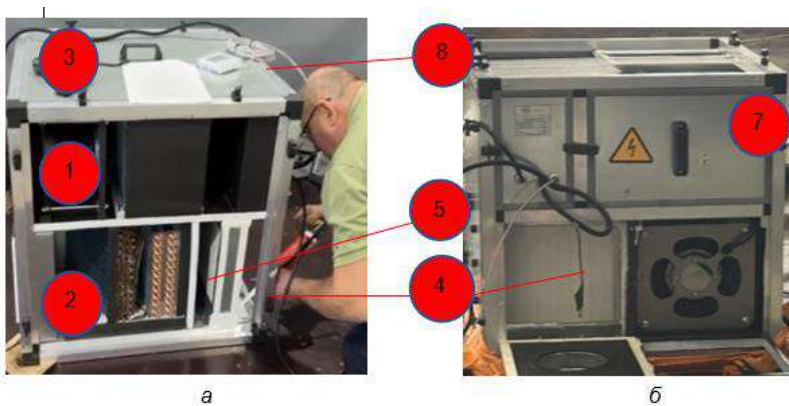


Рис. 1. Общий вид теплонасосной установки: а – вид спереди, б – вид сбоку.

1 - приточный модуль; 2 - вытяжной модуль, 3 - модуль кондиционирования воздуха; 4 - фильтры очистки воздуха, 5 – медно-алюминиевые теплообменники, 6 - шкаф управления с элементами автоматики и программным обеспечением, 7 - оборудование контроля и индикации давления

Разработанная система вентиляции и кондиционирования ПМЛ соответствует требованиям СанПиН 3.3686-21 [4] и обеспечивает поддержание положительных температур при всех регламентированных температурных условиях эксплуатации лаборатории. Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздушной среде лаборатории должна соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.005-88 и ГН 2.2.5.1313-03 [5, 6].

В помещении лаборатории, по регламентированным условиям, требуется обеспечить и поддерживать отрицательный баланс между приточной и вытяжной вентиляцией в автоматическом режиме (минус 50 Па). В связи с этим система вентиляции выбрана приточно-вытяжной, с механическим побуждением тяги при разнице температур окружающего

воздуха от 0 до +35⁰С с поддержанием температуры в лабораторном помещении 22 ±2⁰С.

Предлагаемая система вентиляции так же обеспечивает обеззараживание удаляемого из рабочего помещения воздуха путем оснащения системы вытяжной вентиляции высокоэффективными фильтрами очистки воздуха класса не менее Н14, кратность воздухообмена в рабочем помещении – не менее 5 об/час, направление воздушных потоков к вытяжному фильтру, предварительную двухступенчатую очистку подаваемого в приточную систему воздуха на фильтрах класса 3 и 7 соответственно, очистку подаваемого в рабочее помещение воздуха на фильтре класса «Нера 14» и обеспечение защиты от попадания ПБА в окружающую среду через систему притока воздуха в случае возникновения аварийной ситуации фильтром класса «Нера 14».

Заданная температура в помещении лаборатории поддерживается в тёплый период за счёт рециркуляции воздуха через фреоновый воздухоохладитель системы притока. В холодный период - воздух подогревается встроенными тэнами, которые в случае недостатка питания могут быть отключены оператором. Перед выбросом в окружающую среду вытяжной воздух подвергается очистке в фильтре.

Конструктивное исполнение вентиляционных блоков реализовано за счёт лёгкого алюминиевого профиля, соединённого угловыми элементами, и теплозвукоизоляционных, трёхслойных сэндвич-панелей с лёгким пенополиуретановым наполнителем, эффективно снижающим шум и тепловые потери, а также придающим корпусу большую прочность и жёсткость по сравнению, например, с минеральной ватой.

Визуальный контроль за величиной разрежения внутри и снаружи лабораторного помещения осуществляется дифманометром. Схема автоматизации предусматривает минимальное участие человека в процессе управления климатической системой, которая сводится к начальной установке значений регулируемых параметров и контролю режима её работы. Система оснащена набором датчиков температуры, которые воспринимают изменение и в зависимости от этого микропроцессоры генерируют соответствующие управляющие сигналы. Система автоматически поддерживает заданную температуру воздуха внутри лаборатории путём изменения температуры подаваемого воздуха.

Фильтры системы оснащены датчиками засорения, которые включают индикаторные лампы при достижении их засорения предельных значений. При засорении фильтров датчики-преобразователи дифференциального давления, установленные в системе, фиксируют снижение напора и дают сигнал на изменение скорости вращения вентиляторов. Системой предусматривается автоматическое переключение вытяжной вентиляции на источник бесперебойного питания при отключении электричества.

Предложенная система теплонасосной установки обладает рядом преимуществ, к которым можно отнести:

- экономичность;
- универсальность;
- автономность.

Литература

1. Соколов, В.Ю. Проект ЦТП предназначенного для рационального и экономичного распределения тепловой энергии в системах отопления, горячего водоснабжения, вентиляции производственных и административно-бытовых зданий / В.Ю. Соколов, Е.Г. Васянин, А.П. Козловцев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: Сб. материалов Всероссийской науч.-метод. конф. Оренбург, 26–27 января 2022 года. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2022. С. 1180–1184. EDN DOUTZY.
2. Осипов А. // Тепловые насосы на социальных объектах. Научная статья. 2015, №4(160).С. 68-69.
3. Система аккумулирования природного холода с тепловым насосом / А.П. Козловцев, В.В. Кононец, Д.А. Смаль, Е.Е. Деденева // Национальные приоритеты развития агропромышленного комплекса: материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, Оренбург, 15 ноября 2024 года. Оренбург: Оренбургский гос. аграрный ун-т, 2024. С. 115-119. EDN DHOSFD.
4. СанПиН 3.3686-21. Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней. <https://docs.cntd.ru/document/573660140#65801P>.
5. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением №1).
6. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

УДК 66.047

Е.В. ГУСЕВ¹, к.т.н., доцент,
Н.А. НАБОЙЩИКОВА², преподаватель

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России
153040 г. Иваново, пр-кт. Строителей 33
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

Сорбционно-массопроводные свойства полимерных фенопластовых композитов

Аннотация: рассмотрен подход к определению сорбционно-массопроводных свойств полимерных фенопластовых композитов в условиях термодинамического равновесия на основе экспериментально снятых кривых сорбции

Ключевые слова: композит, сорбция, влагосодержание, массопроводность, диффузия, интенсивность, механизм массопереноса

E.V. GUSEV¹, Ph.D.,
N.A. NABOYSHCHIKOVA², Teacher

¹ Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34

² Ivanovo Fire and Rescue Academy
153040, Ivanovo, Stroiteley Ave., 33

E-mail: gusev_pcm@mail.ru

Sorption and mass conductivity properties of polymer phenolic composites

Abstract: An approach to determining the sorption-mass-conductivity properties of polymer phenolic composites under conditions of thermodynamic equilibrium based on experimentally recorded sorption curves is considered

Key words: composite, sorption, moisture content, mass conductivity, diffusion, intensity, mass transfer mechanism

Интенсивность перемещения влаги внутри пористого материала связана с диффузионным сопротивлением миграции связанной влаги в виде жидкости и пара, механизмами ее массопереноса и геометрическими характеристиками внутрипористой структуры влажного тела.

Одним из способов определения сорбционно-структурных данных капиллярно-пористых материалов является термодинамический (адсорбционный), основанный на получении экспериментальных кривых сорбции в условиях термодинамического равновесия [1-2].

Кривую сорбции, отражающую зависимость равновесного влагосодержания U_p от относительной влажности воздуха ϕ , получают экспериментальным путем в течение продолжительного времени (2-3 месяца) до установления равенства химических потенциалов (влагосодержаний) в пористом теле и воздухе при температуре $20\pm 22^\circ\text{C}$ в стеклянных эксикаторах. Относительные влажности воздуха создавались при помощи различных концентраций серной кислоты, которым на ее поверхности соответствует заданная насыщенность водяным паром воздуха.

По характеру проявления кривых сорбции можно количественно и качественно оценить не только сорбционно-структурные характеристики, но виды связи влаги с материалом и механизмы ее переноса.

Об интенсивности и механизмах массопереноса в капиллярно-пористом влажном теле можно судить по величине эффективного коэффициента массопроводности $K_{эф}$, включающий в себя совмещенный массоперенос влаги в виде жидкости и пара [1-2].

В качестве объекта исследования использовались фенопластовые образцы, полученные на основе твердых резольных и новолачных фенолоформальдегидных олигомеров (СФ342, СФ010) и дисперсно-волоконистых отходов целлюлозно-бумажной фибры с 50% наполнением, а также различных добавок различного назначения [3].

На рис.1 приведены кривые сорбции для фенопластовых композитов, полученных на различных фенолоформальдегидных олигомерах.

Величину эффективного коэффициента массопроводности $K_{эф}$, являющуюся суммой коэффициентов диффузии K_n пара и капиллярной конденсации $K_ж$, в процессе взаимодействия материала с влажной средой в условиях термодинамического равновесия можно рассчитать по параметрам кривой сорбции по выражениям [1-2]:

$$K_n = \frac{M_n D_n (1 - \omega) p_{нас}}{\rho_o R T d \bar{U} / d \varphi}; \quad (1)$$

$$K_ж = \frac{\sigma^2 M_n}{2 \eta_ж \rho_o R T} \cdot \frac{\int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \frac{d \bar{U}}{d \varphi} (\ell n \varphi)^{-2} d \varphi}{\varphi d \bar{U} / d \varphi}, \quad (2)$$

где M_n – молекулярная масса водяного пара, кг/кмоль; $(1 - \omega)$ – характеризует долю свободных от жидкости пор; $p_{нас}$ – давление насыщенного водяного пара; D_n – коэффициент поверхностной молекулярной диффузии в порах определялся по выражению [2]

$$D_n = \frac{2,17 \cdot 10^{-5}}{p_T} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,88}; \quad (4)$$

p_T – давление парогазовой смеси в порах во время опыта, атм; σ – поверхностное натяжение, Н/м; ρ_o – плотность сухого материала, $\rho_o = 1400$ кг/м³; T – температура парогазовой смеси, К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); $\eta_ж$ – вязкость жидкости, м²/с.

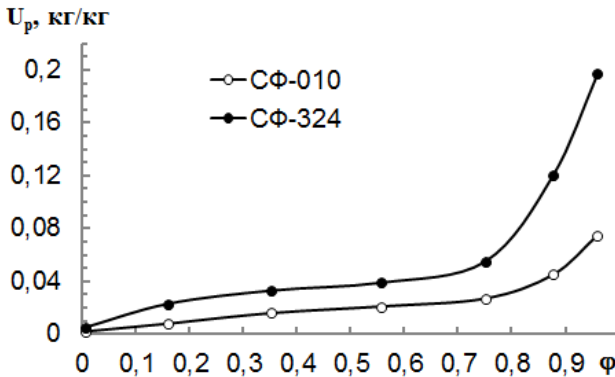


Рис. 1. Кривые сорбции фенопластовых композитов на различных полимерных олигомерах

Результаты по определению эффективного коэффициента массопроводности от влагосодержания материала приведены на рис. 2.

Характер проявления полученных закономерностей (рис.1-2) показывает преобладание наличия адсорбционно-связанной связи влаги с материалом ($\varphi = 0,1 \pm 0,75$) при низких его влагосодержаниях ($U = 0,02 \pm 0,06$), создающей внутри пористого тела большое диффузионное сопротивление внутренней миграции влаги. Низкая интенсивность массопереноса (рис.2) влаги в теле свидетельствует о хорошей водостойкости фенопластовых композитов.

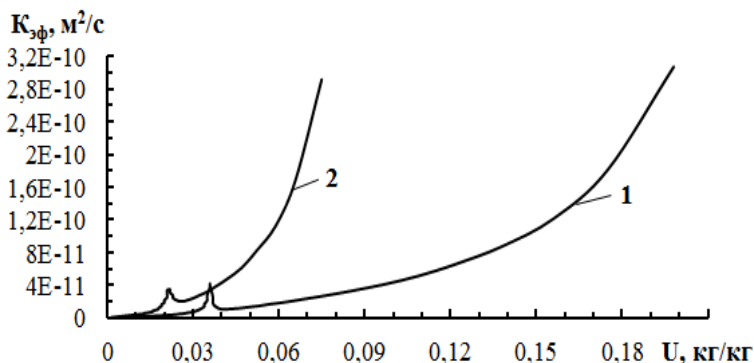


Рис. 2. Зависимость эффективного коэффициента массопроводности от влагосодержания материала: 1 – СФ342; 2 – СФ010

Практической значимостью полученных данных является установление термодинамических условий эксплуатации и хранения полимерных композитов.

Литература

1. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
2. Гусев Е.В., Сокольский А.И., Сергиенкова А.А., Шуина Е.А. Массопроводность дисперсных и листовых материалов в условиях термодинамического равновесия. Вестник ИГЭУ: Журнал. Иваново: ООО «ПресСто», 2023, №6. С.38-42.
3. Гусев Е.В., Набойщикова Н.А., Агеева Т.А., Колобов М.Ю. Разработка и получение фенопластовых композитов машиностроительного назначения. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2024. Т. 67. Вып. 9. С. 82-89.

СЕКЦИЯ 12.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.165

М.Д.ФОМИЧЕВ, аспирант
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор
С.Д. ГОРШЕНИН, к.т.н., доцент, зав. кафедрой

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: zhukov-home@yandex.ru,

Исследование влияния скорости ветра на распределение воздушных потоков и эффективность теплообмена в градирне

Аннотация. В работе представлено комплексное исследование влияния скорости и направления ветра на эффективность работы башенной градирни. Исследование выполнено в два этапа: сначала проведена оценка скоростей внешнего обтекания градирни с учетом направления и скорости ветра, что позволило оценить профиль давления и граничные условия для внутренней области градирни и выполнить расчет поля скоростей воздуха внутри градирни. Исследование выявило существенные неравномерности в распределении давления и скоростей воздуха внутри градирни, что снижает эффективность теплообмена между охлаждаемой водой и воздухом. На основании результатов проведенных исследований предложены рекомендации для повышения эффективности теплообмена и надежности работы системы при различных направлениях и скоростях ветра.

Ключевые слова: башенная градирня, направление и скорость ветра, CFD моделирование, поле скоростей, эффективность теплообмена.

M.D. FOMICHEV, postgraduate student
V.P. ZHUKOV, doctor of Engineering, professor
S.D. GORSHENIN, Candidate of Technical Sciences, head of the Department

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Study of the influence of wind on air flow distribution and heat exchange efficiency in a cooling tower

Abstract. The paper presents a comprehensive study of the influence of wind speed and direction on the efficiency of a chimney cooling tower. The study was carried out in two stages: first, the velocities of the external flow around the cooling tower were assessed taking into account the wind direction and speed, which made it possible to estimate the pressure profile and boundary conditions for the internal area of the cooling tower and calculate the air velocity field inside the cooling tower. The

study revealed significant unevenness in the distribution of pressure and air velocities inside the cooling tower, which reduces the efficiency of heat exchange between the cooled water and air. Based on the results of the studies, recommendations are proposed to improve the efficiency of heat exchange and the reliability of the system at various wind speeds and directions.

Key words: cooling tower, wind direction and speed, CFD modeling, air flow distribution, pressure profile, heat exchange efficiency.

Башенные градирни представляют собой ключевые элементы систем оборотного охлаждения (СОО) на ТЭС и АЭС. Они обеспечивают охлаждение циркуляционной воды восходящими потоками воздуха. Ранее [1-6] установлено, что неравномерное распределение воды и воздуха в поперечном сечении градирни существенно ухудшает теплообмен, что приводит к повышению температуры охлаждающей воды и, как следствие, к повышению давления пара в конденсаторе турбины и снижению экономичности работы энергетического блока. Таким образом, оценка влияния скорости и направления ветра на неравномерное распределение потоков воздуха в поперечном сечении градирни и определение возможных способов устранения этой неравномерности для повышения экономичности блока является актуальной темой исследования.

В качестве объекта исследования выбрана градирня с площадью орошения 4000 м². Анализ влияния направления и скорости ветра на распределение воздушных потоков внутри градирни проводится в два этапа с использованием пакета ANSYS [7-8]. На первом этапе с учетом направления и скорости ветра моделировалась внешняя расчетная область (enclosure) снаружи градирни с целью определения граничных условий для внутренней области. При этом в качестве исходных данных задавались давление или направление и скорость воздуха. Окна градирни в этой постановке моделируются как внутренние интерфейсы (interior). На выходе определяется условие outlet (Pressure Outlet), позволяющее воздуху покидать расчетную область. После достижения устойчивого состояния производится экспорт поля полного давления на поверхностях окон градирни. Эти данные отражают распределение давления, обусловленное внешними потоками, и являются важным входным параметром для дальнейшего анализа. Результаты первого этапа моделирования расчетной области представлены на рис. 1 в виде линий тока воздуха, обтекающего градирню.

На втором этапе исследований проводилось моделирование внутренней области градирни с целью анализа распределения воздушных потоков внутри установки с учетом воздействия внешнего давления, полученного на первом этапе. Поле давлений, экспортированное с окон градирни внешней области, использовалось для задания граничных условий для внутренней модели градирни. Расчет производился для скоростей ветра 3 и 6 м/с. Найденное поле скоростей воздуха в градирне представлено на рис. 2.

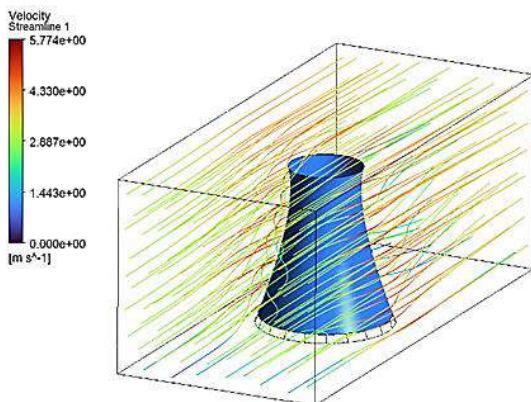


Рис. 1. Результат моделирования внешней расчетной области градирни в виде линий тока воздуха, обтекающего градирню

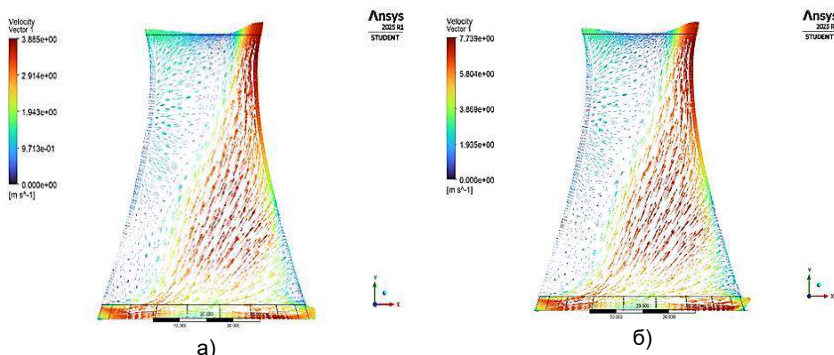


Рис. 2. Векторное поле скоростей воздуха при скорости ветра 3 (а) и 6 (б) м/с

Из анализа данных, представленных на рис. 2, можно выделить ряд характерных моментов, возникающих при изменении скорости ветра. Воздух с наветренной стороны (откуда дует ветер) заходит с большей скоростью, тогда как с подветренной стороны формируется зона пониженного давления, где приток воздуха может быть существенно меньше. В центральной части башни наблюдается более высокая скорость потока воздуха, в то время как у стенок формируется менее интенсивный поток или даже застойные зоны. Поток воздуха, обгибая градирню, может частично «закручиваться» внутри конструкции. На рисунке это может проявляться в виде векторов, уходящих в сторону или образующих дугообразные траектории.

Проведенные расчеты подтвердили, что ветер значительно влияет

на структуру воздушных потоков внутри градирни, формируя зоны со сниженной скоростью (особенно у подветренных стенок) и области с повышенной скорости в центральной части. Векторы скорости указывают на формирование локальных зон рециркуляции на подветренной стороне и вблизи стенок. Подобные «мертвые зоны» снижают эффективность теплообмена и могут приводить к перегреву отдельных участков орошения.

Для детального моделирования планируется выполнить серию расчётов с разным процентом открытых фрамуг (например, 25%, 50%, 75%) и сравнить распределение давления и скоростей и равномерности распределения воздуха по сечению градирни. Это позволит определить степень раскрытия окон (фрамуг), обеспечивающую поддержание равномерного распределения воздуха по сечению и эффективного теплообмена.

Представленный подход позволяет на основании проведенного анализа с учетом сделанных расчетов разработать рекомендации по снижению негативных последствий от ветрового воздействия на теплообмен в башенной градирне. В качестве наиболее простого и эффективного способа повышения эффективности функционирования башенных градирен предлагается управление степенью открытия фрамуг. Следует отметить, что индивидуальное управление открытием фрамуг может оказывать положительный эффект на равномерность распределения потоков воздуха по сечению градирни. Разработка индивидуальных рекомендаций для разных градирен с учетом индивидуальных особенностей их расположения относительно других стационарных строений и направления ветра является актуальным направлением исследований особенно при возможном индивидуальном управлении степенью открытия фрамуг. Автоматическая перенастройка индивидуального открытия фрамуг при смене направления и скорости ветра является следующим перспективным направлением развития данного подхода.

Литература

1. Фомичев М. Д., Жуков В.П. Расчетный анализ влияния неравномерности распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлаждающей воды // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): Материалы Международной научно-технической конференции. Т.2. Иваново, 2023. С. 392-395.
2. Жуков В.П., Фомичев М.Д., Виноградов В.Н. и др. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС. // Вестник ИГЭУ. 2022. № 3. С. 57-63.
3. Указания по нормированию показателей работы гидроохладителей в энергетике (РД 34.09.212): утверждено зам. начальника Главтехуправления Д.Я. Шамараковым 7.02.1980 г. Главное техническое управление по эксплуатации энергосистем. Москва: Южтехэнерго, 1981. 37 с.
4. Доброго К.В., Хеммасиан К.М., Ласко Е.Е. Моделирование башенной испарительной градирни и влияния аэродинамических элементов на ее работу в

условиях ветра. Энергетика. //Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2014;(6): С. 47-60.

5. Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных гради-
рен: монография. Казань: КГЭУ, 2004. 180 с.

6. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломас-
сообменных установок. Иваново: ИГЭУ, 2009. 176 с.

7. ANSYS, Inc. (2020) ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc.,
Canonsburg.Kloppers.

8. Kloppers J.C., Kröger D. G. A critical investigation into the heat and mass
transfer analysis of counterflow wet-cooling towers. International Journal of Heat and
Mass Transfer. 2005, 48(3-4), P. 765–777.

УДК 620.9; 66.011

А.С. АНДРЕЕВ¹, к.т.н., доцент,
К.В. АКСЕНЧИК², к.т.н., доцент, зав. кафедрой

Череповецкий государственный университет
162602, г. Череповец, пр. Луначарского, 5
E-mail: asandreev@chsu.ru¹, kvaksenchik@chsu.ru²

Экспресс анализ термодинамики химического реактора

Аннотация. В работе приведена математическая модель термодинамики
химического газового реактора для оценки его энерготехнологичности.

Ключевые слова: энерготехнологичность, эксергия, баланс эксергии, мате-
матическая модель, химический реактор.

A.S. ANDREEV¹, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
K.V. AKSENCHIK², Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Head of the Department

Cherepovets State University
162602, Cherepovets, Lunacharskogo ave., 5
E-mail: asandreev@chsu.ru¹, kvaksenchik@chsu.ru²

Express analysis of thermodynamics chemical reactor

Abstract. The article presents a mathematical model of the thermodynamics of a
chemical gas reactor to assess its energy efficiency.

Key words: energy technology, exergy, balance of exergy, mathematical model,
chemical reactor.

Введение и постановка задачи. Процессы преобразования ве-
ществ в технических системах сопровождаются энергетическими взаи-
модействиями. В этой связи любая химико-технологическая система
априори должна оцениваться с точки зрения ее энерготехнологичности.

Химические реакторы являются основными функциональными элементами, определяющими эффективность химических технологий. Для выдачи исходных данных на их проектирование требуется проведение экспресс-анализа энерготехнологичности химических реакторов. Очевидно, что экспресс-анализ требует использование математических моделей и компьютерного моделирования.

В статье изложенное демонстрируется применительно к энерготехнологической оценке химических реакторов, в которых протекают газовые реакции. В качестве инструмента компьютерной автоматизации расчетов рекомендуется использовать отечественную среду динамического моделирования технических систем SimInTech, которая успешно конкурирует с зарубежными аналогами и при этом абсолютно доступна пользователям.

Для унификации анализа при экспресс-моделировании не рассматриваются конструктивные особенности химического реактора. Поэтому химический реактор формализуется математической моделью, которая базируется на общих законах сохранения энергии и вещества с учетом ограничений, обусловленных вторым постулатом термодинамики [1, 2]. При таком уровне формализации для оценки энерготехнологичности технологических процессов в рассмотрение достаточно вести два определяющих параметра: степень превращения целевого ингредиента и изменение эксергии в процессе.

Разработка математической модели. Степень превращения и состав реагирующих веществ в реакторе определяется константой химического равновесия:

$$K_f = \frac{f_{B_1}^{r_1} \cdot f_{B_2}^{r_2} \cdot \dots \cdot f_{B_k}^{r_k}}{f_{A_1}^{m_1} \cdot f_{A_2}^{m_2} \cdot \dots \cdot f_{A_l}^{m_l}}, \quad (1)$$

где f_{A_i} , f_{B_k} – парциальные летучести исходных A_i и конечных B_k веществ; m_i , r_k – стехиометрические коэффициенты участников реакции.

Теоретическая константа химического равновесия при температуре T моделируется уравнением изобары:

$$\ln K_f^* = -\frac{\Delta G_T^0}{R \cdot T}, \quad (2)$$

где ΔG_T^0 – изменение потенциала Гиббса, Дж/моль; T – температура, К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Равновесная степень превращения x_p определяется значением, при котором обеспечивается равенство:

$$K_f^* = K_f. \quad (3)$$

Баланс эксергии для химического реактора наглядно представляет диаграммой Сенки (см. рис.).

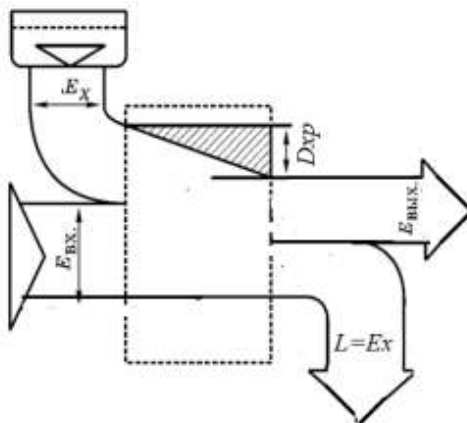


Рис. Диаграмма Сэнки для баланса эксергии химического реактора

Диаграмме соответствует равенство

$$E_{BX} + E_X = E_{BbX} + D_{XP} + L, \quad (4)$$

где E_{BX} , E_{BbX} – термическая эксергия входного и выходного потока соответственно, Дж/с; E_X – термическая эксергия химического превращения, Дж/с; D_{XP} – потери эксергии из-за неравновесности химической реакции, Дж/с; L – электрическая энергия в случае преобразования тепловой энергии химического превращения, Дж/с.

Модели эксергии потоков на входе и выходе реактора:

$$E_{BX} = H_{BX} - H_0 - T_0 \cdot (S_{BX} - S_0), \quad (5)$$

$$E_{BbX} = H_{BbX} - H_0 - T_0 \cdot (S_{BbX} - S_0), \quad (6)$$

где H_{BX} , H_{BbX} – энтальпии потоков на входе и выходе реактора; S_{BX} , S_{BbX} – энтропии потоков на входе и выходе реактора; H_0 , S_0 – энтальпия и энтропия потоков в случае равновесия с окружающей средой; T_0 – температура окружающей среды.

Термическая эксергия химического превращения описывается уравнением

$$E_X = GI \cdot x_p \cdot \Delta H \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (7)$$

где GI – расход целевого ингредиента на входе реактора, моль/с; x_p – равновесная степень химического превращения целевого ингредиента; ΔH – изменение энтальпии в процессе химического превращения, Дж/моль; T – температура процесса, К.

Потери эксергии вследствие необратимости процесса химического превращения

$$D_{XP} = T_0 \cdot \frac{\Delta G_T^0}{T}. \quad (8)$$

Обсуждение результатов моделирования и выводы. Моделирование процесса показывает, что для эндотермических реакций с увеличением температуры эксергия химического реактора возрастает, а выход продукта, наоборот, уменьшается. Разработанная математическая модель позволяет учитывать указанные противоборствующие тенденции, и оперативно в процессе компьютерного моделирования определять энерготехнологический оптимум исходных данных при их выдаче для проектирования реактора.

Для автоматизации анализа описанная выше термодинамическая модель реактора оформляется в виде программного блока, который в качестве структурного элемента включается в среду динамического моделирования SimInTech, обеспечивая, таким образом, использование всех ее системных возможностей, включая оптимизацию.

Литература

1. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия. 1973. 296 с.
2. Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Сычев В.В. Техническая термодинамика. М.: Изд-во МЭИ. 2016. 496 с.

УДК 621.928, 621.929

А.В. ОГУРЦОВ, к.т.н., доцент;
А.С. ШМЕЛЕВ, аспирант
С.А. ЛЕБЕДЕВА, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: Shml.Alx@gmail.com

Разработка лабораторной установки для исследования многоступенчатого гравитационного разделения смеси

Аннотация. В работе представлены результаты разработки установки и экспериментальных исследований по распределению твёрдых частиц различной крупности в многопоточном многоступенчатом гравитационном классификаторе. Смесь, состоящая из фракций с диаметром частиц менее 0,1 мм и более 0,63 мм, подавалась в установку сверху. Результаты анализа распределения материала по шести приёмным контейнерам показал эффективное разделение: мелкая фракция аккумулируется в центральных контейнерах, а крупная – в крайних. Полученные результаты подтверждают инерционно-гравитационный механизм работы установки и демонстрируют перспективность её применения для предварительной сортировки сыпучих материалов.

Ключевые слова: сыпучий материал, фракционирование, перемешивание, теория цепей Маркова

A.V. OGURTSOV, candidate of technical sciences, associate professor;
A.S. SHMELEV, postgraduate student
S.A. LEBEDEVA, student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34
E-mail: Shml.Alx@gmail.com

Development of a laboratory facility for the study of multi-stage gravitational separation of mixtures

Abstract. The paper presents the results of an experimental study on the distribution of solid particles of different sizes in a multi-stage gravitational classifier. A mixture consisting of fractions with diameters up to 0.1 mm and greater than 0.63 mm was uniformly fed into the system. The analysis of material distribution in six receiving containers showed effective separation: the fine fraction accumulates in the central containers, while the coarse fraction gathers in the outer containers. The results confirm the inertial-gravitational mechanism of the system's operation and demonstrate its potential for use in bulk material pre-sorting tasks.

Key words: bulk material, fractionation, mixing, Markov chain theory

Для разделения по фракциям полидисперсной песчаной смеси была разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 1. Установка изготовлена методом FDM 3D-печати, что обеспечило наглядность при проектировании и снижение затрат при монтаже.



Рис. 1. Установка многоступенчатых гравитационных классификаторов многопродуктового типа

Классификатор состоит из пяти горизонтальных модульных секций, каждая из которых оснащена регулируемыми направляющими. Направ-

ляющая имеет призматическую форму с основанием в виде равностороннего треугольника. Оси всех направляющих были ориентированы параллельно. Материал направляющих – термопластик (PLA), обеспечивающий износостойкость и легкость модификации установки. Секции расположены каскадом, что позволяет последовательно разделять частицы смеси по крупности.

В ходе проведенного эксперимента исследовалась работа многоступенчатого гравитационного классификатора, предназначенного для разделения многокомпонентного сыпучего материала [1, 2]. Двухкомпонентная смесь приготавливалась из полидисперсной песчаной смеси путём разделения на ситах. В установку подавалась смесь двух фракций: мелкой (с размером частиц менее 0,1 мм) и крупной (более 0,63 мм) (рис. 2). Для достижения большей точности опыты дублировались.

После прохождения через классификатор материал попадал в шесть приемных контейнеров, расположенных в нижней части установки.

Результаты проведенных исследований демонстрируют характерное распределение материала. В контейнеры K3 и K4, находящиеся ближе к центру установки, попадает преимущественно мелкодисперсная фракция с размером частиц менее 0,1 мм: 277,63 г в K3 и 300,32 г в K4 соответственно. Это объясняется тем, что менее инерционные мелкие частицы быстрее теряют скорость и оседают в центральной зоне.

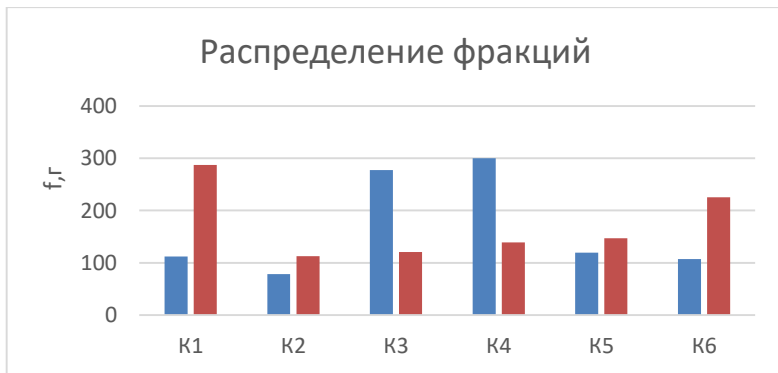


Рис. 2. График распределения фракций (f , г) по контейнерам. Синим цветом показано содержание в контейнерах частиц размером менее 0,1 мм, оранжевым – более 0,63 мм

Контейнеры K1 и K6, находящиеся по краям установки, содержат наибольшее количество частиц размером более 0,63 мм – 287,22 г. в K1 и 225,49 г. в K6 соответственно.

Более массивные и инерционные частицы большего размера движутся преимущественно по внешней траектории и осаждаются в крайних контейнерах.

Таким образом, проведенный анализ показал, что установка позволяет эффективно разделять материал по размеру частиц. Многоступенчатая конструкция обеспечивает стабильную классификацию, повышая точность разделения. Направляющие элементы установки задают условия для перемешивания выделенного материала фракций, что особенно важно при работе с полидисперсными смесями.

Литература

1. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. 158 с.
2. Барский М. Д. Фракционирование порошков. М.: Недра, 2007. 327 с.

УДК 621.928, 621.929

А.В. ОГУРЦОВ¹, к.т.н., доцент;
К.А. ЛЁТИН¹, студент
Д.С. КОНОВ², аспирант,
М.В. МАКАРОВ², аспирант

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: ogurtsovav@mail.ru

²Ивановский государственный политехнический университет
153000, Иваново, Шереметевский пр., 21

Вероятностный подход к моделированию процессов фракционирования и перемешивания сыпучих строительных материалов

Аннотация. Для моделирования процессов фракционирования используется математический аппарат теории цепей Маркова, который учитывает случайные свойства, как самих сыпучих сред, так и машин для их переработки.

Ключевые слова: сыпучий материал, фракционирование, перемешивание, теория цепей Маркова

A.V. OGURTSOV¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
K.A. LYOTIN¹, student
D.S. KONOV², postgraduate student,
M.V. MAKAROV², postgraduate student,

¹ Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: ogurtsovav@mail.ru

² Ivanovo State Polytechnic University
153003, Ivanovo, Sheremetyev Avenue, 21

A probabilistic approach to modeling the fractionation and mixing of bulk building materials

Annotation. The mathematical apparatus of the Markov chain theory is proposed, which takes into account the random properties of both the bulk media themselves and the machines for their processing.

Key words: bulk material, fractionation, mixing, Markov chain theory

Спрос и потребление сыпучих материалов неуклонно растет при строительстве домов, промышленных зданий, дорог, при ремонтных работах. В Ивановской области объем добычи полезных ископаемых увеличивается на 10% ежегодно. Предварительная классификация сыпучих материалов и выделение из него товарных фракций гравия и песка – экономия энергозатрат на измельчение и грохочение при переработке минерального сырья на дробильно-сортировочных заводах (рис. 1).



Рис. 1. Процесс предварительного грохочения сыпучих материалов в карьере

Сухие строительные смеси, спрос на которые постоянно растет, существенно расширяют масштабы современного строительства. Их используют как альтернативу классическому песчано-цементному раствору, который во многих случаях не отвечает современным требованиям строительства и ремонта. Основным процессом технологической линии производства сухих строительных смесей является смешивание вяжущих, заполнителей, наполнителей и добавок. Основным требованием к качеству современных строительных смесей является их однородность.

Математическое моделирование фракционирования и перемешивания сыпучих материалов основано на вероятностном подходе к описанию процессов. Это позволяет минимизировать объем трудоемких экспериментальных поисков рациональных режимов грохочения и перемешивания, а иногда и выходить на новые конструкции грохотов и смесителей.

Данный подход использует дисперсионное уравнение или его разностные представления [1-3], которое имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \operatorname{div}(-c \cdot \vec{V} + D \cdot \operatorname{grad} c) \quad (1)$$

Если $c(\vec{r}, t)$ имеет смысл плотности вероятности распределения частиц определенной фракции сыпучего материала по виброожиженному слою, то уравнение (1) называется уравнением Колмогорова – Фоккера - Планка, а D – стохастический параметр, V – транспортным коэффициентом.

Если $c(\vec{r}, t)$ имеет смысл распределения концентрации частиц определенной фракции сыпучего материала по виброожиженному слою, то уравнение (1) называется уравнением конвективной диффузии, где D – коэффициент макродиффузии, а V – скорость конвективного переноса.

Уравнение (1) использовалось Е.А. Непомнящим, его учениками и последователями для описания процессов миграции частиц в виброожиженном слое [3]. Как правило, уравнение (1) упрощается до линейного случая одномерного дисперсионного уравнения и принимает вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -V \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где x – координата, определяющая положение частицы рассматриваемой фракции сыпучего материала, t – время процесса. В большинстве работ [1–4] считается, что D и V постоянные величины, которые учитывают физико-механические свойства частиц определенной фракции сыпучего материала, технологические параметры и особенности конструкций аппаратов, реализующих процессы фракционирования и перемешивания. Использование для описания этих процессов дисперсионного уравнения, хотя и позволяет качественно отразить их основные закономерности процесса, является проблематичным. Желание получить аналитические решения этого уравнения требует принятия далеко идущих допущений, зачастую выхолащивающих важные физические особенности процесса.

Несмотря на то, что работа по моделированию кинетики грохочения и перемешивания ведется довольно давно, прогресс в этой области наметился с началом применения дискретных моделей теории цепей Маркова.

Слой сыпучего материала, находящийся на вибрирующем сите, представляет собой совокупность ячеек одинакового размера, в которых содержится частицы определенной исследуемой фракции и частицы других фракций. Распределение частиц исследуемой фракции по ячейкам цепи описывается вектором-столбцом, который преобразуется матрицей переходных вероятностей. Процесс движения частиц по слою сыпучего материала, подверженного вибровоздействию, а также переход частиц в подситовое пространство рассматривается как процесс через последовательные малые промежутки времени – времена перехода, в течение которых возможен переход из данного состояния (ячейки) только в соседние [1, 2]. Если известно начальное распределение

исследуемых частиц по слою, то при известных матрицах переходных вероятностей рассчитывается кинетика процессов. Предложенная математическая модель универсальна для моделирования фракционирования или смешивания сыпучих материалов, подверженных воздействию со стороны виброклассификатора или вибросмесителя. Отличие фракционирования от перемешивания предполагает прохождение мелких частиц через отверстия вибрирующего сита.

Для количественной оценки процессов фракционирования или смешивания сыпучих материалов необходимо расчетно-экспериментальное определение стохастических коэффициентов модели. Учитывая универсальность, можно проводить тестовые опыты по фракционированию и смешиванию одних и тех же сыпучих смесей при одинаковых параметрах колебаний классификатора и смесителя.



Рис. 2. Универсальная лабораторная установка для грохочения и перемешивания гравийнопесчаных смесей

На рис. 2 показана универсальная лабораторная установка, позволяющая проводить эксперименты как по грохочению гравийнопесчаных смесей, так и по их перемешиванию.

Расчетно-экспериментальные исследования позволили повысить точность определения коэффициентов сегрегации и макродиффузии и адекватность математического описания кинетики процессов.

Литература

1. Огурцов В.А., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе теории цепей Маркова // Строительные материалы. 2008. - № 5. С. 33–35.
2. Акулова М.В., Алешина А.П., Огурцов Ал.В., Огурцов Ан.В. Моделирование процесса классификации сыпучих материалов на виброгрохотах с многоярусной компоновкой сит // Вестник МГСУ. 2013. №2. С. 80 – 87.
3. Ячеечная модель смешивания в технологии производства сухих строительных смесей/ В.А. Огурцов, Ю.В. Хохлова, Е.Р. Брик, А.М. Фатахетдинов, А.В. Огурцов// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Материалы. Конструкции. Технологии», №1 (17), Йошкар-Ола. 2021. С. 62 – 69.
4. Разработка модели вибросепарации мелкодисперсных материалов через ситовые тканые полотна при их многостажной компоновке /В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Ю.В. Хохлова, А.В. Огурцов, А.Н. Артемьев// Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности, 2022, № 6. С. 166 – 171.

УДК66.074.2

М.А. ПРЕЦ, ст. преподаватель
В.А. ВДОВИНА, студент

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: vik.ktor.ria@mail.ru

CFD-анализ эффективности фракционирования в мультивихревом классификаторе кольцевого типа

Аннотация. В работе представлено численное исследование мультивихревого классификатора кольцевого типа, предназначенного для фракционирования мелкодисперсных сыпучих частиц в воздушной среде. Устройство реализует принцип «труба в трубе». В ходе исследования варьировались геометрические параметры конструкции, такие как расстояние между трубами и степень раскрытия подающих щелей. Установлено, что при оптимальных конфигурациях достигается высокая селективность классификации с фракционной эффективностью свыше 95 %.

Ключевые слова: мультивихревой классификатор, фракционирование, сыпучие материалы, численное моделирование, турбулентный поток, CFD.

M.A. PRETS, Senior Lecturer,
V.A. VDOVINA, Student,

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, 51 Krasnoselskaya Str.
E-mail: vik.ktor.ria@mail.ru

CFD analysis of fractionation efficiency in a ring-type multi-vortex classifier

Abstract. The paper presents a numerical study of a ring-type multi-vortex classifier designed for the fractionation of fine bulk particles in an air medium. The device

operates based on the "pipe-in-pipe" principle. The study investigates the influence of geometric parameters such as the distance between the pipes and the slit opening ratio. It has been established that with optimal configurations, high classification selectivity is achieved, with fractional efficiency exceeding 95 %.

Key words: multi-vortex classifier, fractionation, bulk materials, numerical modeling, turbulent flow, CFD.

В современном производственном секторе наблюдается устойчивая тенденция к увеличению требований к качеству фракционного состава исходного сырья и продуктов переработки [1]. Особенно остро эта проблема стоит в химической, фармацевтической, пищевой промышленности, а также в производстве строительных материалов. При этом значительную сложность представляет фракционирование мелкодисперсных сыпучих частиц, поскольку традиционные методы разделения, такие как просеивание или гравитационная сепарация, демонстрируют низкую эффективность в диапазоне частиц размером менее 60 мкм. В таких условиях возрастает интерес к использованию инерционных методов, основанных на динамике движения частиц в закрученных газовых потоках, не требующих подвижных частей и отличающихся высокой надёжностью [2].

В данной работе рассматривается мультивихревой классификатор кольцевого типа, в котором реализован принцип «труба в трубе» (рис. 1). Такая конструкция позволяет сформировать кольцевой канал между внутренней и внешней цилиндрическими стенками, куда подаётся газовый поток через специальные щели. За счёт тангенциального ввода потока в этом пространстве формируются устойчивые вихри, интенсивность и структура которых зависят от геометрии устройства. Эти вихри создают сложную комбинацию центробежных, инерционных и гравитационных сил, воздействующих на частицы, способствуя их сепарации в зависимости от размеров и плотности.

Исследование сосредоточено на численном анализе движения дисперсной фазы и оценке эффективности фракционирования при изменении конструктивных параметров устройства. Основными переменными параметрами стали расстояние между трубами, определяющее диаметр каждого вихря, и степень раскрытия подающих щелей, влияющая на структуру потока и его закрутку. Для проведения моделирования использовалась программная среда ANSYS Fluent, в которой реализована модель дискретной фазы (DPM), позволяющая отслеживать индивидуальные траектории частиц в трёхмерной области, а также турбулентная модель ShearStressTransport (SST), дающая адекватное описание вихревых течений в ограниченных геометриях.

Геометрия устройства была построена в CAD-среде и экспортирована в ANSYS Fluent для последующей сеточной дискретизации. Для повышения точности и снижения вычислительных затрат использовалась осевая симметрия – рассчитывался один характерный сектор кольцевого канала. В процессе численного эксперимента были получе-

ны зависимости фракционной эффективности от конструктивных параметров при различных входных условиях. Особое внимание уделялось анализу формы кривой фракционной эффективности, которая в ряде случаев демонстрировала сложное поведение с наличием локальных максимумов и минимумов. Такие экстремумы, как показал анализ, обусловлены рециркуляцией частиц, возникающей при их столкновении со стенками и последующем возвращении в поток, а также взаимодействием с восходящим газовым потоком, формирующимся в нижней части конструкции.

Результаты показали, что при определённой конфигурации устройства возможно достичь эффективности фракционирования свыше 95 % для частиц размером 20-40 микрон. Это открывает перспективы использования данной конструкции при необходимости высокой селективности разделения фракций. Одновременно с этим был проведён анализ гидравлического сопротивления устройства, варьировавшегося в пределах от 500 до 3700 Па, что также учитывалось при выборе оптимальных параметров конструкции.

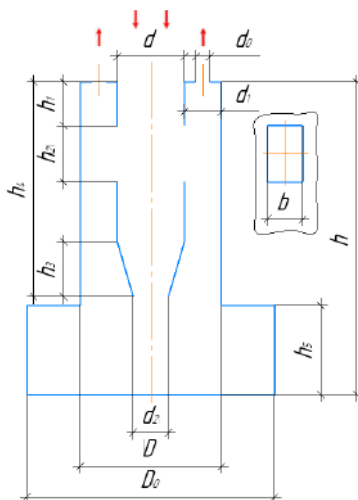


Рис. 1. Схема конструкции мультивихревого классификатора с обозначением геометрических параметров

Вывод. В ходе численного исследования работы мультивихревого классификатора установлено, что конструктивные параметры устройства оказывают решающее влияние на эффективность фракционирования мелкодисперсных частиц. Оптимизация геометрии – в частности, расстояния между коаксиальными трубами и степени раскрытия подающих щелей — позволяет формировать устойчивую вихревую структуру

ру, обеспечивающую высокую степень селективности разделения фракций. При определенных параметрах достигается фракционная эффективность выше 95% для частиц целевого диапазона размеров, что подтверждает работоспособность и перспективность предложенной конструкции.

Литература

1. Зинуров В.Э., Мадышев И.Н., Ивахненко А.Р., Петрова И.В. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 205–211. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029>.
2. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Сахибгареев Н.Ф., Латыпов Д.Н., Гарипов М.Г. Численное моделирование газодинамики в центробежном классификаторе // Вестник технологического университета. 2021. Т. 24. № 12. С. 128–132.

УДК 621.362.1: 536.24

И.Л. БАТАРОНОВ, д.ф.-м.н.
О.А. ДОРОХОВА, аспирант

Воронежский государственный технический университет
394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14
E-mail: ibataronov@cchgeu.ru, dezhinaksu@mail.ru

Особенности теплообмена потока теплоносителя с термоэлектрическим модулем

Аннотация. В работе приведены результаты численного исследования распределения температуры по поверхности термоэлектрического модуля и определения локального числа Нуссельта при охлаждении ламинарным и турбулентным потоком теплоносителя.

Ключевые слова: теплообмен, термоэлектрический модуль, распределение температур, метод конечных элементов

I.L. BATARONOV, Doctor of Physics
O.A. DOROKHOVA, graduate student

Voronezh State Technical University
394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt 14
E-mail: ibataronov@cchgeu.ru, dezhinaksu@mail.ru

Features of heat exchange of the coolant flow with a thermoelectric module

Abstract. The paper presents the results of a numerical study of the temperature distribution over the surface of a thermoelectric module and the determination of the local Nusselt number during cooling by laminar and turbulent coolant flow.

Key words: heat exchange, thermoelectric module, temperature distribution, finite element method

Термоэлектрические модули (ТЭМ) являются перспективными устройствами эффективного безынерционного охлаждения теплона-

пряженных элементов [1]. В условиях охлаждения ТЭМ потоком теплоносителя (ТН) в нем формируется неоднородное распределение температуры, которое нужно учитывать для охлаждаемого элемента. В это распределение помимо кондуктивного теплопереноса дают вклад конвективный перенос тепла в ТЭМ и джоулев разогрев ТЭМ, которые являются особенностями работы ТЭМ.

Рассматривается плоский ТЭМ, на который с холодной стороны поступает однородный поток тепла q , а горячая сторона охлаждается плоскопараллельным потоком ТН с начальной температурой T_0 . В модели эффективных параметров ТЭМ эта задача сводится к задаче теплообмена с граничным условием для ТН на поверхности ТЭМ вида [2]

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = \chi Q + \chi Y \theta(\xi, 0), \quad Q = \frac{\kappa}{1 + \zeta} + Y \left(1 + \frac{2 + \zeta}{2z} \right), \quad Y = \frac{\zeta^2}{1 + \zeta}, \quad (1)$$

где $\theta = (T - T_0)/T_0$ – приведенное поле температур теплоносителя; Q – приведенная плотность однородного потока тепла из ТЭМ; $\kappa = q/q_m$, где $q_m = \Lambda T_0/h$; $\zeta = j/j_m$ – приведенная плотность электрического тока в ТЭМ, $j_m = \Lambda/(ah)$; $\xi = x/H$ – приведенная координата по поверхности ТЭМ вдоль потока ТН; Λ , α , z , h – коэффициент теплопроводности, коэффициент Зеебека, коэффициент Иоффе и толщина ТЭМ, соответственно, H – толщина потока ТН, $\chi = \Lambda H/\lambda h$ – симплекс тепловых параметров ТЭМ и ТН, Y – критериальное отношение термоэлектрика для задачи теплообмена.

Из теории подобия получено, что решение задачи теплопереноса в ТН с граничным условием (1) для распределения температуры вдоль ТЭМ имеет вид

$$\theta_1 = \chi Q \Phi(\xi; \text{Pe}, \chi Y), \quad \theta_1 = \chi Q \Phi(\xi; \text{Re}, \text{Pr}, \chi Y) \quad (2)$$

для ламинарного и турбулентного режимов ТН соответственно, где Pe – число Пекле, Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля. Тогда в соответствии с потоком тепла (1), граничной температурой (2) и среднemasсовой температурой, получаемой из одномерного уравнения переноса энергии, локальное число Нуссельта определяется формулой

$$\text{Nu}_\xi = \frac{1 + Z \Phi(\xi)}{\Phi(\xi) - \frac{\xi}{\text{Pe}} - \frac{Z}{\text{Pe}} \int_0^\xi \Phi d\xi'}, \quad (3)$$

где для удобства обозначено $Z = \chi Y$.

Для исследования решений (2), (3) на нестационарном начальном участке теплообмена использовано конечно-элементное моделирование с параболическим профилем скорости для ламинарного режима и в рамках низкорейнольдсовской $k-\omega$ модели турбулентности для промежуточного и турбулентного режимов. Число степеней свободы в 2D-задаче на длине $30H$ составило 800 тыс. для ламинарного режима и 2,8 млн для турбулентного.

Как показал дополнительный расчет на длинах $90H$ и $150H$, решение выходит на режим с постоянным числом Нуссельта Nu_Z , с использованием которого найден асимптотический вид решения, соответствующий стационарному участку теплообмена:

$$\Phi_0(\xi) = \frac{1}{N_Z - Z} + \frac{N_Z}{Z(N_Z - Z)} \left[\exp\left(\frac{Nu_Z Z}{Nu_Z - Z} \frac{\xi}{Pe}\right) - 1 \right]. \quad (4)$$

Здесь корректирующий множитель N_Z учитывает влияние начального участка теплообмена на асимптотическое распределение. В частности, при отсутствии термоэлектрического эффекта $Z = 0$ и $N_0 = Nu_0$ – обычному числу Нуссельта для стационарного участка при постоянном потоке тепла, при этом распределение (4) переходит в линейное:

$$\Phi_0(\xi) = \frac{1}{Nu_0 - Z} + \left(\frac{Nu_0}{Nu_0 - Z} \right)^2 \frac{\xi}{Pe}. \quad (5)$$

В турбулентном режиме течения ТН ввиду больших чисел Pe экспоненциальный участок из (4) фактически не реализуется (за исключением особых случаев, когда число Z приближается к Nu_0), и поэтому стационарное распределение имеет вид (5). В ламинарном же режиме из асимптотики решений получены зависимости

$$Nu_Z = \sqrt[2,35]{Z^{2,35} + Nu_0^{2,35}}, \quad N_Z = \sqrt[2,7]{(1,5Z)^{2,7} + Nu_0^{2,7}}. \quad (6)$$

Первое постоянное слагаемое в формулах (4), (5) не обнуляется при $\xi \rightarrow 0$, поэтому на начальном участке это слагаемое должно быть модифицировано. Для этого предлагается следующая замена

$$\frac{1}{N_Z - Z} \rightarrow \frac{1}{N_Z - Z + \varphi(\xi)}, \quad \frac{1}{Nu_0 - Z} \rightarrow \frac{1}{Nu_0 - Z + \varphi(\xi)}. \quad (7)$$

Анализ рассчитанных температурных распределений показал, что для ламинарного режима хорошо выполняется аппроксимация

$$\varphi(\xi) = a0 \cdot \sqrt[3]{\frac{Pe}{\xi}} \exp\left(-a1 \frac{\xi}{Pe}\right), \quad (8)$$

обеспечивающая корневую кубическую зависимость профиля температуры на начальном участке с последующим экспоненциальным выходом на стационарный профиль. Обработка результатов расчета температурных распределений по формулам (4), (6)–(8) позволила установить явный вид коэффициентов зависимости (8):

$$a0 = 0,081 \ln(26 Pe) - 0,015 Z, \quad (9)$$

$$a1 = 0,95 \sqrt{1200 + Pe} - 20 - 3,4 Z.$$

Для турбулентного режима течения ТН ввиду многослойности структуры потока одной аппроксимации (8) недостаточно. Анализ темпера-

турных профилей показал, что имеется два участка с корневой кубической зависимостью вида (8) [3], поэтому для турбулентного теплообмена использовалась аппроксимация

$$\varphi(\xi) = \sqrt[3]{\frac{Pe}{\xi}} \left[a0e^{-a1\xi} + b0e^{-b1\xi} \right]. \quad (10)$$

Здесь коэффициент $a1$ определялся для участка $\xi > 8$ по асимптотическим распределениям, и для него получена формула

$$a1 = 0,04 - \frac{92}{Pe}, \quad (11)$$

дающая длину тепловой стабилизации порядка $70H$, что согласуется с условием применимости формулы М.А.Михеева [4]. Коэффициент $b1$ определялся на участке $\xi < 8$ и имеет характерное значение 0,5, что соответствует длине порядка $6H$. Остальные коэффициенты в (10) характеризуются достаточно сложной зависимостью от Re и Pr .

Исследование формулы (3) с использованием зависимостей (4)-(11) показало, что с хорошей точностью выполняется формула для локального числа Нуссельта

$$Nu_{\xi} = Nu_Z + \varphi(\xi), \quad (12)$$

где функция $\varphi(\xi)$ определяется формулами (8) и (10).

Полученные результаты по описанию распределения температур и локального числа Нуссельта при теплообмене с ТЭМ имеют корректное асимптотическое выражение и могут применяться на произвольных длинах теплообмена. Найденные аналитические выражения для распределения температуры вдоль ТЭМ могут использоваться при расчете и оптимизации охлаждающих систем для теплонапряженных элементов электронной аппаратуры.

Литература

1. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications / M. Zebarjadi, K. Esfarjani, M.S. Dresselhaus, Z.F. Ren, G. Chen // *Energy & Environmental Science*. 2012. V.5. No 1. P. 5147–5162.
2. Моделирование распределения температуры на термоэлементе при охлаждении ламинарным потоком / О.А. Дорохова, И.Л. Батаронов, Т.А. Надеина, Н.А. Ююкин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2023. Т. 19. № 6. С. 59-68.
3. Моделирование теплообмена термоэлектрического модуля с турбулентным потоком в рамках k- ω модели турбулентности / О.А. Дорохова, И.Л. Батаронов, Т.А. Надеина, Н.А. Ююкин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2024. Т. 20. № 4. С. 49-59.
4. Rohsenow, W.M. *Handbook of Heat Transfer* / W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I. Cho. – New-York: McGraw-Hill, 1998. – 1501 p.

УДК 621.165

И.А. КОКУЛИН, аспирант
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор
В.Е. БОГАЧЕВ, студент
В.Н. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: zhukov-home@yandex.ru,

Моделирование и расчет сепарации капель в каплеуловителе испарительных установок

Аннотация. В работе представлена модель сепарации капель влаги в ступени многоступенчатой испарительной установки (МИУ), разработан подход к расчету загрязнения чистого продукта ступени растворенными в воде примесями за счет капельного уноса, предложены пути уменьшения данного загрязнения.

Ключевые слова: испарительная установка, распределение капель по размерам, капельный унос, загрязнение дистиллята, эффективность очистки.

I.A. KOKULIN, postgraduate student
V.P. ZHUKOV, doctor of Engineering, professor
V.E. BOGACHEV, student
V.N. VINOGRADOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Modeling and calculation of droplet separation in the droplet collector of evaporatory units

Abstract. The paper presents a model of moisture separation in a multi-stage evaporation unit (MEU), develops an approach to calculating the contamination of the pure evaporator product with impurities dissolved in water, and proposes ways to reduce this contamination.

Key words: evaporation unit, droplet size distribution, droplet entrainment, distillate contamination, cleaning efficiency.

Многоступенчатые испарительные установки широко применяются в различных отраслях промышленности благодаря высокой эффективности очистки воды и простоте конструкции [1-5]. Перегретая вода, попадая в зону пониженного давления, частично превращается в пар. При этом остается открытым вопрос о доле капель, которые содержатся в паре и могут уноситься вместе с паром в чистый отсек. Это явление получило название капельный унос (КУ) жидкости. Хорошо известно, что капли содержат растворенные в воде примеси, переход которых в чистый отсек приводит к загрязнению дистиллята. Для предотвращения капельного

уноса между чистым и грязным отсеками устанавливаются сепараторы капель разной конструкции, которые выбираются в зависимости от требуемого качества очищенной воды и производительности. Выбор конструкции сепаратора и его расчет для известных технологических процессов достаточно успешно осуществляется с учетом накопленного опыта эксплуатации таких установок. Выбор сепаратора для новых технологий часто требуют дополнительных исследований, включающих построение их математических моделей и методов расчета.

Объектом исследования является процесс испарения перегретой воды при ее попадании в область пониженного давления, **предметом исследования** – модель сепарации капель и расчет уноса жидкости с паром в чистый отсек испарителя.

Для построения математической модели сепарации капель ступени испарителя делается ряд допущения:

– распределение капель по размерам определяется в зависимости от величины перегрева жидкости согласно ранее предложенной методике [5];

– кривая разделения сепаратора, которая показывает вероятность выноса капель данного размера в чистый отсек ступени, описывается известным выражением [6].

При построении модели рассматриваются потоки теплоносителей в отдельной ступени испарительной установки фирмы REINNOLC^o [4], внешний вид которой приведен на рис. 1.

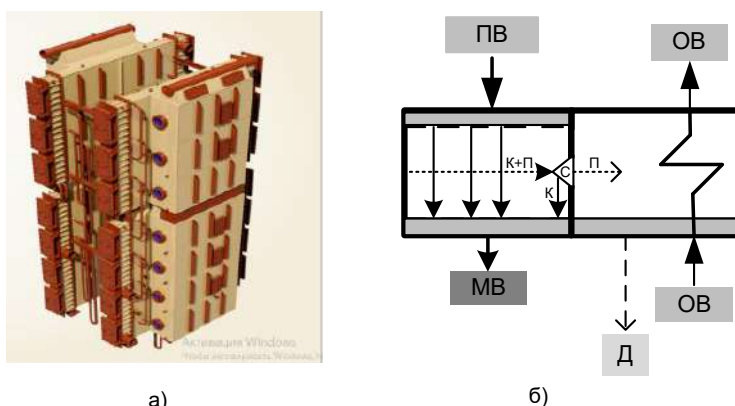


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема потоков теплоносителей в ступени испарительной установки (б): ПВ – перегретая вода, ОВ – охлаждающая вода, МВ – минерализованная вода, Д – дистиллят, П – пар, К – капли влаги, С – сепаратор капель

Перегретая вода (ПВ) подается в грязный отсек с пониженным давлением, где происходит ее вскипание и частичное испарение. В зави-

симости от интенсивности парообразования в пар (П) могут попадать капли (К) влаги, которые через сепаратор (С) могут выноситься в чистый отсек и загрязнять дистиллят (Д). Степень загрязнения во многом зависит от эффективности работы сепаратора.

Доля испаренной влаги в грязном отсеке определяется из энергетического баланса

$$(t_1 - t_{1n})cG_1 = rG_{1p}, \quad (1)$$

где t_1 – температура перегретой воды, t_{1n} – температура насыщения при давлении в ступени, c – удельная теплоемкость, r – удельная теплота парообразования, G_{1p} – расход пара, образовавшегося в грязном отсеке, G_1 – расход перегретой воды на входе в грязный отсек. Доля образовавшегося пара (α) от расхода перегретой воды определяется из теплового баланса (1)

$$\alpha = G_{1p} / G_1 = (t_1 - t_{1n})c / r.$$

Следует отметить, что вместе с паром из кипящей жидкости могут выноситься капли влаги разного размера. Для описания распределения капель по размерам нами ранее предложена комбинаторная модель [5], которая позволяет определить долю капель выделенного размера i в пароводяной смеси (f_{1i}).

Для описания разделения капель в сепараторе используется известный вид кривой разделения φ_i [6], которая удовлетворяет граничным значениям вероятностей: при нулевых значениях размера капли (i) вероятность падения в чистый отсек приближается к единице, а при увеличении размера капли – к нулю,

$$\varphi_i = 1 - \frac{1}{1 + \left(i/i_{1p}\right)^{k_s}}, \quad (2)$$

где i_{1p} – граничный размер капель, для которого вероятность попадания в чистый отсек равна 0,5, т.е. $\varphi_{i_{1p}} = 0,5$; k_s – параметр совершенства процесса сепарации. В качестве недостатков представленных зависимости следует отметить, что параметры k_s и i_{1p} должны определяться экспериментальным путем или в ходе идентификации модели по экспериментальным данным. Важно отметить, что эти оба параметра зависят как от конструкции сепаратора, так и от режима его работы [6]. Модель сепаратора капель строится по аналогии с моделью классификации твердых частиц по крупности с учетом их физической аналогии. Для моделирования процесса сепарации капель используется следующая зависимость [6]:

$$f_{zi} = \frac{f_{zi} \varphi_i}{\bar{\varphi}}, \quad (3)$$

где $\bar{\varphi}$ – полный массовый вынос или доля пароводяной смеси, перешедшая в чистый отсек, который находится из выражения

$$\bar{\varphi} = \sum f_{zi} \varphi_i. \quad (4)$$

Доля капельного уноса будет существенным образом зависеть от перегрева воды, производительности установки по пару и скорости пара в сепараторе капель, от конструкции самих уловителей капель, их геометрии [1-2]. Зная долю капель разного размера (3) и энергию, необходимую для их образования, энергия потока пара после каплеуловителя может быть определена из следующего выражения

$$E_r = G_{1k} \sum_i \frac{f_{zi}^* e}{i}, \quad (5)$$

где G_{1k} – массовый расход пароводяной смеси выносимой в чистый отсек после сепаратора капель $G_{1k} = \bar{\varphi} G_{1p}$; e – удельная энергия связи, приходящаяся на одну молекулу. Удельная энергия связи находится, как удельная теплота парообразования, деленная на число связей, которые необходимо разорвать для превращения воды в пар

$$e = \frac{r \cdot \mu}{N_a \cdot 1000}, \quad (6)$$

где $N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро, 1/моль, μ – молекулярная масса воды, г/моль.

Если агрегат молекул или капля содержит одну и более неразорванных межмолекулярных связей, то величина энергии, необходимая для образования этого агрегата, уменьшается на число неразорванных связей. На образование фрагментов, у которой разорваны не все связи между молекулами, требуется меньше энергии по сравнению с испарением до состояния сухого насыщенного пара, при котором разорваны все связи.

Согласно (4) определяется массовая доля пара, который поступает в чистый отсек. Следует отметить, что данный вынос материала при известном гранулометрическом составе капель в паре и капельного уноса однозначно определяет энергию, которая необходима для образования (испарения) такого количества влажного пара. Считается, что нам известен минимальный размер капли. Для сухого насыщенного пара размер капли, очевидно, равен размеру молекулы пара, а энергия, необходимая для ее получения, равна удельной энергии парообразования деленная на число молекул в 1 кг воды. Если ограничиться линейной структурой распределения молекул в среде, считая, что

каждый разрыв межмолекулярной связи требует в среднем одинаковое количество энергии e , то образование капель из двух молекул потребует энергии для одного килограмма жидкости в два раза меньше. Для настройки модели предлагается выполнить решение оптимизационной задачи по минимизации рассогласования энергии потока перегретой воды на входе в ступень $(t_1 - t_{1n})cG_1$ и энергии потока пара на входе в чистый отсек $E_r(i_{cp})$. В качестве параметра оптимизации при решении задачи идентификации модели определяется граничный размер сепарации i_{cp} (2)

$$F = |E_r(i_{cp}) - (t_1 - t_{1n})cG_1| = \min_{i_{cp}}. \quad (7)$$

Решение оптимизационной задачи (6) позволяет идентифицировать граничный размер разделения и создать замкнутую модель, позволяющую по капельному уносу определить загрязнение дистиллята примесями и выбрать число ступеней или режим работы установки, обеспечивающие требуемое качество готового продукта.

Выводы. Разработанная модель процесса сепарации применительно к многоступенчатым испарительным установкам мгновенного вскипания позволяет формулировать и решать задачи по эффективной организации процессов тепломассообмена в МИУ различного назначения, что служит, в свою очередь, основанием для постановки и решения задач по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров систем водоподготовки.

Литература

1. Мошкарин А.В., Мошкарин А.А. Анализ схем испарительных установок тепловых электростанций. Иваново, 2007. 271 с.
2. Матричная формализация расчета многоступенчатой испарительной установки мгновенного вскипания / В.П. Жуков, А.В. Мошкарин, и др. // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XI Бенардосовские чтения). Иваново, 2003. С. 182.
3. Жуков В. П., Кокулин И.А., Виноградов В.Н. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в многоступенчатых многопоточных испарителях мгновенного вскипания. Вестник ИГЭУ. 2023. Вып. 1. С. 71–78.
4. Термообессоливающая установка Exerger. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://storage.yandexcloud.net/startupvillage20/uploads/2ef35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf>.
5. Моделирование капельного уноса в многоступенчатых испарительных установках мгновенного вскипания / В. П. Жуков, И. А. Кокулины др. // Теплоэнергетика. 2023. № 11. С. 136–143.
6. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г, Барочкин Е.В. Аэродинамическая классификация порошков. Иваново, 2014. 260с.

УДК 621.311.22

А.Н. БЕЛЯКОВ, д.т.н., зав.кафедрой
Е.В. БАСОВА, ст.преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
Email: ab_pm@mail.ru

Моделирование совмещенных процессов теплопроводности и диффузии в многослойном теле

Аннотация. В работе представлен алгоритм построения ячеечной модели совмещенных процессов теплопроводности и диффузии в многослойном теле на примере термической обработки колбасных сыров в камере копчения. Разработанная модель позволяет рассчитывать взаимосвязанные процессы теплопроводности и диффузии, учитывать возможные фазовые превращения и нелинейные эффекты при термической обработке многослойных материалов.

Ключевые слова: ячеечная модель, цепь Маркова, теплоперенос, диффузия

A.N. BELYAKOV, doctor of Engineering, Head of the Department,
E.V. BASOVA, senior lecturer

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Email: ab_pm@mail.ru

Modeling of combined processes of heat transfer and diffusion in a multilayer body

Abstract. The paper presents an algorithm for constructing a cellular model of combined processes of heat transfer and diffusion in a multilayer body using the example of the heat treatment of cheeses in a smoking chamber. The developed model makes it possible to calculate interrelated processes of heat transfer and diffusion, to take into account possible phase transformations and nonlinear effects during heat treatment of multilayer materials.

Key words: cell model, Markov chain, heat transfer, diffusion

Во многих отраслях промышленности встречаются технологические процессы, связанные с термической обработкой многослойных тел. Например, в пищевой промышленности – это копчение колбасного сыра, представляющего собой многослойную среду из пленки, корочки и тела продукта.

Цель работы заключается в создании математической модели процесса теплопроводности, совмещенного с процессами диффузии и фазовыми переходами в многослойных средах.

Объектами исследования являются нелинейные процессы теплопроводности и диффузии в многослойной среде применительно к технологическому процессу копчения колбасных сыров.

Копчение сыра состоит из нескольких взаимосвязанных процессов:

процесса теплоотдачи от окружающей среды и теплопроводности внутри продукта, диффузии дыма через целлофановую пленку внутрь продукта, диффузии влаги из продукта к периферии, испарение влаги с поверхности продукта, конденсации влаги на поверхности пленки (при возникновении определенных условий).

Колбасный сыр рассматривался при моделировании как многослойный цилиндр, состоящий из внешней целлофановой пленки, «корочки», которая формируется в процессе диффузии дыма при термической обработке, и тела продукта. Построение математической модели основано на ячеечном аппарате теории цепей Маркова [1], алгоритм создания которой для процесса нелинейной теплопроводности в многослойных средах с фазовыми переходами описан нами ранее в [2].

В настоящей работе рассмотрены три одновременно протекающих процесса: теплопроводность, диффузия влаги и ее испарение. Процесс теплопроводности, движущей силой которого является разность температур, зависит от свойств среды – плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности. Причиной процесса диффузии является разница концентраций, а скорость его определяется коэффициентом диффузии. Процесс испарения влаги с поверхности продукта зависит от количества влаги в дымовой смеси, поступающей в камеру копчения из дымогенератора. В процессе копчения уменьшается количество влаги в продукте, содержание которой оказывает влияние на теплофизические свойства среды, и, следовательно, на процесс теплопроводности. Построение ячеечной модели диффузии аналогично модели теплопроводности, т.к. физические законы обоих процессов имеют аналогичный вид и описываются параболическими уравнениями математической физики [3].

Целью расчетов является демонстрация работоспособности предложенной модели и определение новых эффективных технологических режимов. Результаты расчета получены с использованием следующих исходных данных: радиус сыра $R=0.03$ м разбит на $m = 10$ ячеек; $\Delta t = 1$ с – шаг по времени; $t_{\max} = 5400$ с – время копчения (1.5 часа); $T_0 = 72^\circ\text{C}$ – начальная температура сыра; $\rho = 1030$ кг/м³ – плотность сыра; $c = 3140$ Дж/(кг·°C) – теплоемкость сыра; $\lambda = 0.4$ Вт/(м·°C) – теплопроводность сыра; $q=2.3 \cdot 10^6$ Дж/кг – удельная теплота парообразования воды; $M=1.47$ кг – масса сыра до копчения; $M_1=1.35$ кг – масса сыра после копчения; тогда энергия, затраченная на испарение влаги с поверхности пленки за полное время копчения

$$Q_v = (M-M_1) \cdot q = 2,76 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

В ходе расчета теплопроводности в многослойной среде определялось температурное поле и концентрация влаги внутри цилиндра вдоль пространственной координаты, связанной с его радиусом. На рис.1 а представлена эволюция температуры внутри сыра в процессе копчения с начальной температурой $T_0 = 72^\circ\text{C}$. С течением

времени температура сыра снижается до 71°C . Это связано с тем, что часть влаги с поверхностного слоя испаряется, забирая энергию и уменьшая температуру наружной ячейки. Зная какую массу влаги теряет сыр за время копчения можем оценить интенсивность испарения. Уменьшение концентрации влаги в наружной ячейке за счет испарения запускает процесс диффузии влаги из тела сыра на периферию. Эволюции содержания влаги представлена на рис.1 б. Содержание влаги в объеме сыра со временем уменьшается с начальных значений 0,56, до 0,52 в среднем по всему объему, что соответствует потере влаги 0,12 кг за время копчения.

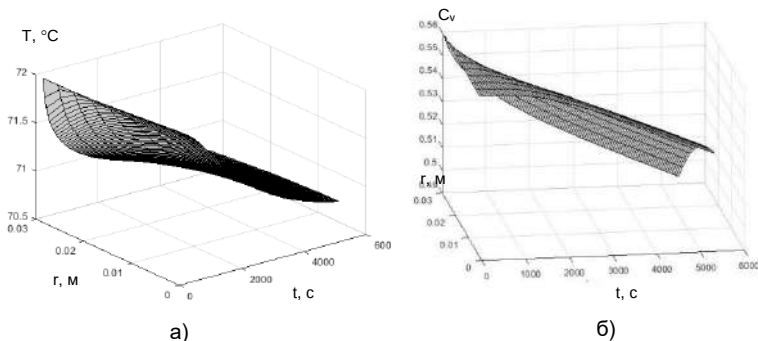


Рис. 1. Эволюция температуры (а) и содержания влаги (б) в теле продукта

Идентификация модели проводилась на основании данных, полученных в ходе технологического эксперимента, в ходе которого определялись коэффициенты переноса в выделенных слоях и теплоотдачи с поверхности сыра. Так коэффициент диффузии влаги составил $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент теплоотдачи с поверхности пленки $40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Литература

1. Баранцева Е.А., Мизонов В.Е. Введение в теорию цепей Маркова и ее инженерные приложения: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2010. 80 с.
2. Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Басова Е.В., Шуина Е.А. Теоретическое исследование нелинейной теплопроводности в многослойной среде с фазовыми переходами в слоях // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. Вып. 1. С. 53-59.
3. Мизонов В.Е. Уравнения математической физики: Конспект лекций / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2010. 60 с.

УДК 621.311.22

А.Н. БЕЛЯКОВ, д.т.н., зав.кафедрой
Е.В. БАСОВА, ст. преподаватель,
С.А. СМЕРНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
Email: ab_pm@mail.ru

Моделирование процесса нелинейной двухпоточной теплопроводности в смазочном слое с внутренними источниками энергии

Аннотация. Рассмотрено построение ячеечной модели нелинейной теплопроводности в двухкомпонентном смазочном слое с внутренними источниками энергии, в которой описываются два потока тепла по каждому из компонентов с учетом обмена энергиями между ними. Разработанная модель позволяет определять поле температур в смазке в зависимости от концентрации ее составляющих.

Ключевые слова: ячеечная модель, цепь Маркова, теплоперенос, смазочный материал

A.N. BELYAKOV, doctor of Engineering, Head of the Department,
E.V. BASOVA, senior lecturer,
S.A. SMIRNOV, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Email: ab_pm@mail.ru

Modeling of the process of nonlinear two-flow heat transfer in a lubricating layer with internal energy sources

Abstract. The construction of a cellular model of nonlinear heat transfer in a two-component lubricating layer with internal energy sources is considered, which describes two heat flows for each of the components, taking into account the energy exchange between them. The developed model makes it possible to determine the temperature field in a lubricant depending on the concentration of its components.

Key words: cellular model, Markov chain, heat transfer, lubricant.

Объектом исследования является процесс теплопроводности в слое смазки, модифицированной многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ). Увеличение концентрации углерода в смазочном материале влияет не только на снижение коэффициента трения, но и за счет высокой теплопроводности увеличивает отвод тепла от смазки на периферию – к поверхностям контактирующей пары.

Смазочный материал представляется в виде модельной двухкомпонентной системы – базового масла, модифицированного многостенными углеродными нанотрубками. В связи с тем, что парамет-

ры (теплопроводность, теплоемкость и плотность), входящие в формулу для определения коэффициентов температуропроводности, для масла и МУНТ существенно отличаются, предлагается рассмотреть два отдельных процесса теплопроводности для каждого из компонентов композитного состава и учесть взаимный обмен энергией между ними.

Построение модели выполнено на основе теории цепей Маркова. На рис. 1 представлена схема тепловых потоков между контактами в двухкомпонентном смазочном материале. Модель включает две параллельные цепи ячеек, описывающие процесс теплопроводности в масле и присадке из углеродных нанотрубок. Ширина слоя разбита на конечное число ячеек. Количество ячеек каждой цепи одинаково. Состояние системы описывается векторами теплоты Q_s и температуры T_s для базового масла и векторами Q_c и T_c для углеродного компонента.

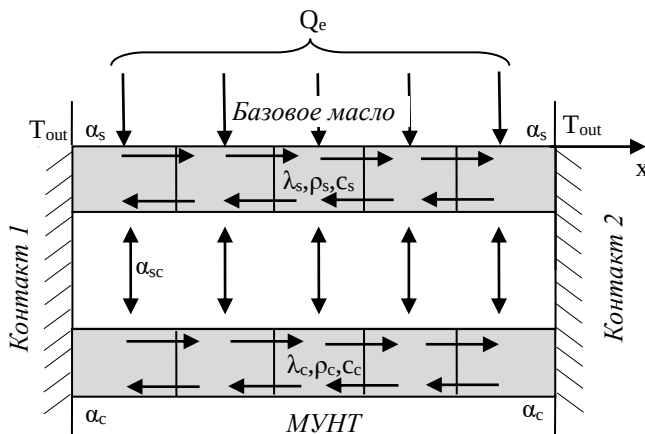


Рис. 1. Расчетная схема тепловых потоков в смазочном слое

Наружные ячейки обмениваются энергией с контактной парой. Коэффициент теплоотдачи углеродных нанотрубок α_c значительно выше коэффициента теплоотдачи базового масла α_s , тем самым обеспечивается значительный теплоотвод энергии от масла на периферию через углеродную компоненту. Между ячейками масла и присадки происходит теплообмен, величина которого зависит от коэффициента теплоотдачи α_{sc} и площади контакта, которая определяется по известной концентрации присадки. В системе действует распределенный источник тепла Q_e , который генерирует энергию за счет трения контактной группы. Считается, что источник энергии присутствует только в ячейках базового масла.

Результаты численных экспериментов с математической моделью

нелинейной двухпоточной теплопроводности в двухкомпонентном смазочном слое с учетом концентрации углеродных наноприсадок представлены на рис. 2. Кривая 1 соответствует процессу теплопроводности для смазочного материала без присадок. С увеличением концентрации МУНТ (кривые 2-5) установившаяся температура внешнего слоя смазочного материала, взаимодействующего с поверхностями пары трения, уменьшается, а скорость переходного процесса увеличивается.

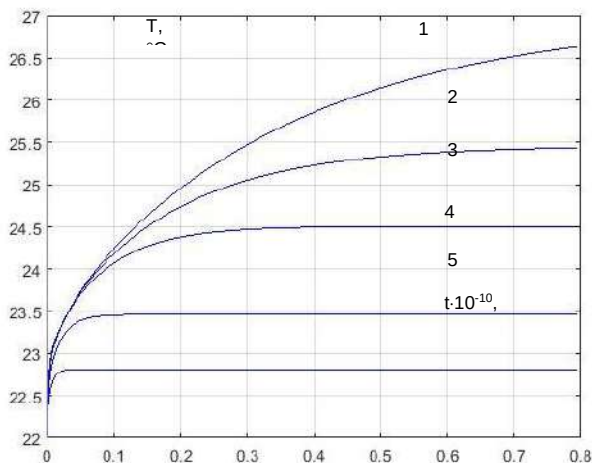


Рис. 2. Изменение температуры на левой границе смазочного слоя в зависимости от концентрации МУНТ: 1 – 0% (чистое базовое масло); 2 – 0,03%; 3 – 0,1%; 4 – 0,5%; 5 – 1,5%

Разработанная модель позволяет прогнозировать температуру смазочного слоя и определять требуемую для конкретных смазочных материалов и условий эксплуатации концентрацию углеродных наноприсадок. Модель позволяет легко ее адаптировать для количества потоков тепла больше двух, т.е. рассчитывать многопоточные системы.

Литература

1. Баранцева Е.А., Мизонов В.Е. Введение в теорию цепей Маркова и ее инженерные приложения: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2010. 80 с.
2. Mizonov V. et.al. A simple model to describe the non-linear heat conduction in multi-layer body with phase transformation / Vadim Mizonov, Andrey Mitrofanov, Evgeny Barochkin, Elena Basova // JP Journal of Heat and Mass Transfer Volume 21, Number 2, 2020. P. 291-300 ISSN: 0973-5763.

УДК 621.165

И.Д. АКСАКОВСКИЙ¹, аспирант

В.П. ЖУКОВ¹, д.т.н., профессор

Д.С. БАРАКОВСКИЙ², к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина ¹
153003, Иваново, ул. Рабфakovская, 34

e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина ²

г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

Моделирование поля скоростей воздуха в струйной мельнице с использованием ANSYS

Аннотация. В работе представлено численное моделирование поля скоростей воздуха в струйной мельнице с использованием программного комплекса ANSYS. Разработана математическая модель течения воздуха, учитывающая особенности конструкции сопла и разгонной трубы. Проведен анализ влияния геометрических параметров на структуру потока и эффективность процесса измельчения. Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации по оптимизации конструкции струйных мельниц.

Ключевые слова: струйная мельница, поле скоростей, численное моделирование, ANSYS, аэродинамика потока, уравнения Навье-Стокса.

I.D. AKSAKOVSKIY¹, postgraduate student

V.P. ZHUKOV¹, doctor of Engineering, professor

D.S. BARAKOVSKIY², candidate of Technical Sciences

Ivanovo State Power Engineering University ¹

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin²

Ekaterinburg, st. Mira, 19,

Modeling and calculation of droplet separation in the droplet collector of evaporatory units

Abstract. This work presents a numerical simulation of the air velocity field in a jet mill using the ANSYS software package. A mathematical model of air flow has been developed, taking into account the design features of the nozzle and the acceleration pipe. An analysis of the influence of geometric parameters on the flow structure and the efficiency of the grinding process has been conducted. The obtained results allow for the formulation of recommendations for optimizing the design of jet mills.

Key words: jet mill, velocity field, numerical simulation, ANSYS, flow aerodynamics, Navier-Stokes equations.

Введение

Современные промышленные струйные мельницы представляют собой сложные аэродинамические устройства, эффективность работы которых в значительной степени определяется характеристиками формируемого воздушного потока.

Большой интерес представляет исследование полей скоростей в рабочих камерах такого оборудования, так как именно эти параметры непосредственно влияют на эффективность процесса измельчения дисперсных материалов. В данной работе рассматривается подход к компьютерному моделированию воздушных потоков с использованием современных CFD-технологий.

Математическая модель

Основу математического аппарата исследования составили уравнения Навье-Стокса для сжимаемого вязкого газа, дополненные стандартной k - ϵ моделью турбулентности. Система дифференциальных уравнений в частных производных включает уравнение неразрывности, уравнения сохранения импульса и энергии, а также дополнительные соотношения для параметров турбулентности.

Особое внимание уделено граничным условиям, среди которых можно выделить условия на твердых стенках, заданный профиль скорости на входе в сопловой аппарат и условие постоянного давления на выходе из расчетной области.

Методика расчетов

Численное моделирование выполнялось в программном комплексе ANSYS Fluent с использованием метода конечных элементов. Расчетная сетка строилась с учетом особенностей геометрии разгонной трубы и преграды, при этом внимание уделялось областям с ожидаемыми большими градиентами скорости. Для обеспечения достоверности результатов проведена серия расчетов на последовательно сгущающихся сетках с контролем сеточной сходимости.

Верификация математической модели выполнялась путем сравнения с известными аналитическими решениями для канонических течений.

Результаты и их обсуждение

Проведенные расчеты позволили получить детальную картину распределения скоростей в рабочей камере струйной мельницы. Анализ результатов выявил наличие выраженных вихревых зон в области взаимодействия струи с преградой, что оказывает существенное влияние на эффективность процесса измельчения. Установлено, что геометрические параметры соплового аппарата, в частности угол его раскрытия, определяют степень турбулизации потока и характер его взаимодействия с обрабатываемым материалом.

Полученные данные позволяют сформулировать практические рекомендации по оптимизации конструкции разгонной трубы.

Заключение

Разработанная математическая модель адекватно описывает особенности течения воздуха в струйной мельнице и может быть использована для анализа рабочих процессов в подобных устройствах. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований, включая моделирование многофазных потоков с учетом взаимодействия воздушной струи с частицами измельчаемого материала. Интерес представляет изучение нестационарных режимов работы и оптимизация геометрии рабочих камер струйных мельниц.

Литература

1. Зайцев И.Д., Афанасьев В.Н. Струйные мельницы: теория и практика. М.: Химия, 2005. 320 с.
2. ANSYS Fluent User's Guide. ANSYS, Inc., 2021.
3. Куликов Н.И. Современные методы расчета струйных аппаратов. М.: Машиностроение, 2019. 415 с.

СЕКЦИЯ 17.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621/577/012-837

Д.В. СИДОРОВ, аспирант
А.А. ДУДОЛИН, к.т.н. доцент

Московский энергетический институт технический университет
111250, г. Москва, муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1
E-mail: sidorovdmvl@mpei.ru

Особенности теплотехнического расчета теплонасосной установки на перспективном фреоне RC-318

Аннотация. В работе приведены результаты расчета основных термодинамических параметров теплонасосной установки, рабочим телом которой является фреон RC-318 (октафторциклобутан) и подсчет индекса энергетической эффективности COP (Coefficient of Performance). Проанализирована перспективность использования фреона RC-318 в теплонасосном оборудовании.

Ключевые слова: Теплонасосная установка, t, s – диаграмма; термодинамический цикл, фреон, индекс эффективности.

D.V. SIDOROV, post graduate
A.A. DUDOLIN, Ph.D. Associate Professor

Moscow Power Engineering Institute Technical University
111250, Moscow, Lefortovo municipal district, Krasnokazarmennaya str., 14, build. 1
E-mail: sidorovdmvl@mpei.ru

Features of the thermal engineering calculation of the RC-318 advanced freon heat pump

Annotation. The paper presents the results of calculating the main thermodynamic parameters of a heat pump unit, the working medium of which is RC-318 freon (octafluorocyclobutane) and calculating the energy efficiency index COP (Coefficient of Performance). The prospects of using RC-318 freon in heat pump equipment are analyzed.

Key words: Heat pump unit, t, s-diagram; thermodynamic cycle, freon, efficiency index.

Постановка задачи

Повышение энергоэффективности теплоэнергетического оборудования, снижение капитальных и эксплуатационных затрат, снижение вредного воздействия на окружающую среду – наиболее актуальная и важная задача современной энергетики.

Теплонасосные установки на основе парокомпрессионного двигателя с электроприводом, в замкнутом контуре которого циркулирует низ-

кокипящее рабочее тело – фреон, широко применяются в теплоэнергетике с целью утилизации (полезного использования) низкопотенциального сбросного (бросового) тепла энергетических и производственных объектов.

В связи с поиском технологий, повышающих энергоэффективность теплонасосных установок, были произведены расчеты, составлена модель с использованием, в качестве низкокипящего рабочего тела, фреона марки RC-318 (C4F4).

В теплонасосной технике марки фреона, имеющие высокую критическую температуру, наиболее интересны с точки зрения возможного повышения температуры горячего конца (конденсатора).

Особенностью фреона RC-318 является высокая критическая температура $t_{\text{крит.}}=115,3^{\circ}\text{C}$ при незначительно высоком давлении конденсации $p_{\text{крит.}}=2,79$ МПа, что для проектирования теплового насоса на базе данного фреона, делает его привлекательным.

RC-318 (C4F4) имеет небольшую теплоту парообразования, а также положительную теплоемкость пара вдоль линии насыщения, в связи с чем положительный наклон правой пограничной кривой в t,s -диаграмме. Таким образом, процесс обратимого адиабатного сжатия в компрессоре протекает в двухфазной области, что вынуждает использование данного фреона в теплонасосном регенеративном цикле с большой степенью регенерации. В t,s -диаграмме купол кривой равновесия «жидкость-пар» имеет наклон вправо по отношению к основанию.

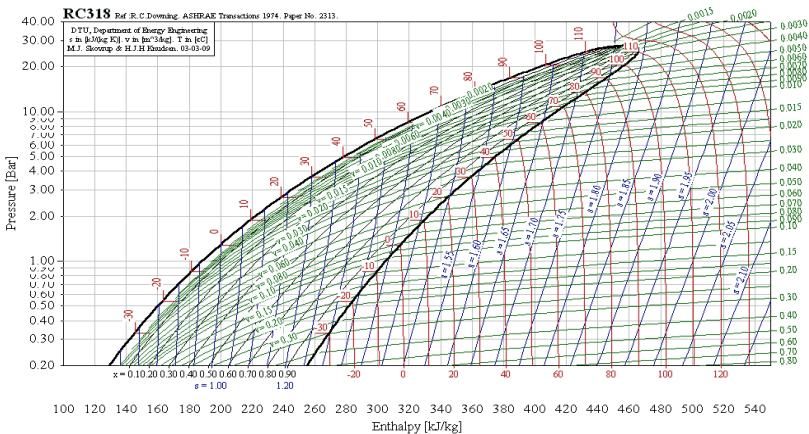


Рис. 1. T, s -диаграмма октафторциклобутана RC-318

Результат работы

В настоящей работе произведен расчет теплонасосной установки в широком диапазоне температур: $t_{\text{исп}}=26^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{конд}}=100^{\circ}\text{C}$ с применением каскадного метода нагрева на основе фреона RC-318. Построена

модель в программном комплексе Termaflex для четырех вариантов теплонасосных установок при различных тепловых режимах.

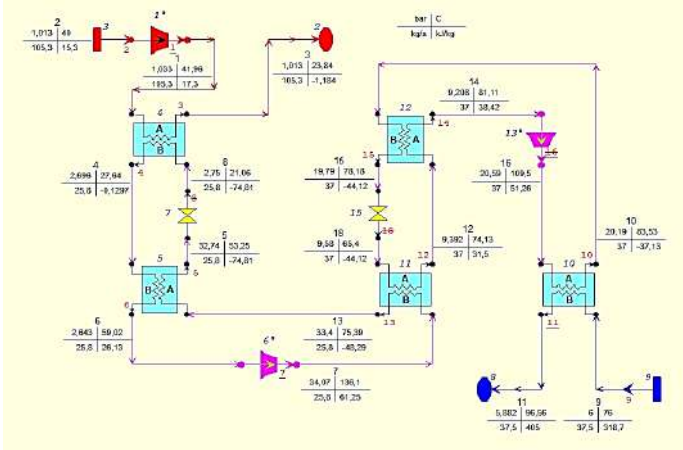


Рис. 2. Модель двухкаскадного нагрева ТНУ

Анализ полученных результатов

В качестве основного показателя выбран COP (Coefficient of Performance) – индекс энергетической эффективности при работе на обогрев.

Таблица 1. Основные параметры ТНУ для 4-х вариантов

ПАРАМЕТРЫ / ВАРИАНТЫ ОХЛАЖДЕНИЯ / МАРКИ ФРЕОНА				Вар.1.1 400-25°C	Вар.1.1 400-30°C	Вар.1.2 400-30°C	Вар.1.2 400-30°C	Вар.2.1 40.5-40°C	Вар.2.1 40.5-40°C	Вар.2.2 40.5-30°C	Вар.2.2 40.5-30°C
	точка применения в программе Termaflex	Обозначения	ед.изм.	RC-318 ступ.1 (40-25°C)	RC-318 ступ.1 (40-25°C)	RC-318 ступ.1 (40-30°C)	RC-318 ступ.1 (40-30°C)	RC-318 ступ.1 (40.5-40°C)	RC-318 ступ.1 (40.5-40°C)	RC-318 ступ.1 (40.5-30°C)	RC-318 ступ.2 (40.5-30°C)
Воздух											
Температура воздуха на входе в ТНУ	2	t в.вх	°C	40		40		40.5			
Энтальпия воздуха на входе в ТНУ	2	h в.вх	kJ/kg	15.3		15.41		24.56			24.07
Температура воздуха после Вентилятора	1	t в.вх	°C	41.96		41.96		50.5			50.51
Энтальпия воздуха после Вентилятора	1	h в.вх	kJ/kg	17.3		17.42		26.65			26.14
Температура воздуха на выходе из ТНУ	3	t в.вых	°C	23.84		28.92		39.16			28.82
Энтальпия воздуха на выходе из ТНУ	3	h в.вых	kJ/kg	-1.18		4.02		14.80			3.91
Расход воздуха	1,2,3	Gv	kg/s	105.30		105.30		105.30			105.30
Фреон											
Температура фреона после дросселия (вход-НХ4)	8	t в.вх	°C	21.06	65.40	26.04	65.40	32.96	65.40	26.04	65.40
Давление фреона после дросселия (вход-НХ4)	8	p в.вх	bar	2.75	9.58	3.23	9.58	4.00	9.58	3.23	9.58
Температура фреона после Испарителя (выход-НХ4 и вход-НХ5)	4	t в.вх	°C	27.64	74.13	31.90	75.13	40.45	77.71	32.73	76.10
Давление фреона после Испарителя (выход-НХ4 и вход-НХ5)	4	p в.вх	bar	2.70	9.39	3.17	9.39	3.92	9.39	3.17	9.39
Температура фреона после Промежуточного (выход-НХ5В)	6	t в.вх	°C	59.02	81.11	60.32	81.38	63.09	82.08	60.61	81.64
Давление фреона после Промежуточного (выход-НХ5В)	6	p в.вх	bar	2.64	9.21	3.11	9.21	3.85	9.21	3.11	9.21
Температура фреона после компрессора (вход-НХ10)	7	t в.вх	°C	136.10	109.50	135.60	109.70	135.80	110.30	135.80	109.90
Давление фреона после компрессора (вход-НХ10)	7	p в.вх	bar	34.07	20.59	34.56	20.59	35.37	20.59	34.56	20.59
Температура фреона после Конденсатора (выход-НХ10)	10	t в.вх	°C	75.39	83.53	75.23	83.56	75.11	83.61	75.26	83.58
Давление фреона после Конденсатора (выход-НХ10)	10	p в.вх	bar	33.40	20.19	33.89	20.19	34.67	20.19	33.89	20.19
Температура фреона перед дросселием (выход-НХ5А)	5	t в.вх	°C	53.25	78.18	54.96	78.75	58.70	80.22	55.38	79.30
Давление фреона перед дросселием (выход-НХ5А)	5	p в.вх	bar	32.74	19.79	33.22	19.19	33.99	19.79	33.22	19.79
Расход фреона		Gf	kg/s	25.80	37.00	18.50	26.00	16.00	22.00	30.60	43.00
Контур ТС											
Энергетические показатели											
Gas/Air compressor: Shaft power required	1		kW	210.60		211.70		220.20			217.00
Refrigerant compressor: Shaft power required	6		kW	906.10	475.10	599.50	334.50	465.10	284.50	993.80	554.50
Plant auxiliary	4		kW	1 926.80	1 665.20	1 207.60		1 028.20		1 844.20	
General HX[4]: Heat transfer	4		kW	1 926.80	2 797.90	1 396.70	1 971.80	1 235.70	1 680.70	2 316.80	3 270.00
General HX[5]: Heat transfer	5		kW	677.40	256.10	444.90	161.80	312.80	96.82	722.60	238.10
General HX[10]: Heat transfer	10		kW	3 238.00	3 238.00	2 281.70	1 945.00			3 784.00	
Refrigerant cycle cooling			kW	4 640.00		3 305.00		2 857.70		5 481.00	
Refrigerant cycle COP				3.739		3.938		4.243		3.940	

COP обозначает соотношение выработанной энергии тепла ($Q_{\text{тн}}$) при полной нагрузке к потребляемой эл.мощности ($N_{\text{тн}} + N_{\text{цн_тп}}$).

Вариант ТНУ номер 2.1, работающий в диапазоне температур $48,5 \div 40,0^\circ\text{C}$ имеет наивысший показатель COP, равный **4.243**. Тогда как вариант ТНУ номер 1.1, работающий в диапазоне температур $40,0 \div 25,0^\circ\text{C}$ имеет наименьший показатель COP.

Можно сделать вывод о том, что индекс энергетической эффективности COP тем выше, чем меньше рабочий диапазон температур и наоборот.

Литература

1. А.В. Попов Российские абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы нового поколения / А.В. Попов // Холодильная техника. 2006. № 6.
2. А.Б. Сулин Тепловые насосы // Университет ИТМО. СПб., 2022г.
3. Д.А. Асонов, Т.Н. Романова Утилизация тепла ЦОД // Международная научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика» г. Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 года, с. 34–37.
4. И.В. Яковлев, Н.В. Авдокунин Эффективность применения сбросного тепла ЦОД // Теплоэнергетика, 2023, №10, с.55–64.
5. О.Б. Цветков Расчет свойств холодильных агентов // Учеб.-метод. пособие. Университет ИТМО, г. СПб., 2016г.

УДК 620.92

А.В. БАННИКОВ, к.т.н., доцент, зав. кафедрой
С.А. БАННИКОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Анализ эффективности эксцентрично смещенной изоляции трубопроводов тепловой сети

Аннотация. Приведены и проанализированы данные математического моделирования работы тепловых сетей с теплоизолирующим покрытием трубопроводов, выполненным монолитно из заливного теплоизоляционного материала, толщина которого увеличивается кверху трубы.

Ключевые слова: тепловая сеть, тепловая изоляция, тепловые потери, математическая модель.

A.V. BANNIKOV, Candidate of Engineering Science, Head of the Department
S.A. BANNIKOVA, Candidate of Engineering Science, Associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Analysis of the efficiency of eccentrically portable valves of global network pipelines

Abstract. The data of mathematical modeling of the operation of heating networks with heat-insulating coating of pipelines, made monolithically from poured heat-insulating material, the thickness of which increases towards the top of the pipe, are presented and analyzed.

Key words: heating network, thermal insulation, heat loss, mathematical model.

Значительным потенциалом энергосбережения топливно-энергетического комплекса являются системы транспортировки тепловой энергии, к основным причинам низкой эффективности которых можно отнести, в том числе, физический и моральный износ их основных элементов. К наиболее часто применяемым решениям данной проблемы можно отнести техническое обновление тепловых сетей систем теплоснабжения.

Рассматривая современные технические решения по повышению эффективности тепловых сетей за счет сокращения тепловых потерь через изоляцию трубопроводов, можно выделить три подхода к повышению эффективности работы тепловых сетей: использование современных и перспективных теплоизоляционных материалов; применение оригинальных технических решений, направленных на изменение конструкции элементов тепловой сети; применение оригинальных технических решений, связанных с использованием теряющейся в окружающую среду тепловой энергии.

Наиболее часто встречающимся решением является использование современных и перспективных теплоизоляционных материалов, позволяющих увеличить термическое сопротивление теплопередаче элементов сети теплоснабжения. К одному из подобных решений относится оригинальное теплоизолирующее покрытие горизонтально расположенного трубопровода [1]. Данная тепловая изоляция, выполненная монолитно из заливного теплоизоляционного материала (пенополиуретана, пенобетона и т.п.) имеет увеличенную толщину к верхней части трубы (рис. 1), что по мнению авторов изобретения, позволяет снизить тепловые потери горизонтально расположенного трубопровода. Авторы указывают, что в стационарных условиях работы трубопровода, транспортирующего подогретую рабочую среду, тепловой поток, который поднимается к верхней половине стенки трубопровода, снижается благодаря увеличению толщины теплоизолирующего покрытия. Цель настоящей работы заключается в анализе эффективности данного технического решения в условиях однетрубной тепловой сети, на основе разработки и исследования математических моделей процессов теплообмена в сети теплоснабжения.

Описание обстоятельств математического моделирования, на основании которого произведены численные расчеты в настоящей работе,

приведено в [2]. Для реализации математических моделей процессов теплообмена в тепловой сети выбран программно-вычислительный комплекс, основанный на методе конечных элементов.

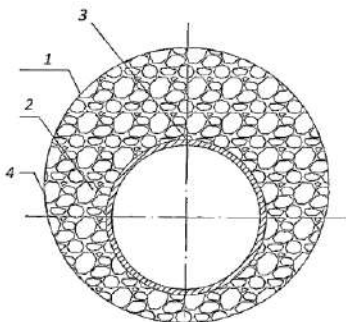


Рис. 1. Поперечный разрез горизонтально расположенного трубопровода с переменной толщиной тепловой изоляции, увеличивающейся к верхней части трубы:
1 – горизонтально расположенный трубопровод; 2 – теплоизолирующее покрытие; 3 – металлический трубопровод; 4 – съемная опалубка

В работе рассмотрена однетрубная тепловая сеть диаметром 200 мм с подземной канальной прокладкой в непроходном канале при ее работе по температурному графику 150/70. Анализ произведен при расчетных параметрах теплоносителя в тепловой сети и окружающей среды. Расчеты произведены для нормативной толщины теплоизоляционного слоя равной 48 мм. Утолщение слоя тепловой изоляции в верхней части горизонтально расположенного трубопровода выполнено путем эксцентричного ее смещения вверх. В работе проанализировано также влияние утолщения тепловой изоляции с нижней ее стороны. В табл. 1 приведены результаты расчета. На рис. 2 показано температурное поле в тепловой сети с указанными вариантами исполнения тепловой изоляции.

Таблица 1. Результаты расчета тепловых потерь через эксцентрично смещенную изоляцию при условии сохранения массы изоляционного слоя

Толщина изоляции в верхней части трубопровода, мм	Толщина изоляции в нижней части трубопровода, мм	Тепловой поток в верхней точке поверхности изоляции, Вт/м ²	Тепловой поток в нижней точке поверхности изоляции, Вт/м ²	Тепловой поток на боковой поверхности изоляции, Вт/м ²	Линейные тепловые потери, Вт/м
Традиционное исполнение тепловой изоляции					
48	48	11,255	31,520	26,532	24,961
Смещение изоляции вверх					
53	43	8,330	37,275	25,298	24,716
58	38	6,203	44,595	23,451	24,797
Смещение изоляции вниз					
43	53	14,604	27,456	27,498	25,493
38	58	18,877	23,523	28,099	26,334

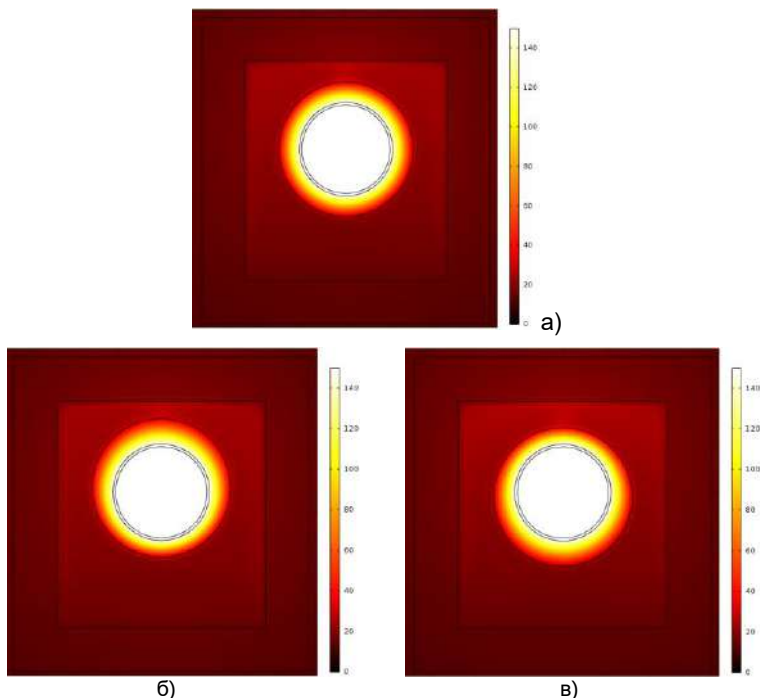


Рис. 2. Температурное поле в однотрубной тепловой сети:

- а) традиционное исполнение тепловой изоляции; б) смещение изоляции кверху;
в) смещение изоляции книзу

Кроме того, в работе проанализировано также влияние утолщения тепловой изоляции с верхней и нижней ее стороны при сохранении минимальной толщины изоляции на уровне нормативного значения. Результаты приведены в табл. 2.

Анализируя все полученные результаты расчета можно утверждать, что наложение на трубопроводы сети теплоснабжения тепловой изоляции предложенной в [1] формы, т.е. полученной за счет эксцентричного смещения изоляционного слоя, при условии сохранения ее массы, позволит снизить линейные тепловые потери в сравнении с традиционной коаксиальной изоляцией на 1%. Эксцентричное смещение теплоизолирующего слоя вниз приводит к увеличению (до 6%) тепловых потерь. Увеличение толщины теплоизоляционного слоя при сохранении минимальной толщины изоляции на уровне нормативного значения приводит, с одной стороны, к снижению тепловых потерь, а с другой, к увеличению количества изоляционного материала. Очевидно, что в этом случае величина снижения тепловых потерь напрямую зависит от степени увеличения толщины изоляции.

Таблица 2. Результаты численного расчета

Толщина изоляции в верхней части трубопровода, мм	Толщина изоляции в нижней части трубопровода, мм	Тепловой поток в верхней точке поверхности изоляции, Вт/м ²	Тепловой поток в нижней точке поверхности изоляции, Вт/м ²	Тепловой поток на боковой поверхности изоляции, Вт/м ²	Линейные тепловые потери, Вт/м	Эффективность*, %
Традиционное исполнение тепловой изоляции						
48	48	11,255	31,520	26,532	24,961	-
53	53	9,615	28,351	23,937	23,026	7,75
58	58	8,735	25,529	21,691	21,503	13,85
63	63	24,021	22,373	19,421	20,065	19,61
Увеличение толщины верхней части изоляции						
58	48	7,836	33,160	22,761	22,869	8,34
68	48	4,901	35,694	19,103	21,159	15,23
78	48	9,104	32,672	16,250	20,161	19,23
Увеличение толщины нижней части изоляции						
43	53	14,604	27,456	27,498	25,493	-2,13
48	58	12,397	24,716	24,747	23,519	5,78
48	68	13,308	21,012	22,678	22,711	9,01
48	78	13,979	16,039	20,629	21,284	14,73

* под эффективностью подразумевается снижение линейных тепловых потерь по сравнению с потерями трубопровода с толщиной изоляции 48 мм

Литература

1. Теплоизолирующее покрытие горизонтально расположенного трубопровода: пат. 123490 Рос. Федерация: МПК F16L 59/00 (2006.01) / Иванов Д.И., Видин Ю.В., Евтихов Ж.Л., Федюкович А.К.; Заявитель и патентообладатель Иванов Д.И.; заявл. 2012122129/28; опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36.

2. Банникова, С.А. Математическое моделирование теплопереноса в непроходных каналах тепловых сетей / С.А. Банникова // Вестник ИГЭУ. 2022. №1. С. 12–21.

УДК 662.99

А.А. ЛИТВИНЕНКО¹, аспирант
В.Ю. БАШКИНОВ², инженер-программист,
Ю.В. ВАНЬКОВ³, д.т.н.

^{1,3}ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

²ООО «АСБИ-инжиниринг»

420032, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Табейкина, д. 19А

Email: annaannaaver@gmail.com

Стенд диагностики технического состояния теплообменных аппаратов

Аннотация. В статье описывается стенд диагностики технического состояния рекуперативных теплообменных аппаратов и разработка автоматизации данного стенда.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, диагностика, автоматизация.

A.A. LITVINENKO¹, PhD student
V.Y. BASHKINOV², software engineer,
Yu.V. VANKOV³, DScTech

^{1,3}Kazan State Power Engineering University
51 Krasnoselskaya str., Kazan, 420066
²ООО "ASBI-engineering"

420032, Republic of Tatarstan, Kazan, Tabeikina str., 19A
Email: annaannaaver@gmail.com

Diagnostic stand for the technical condition of heat exchangers

Annotation. The article describes a diagnostic stand for the technical condition of regenerative heat exchangers and the development of automation of this stand.

Key words: heat exchanger, diagnostics, automation.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) играют ключевую роль в современных отраслях, таких как энергетика и нефтегазовая промышленность. Эти системы обеспечивают эффективное управление сложными производственными процессами, что особенно важно в условиях стремительно меняющегося рынка и растущих требований к безопасности и экологии.

АСУ ТП позволяют не только контролировать и регулировать процессы в реальном времени, но и осуществлять прогнозирование и анализ данных, что является необходимым для принятия обоснованных управленческих решений.

Большинство процессов в нефтегазовой и энергетической отрасли осуществляются с необходимостью рекуперации тепловой энергии, для этого используют теплообменные аппараты (ТА). В зависимости от отрасли доля ТА в технологических процессах может варьироваться от 20% до 35%. Одной из главных проблем эксплуатации ТА является появление на стенках аппаратов различных отложений.

Наличие отложений снижает теплопередачу, соответственно, температура греющей среды на выходе из ТА будет завышена, а нагреваемой среды будет ниже требуемой. В технологическом цикле, где потоки должны иметь определенные температуры, низкая теплопередача аппаратов приводит к увеличению топливных затрат или горячих утилит для дополнительного нагрева потока или холодных утилит для дополнительного охлаждения. Наличие отложение также уменьшает проход-

ное сечение в трубах из-за чего увеличивается гидравлическое сопротивление аппарата. Рост гидравлического сопротивления ведет к увеличению потребляемой мощности насосов и расхода электроэнергии на собственные нужды.

Значительная доля ТА в производственных циклах и влияние наличия отложений на технико-экономические показатели предприятия диктует необходимость проведения своевременной диагностики технического состояния ТА.

Автором был разработан способ автоматической диагностики наличия отложений на стенках рекуперативного ТА [1]. Способ заключается в сравнении «текущих» (полученных в ходе эксплуатации) значений температурного напора и гидравлического сопротивления с их «эталонными» показателями.

С целью подтверждения эффективности методики был смонтирован стенд, принципиальная тепловая схема стенда показана на рис. 1. Циркуляция теплоносителей в греющем и нагреваемом контуре обеспечивается насосами (4). Нагрев теплоносителя в греющем контуре осуществляется электрическим котлом (1), а охлаждение теплоносителя в нагреваемом контуре происходит за счет вентилятора (3), процесс рекуперации протекает в ТА (2).

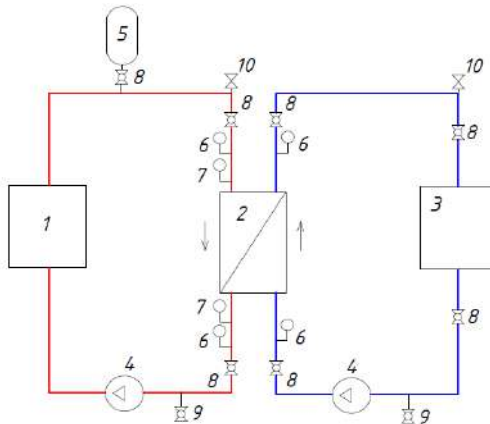


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема стенда:

- 1 – котел; 2 – пластинчатый теплообменник; 3 – вентилятор и радиатор охлаждения;
- 4 – циркуляционный насос; 5 – расширительный бак;
- 6 – датчик температуры; 7 – датчик давления; 8 – кран шаровой DN25;
- 9 – кран шаровой DN15; 10 – кран Маевского

Автоматизация стенда построена на основе программируемого реле (ПР) с графическим дисплеем ПР205. На входе и выходе греющей и нагреваемой среды ТА установлены датчики температуры ОВЕН

ДТС.054, также на входе и выходе греющей среды ТА установлены датчики давления ПД100. Аналоговые датчики температуры и давления подключаются к ПР205 и по сигналу 4...20 мА передают данные. На рис. 2 показан интерфейс экрана №1 ПР с выводом основных параметров ТА – значений температуры и давления.

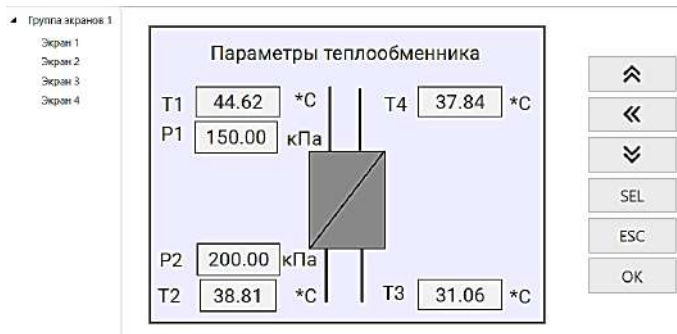


Рис. 2. Интерфейс экрана 1 ПР205 – вывод значений температуры и давления



Рис. 3. Интерфейс экрана 2 ПР205 – вывод значений эталонных и текущих значений ТН и ГС (случай, когда оба «текущих» значения не отклоняются от «эталонных» на 30%)

Логика контроллера прописана в программе Oven Logic и построена следующим образом: при вводе в эксплуатацию ТА или после проведения технического обслуживания ПР рассчитывает температурный напор (ТН) и гидравлическое сопротивление (ГС) ТА и принимает эти значения как «эталонные». Затем, в процессе эксплуатации ПР осуществляет расчет «текущих» значений ТН и ГС и сравнивает полученные значения с «эталонными». При одновременном отклонении «текущих» значений ТН и ГС от «эталонных» на более, чем 30%, на экране ПР «зеленый круг» сменится на «красный», что будет означать о наличии отложений в ТА и необходимости проведения очистки (рис. 3,4).



Рис. 4. Интерфейс экрана 2 PR205 – вывод значений эталонных и текущих значений ТН и ГС (случай, когда оба «текущих» значения отклоняются от «эталонных» на 30%)

На рис. 5 показан интерфейс экрана 5 PR 205, в котором отображается информация по проценту отклонения «текущих» значений ГС и ТН от «эталонных».

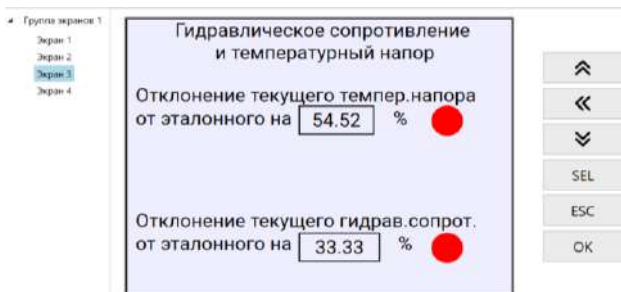


Рис. 5. Интерфейс экрана 3 PR 205 – вывод процентов отклонения «текущих» значений ТН и ГС от «эталонных»

Таким образом, разработанная автоматическая система диагностики наличия отложений в рекуперативных теплообменных аппаратах позволит проводить мониторинг в реальном времени технического состояния внутренней поверхности ТА, осуществлять своевременные мероприятия по очистке от отложений или же наоборот, не выводить оборудование в техническое обслуживание, что повысит эффективность работы ТА и технико-экономические показатели технологических процессов.

Литература

1. Пат. №2808982, Российская Федерация, Способ автоматической диагностики наличия отложений на стенках рекуперативного теплообменного аппарата / Аверьянова А.А., АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа», №2808982, опубли. 05.12.2023

УДК 621.165.665.62

Д.И. ГОРЧАКОВ, студент

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: fgh72387@gmail.com

Комбинированная схема утилизации попутного нефтяного газа

Аннотация. В статье представлена новая технологическая конфигурация утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ), предусматривающая замену сжигания газа в газовой турбине на использование специализированного котла с последующей выработкой пара и электроэнергии. Предложенная схема демонстрирует более высокую эффективность, экономическую целесообразность и потенциал практического применения в сравнении с существующими методами утилизации ПНГ.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ (ПНГ), утилизация газа, паротурбинная схема, энергетическая эффективность, электрогенерация.

D.I. GORCHAKOV Student

Gagarin Y.A. Saratov State Technical University
77, Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054
E-mail: fgh72387@gmail.com

Combined scheme of associated petroleum gas utilization

Abstract. The article presents a new technological configuration of associated petroleum gas (APG) utilization, which involves replacing gas combustion in the gas turbine to the use of a specialized boiler with subsequent generation of steam and electricity. The proposed scheme demonstrates higher efficiency, economic feasibility and potential for practical application in comparison with existing methods of APG utilization.

Key words: associated petroleum gas (APG), gas utilization, steam turbine scheme, energy efficiency, power generation.

В исследовании [1] предложена модель комбинированного использования попутного нефтяного газа (ПНГ), основанная на его одновременной закачке в нефтяной пласт и сжигании в турбоагрегате для выработки электроэнергии. Однако данный подход имеет существенный недостаток, связанный с процессом сжигания ПНГ в газовой турбине. Согласно исследованию [2], при сжигании ПНГ образуются оксиды серы и сажа, которые отлагаются на лопатках турбины, что приводит к разбалансировке и последующему выходу агрегата из строя.

Необходимо отметить, что состав ПНГ характеризуется значительной вариативностью не только между различными месторождениями, но и в пределах одного месторождения с течением времени. Данное обстоятельство указывает на необходимость модификации или полного пересмотра схемы, представленной в работе [1].

В настоящее время около 17% ПНГ по-прежнему сжигается на факелах, 50% используется для генерации электроэнергии, а 33% – в технических процессах [5]. Это указывает на необходимость более эффективного использования ресурсов и снижения потерь.

В результате модернизации исходной схемы была разработана новая технологическая конфигурация, представленная на Рисунке 1. Ключевым отличием является замена процесса сжигания ПНГ в газовой турбине на его сжигание в специализированном котле с последующей выработкой пара повышенных параметров и его направлением в паровую турбину. Специализированный котёл отличается от обычного тем, что в конвективной части обычные стальные трубы были заменены на сталь марки 09Г2С, обладающую повышенной коррозионной стойкостью [3].

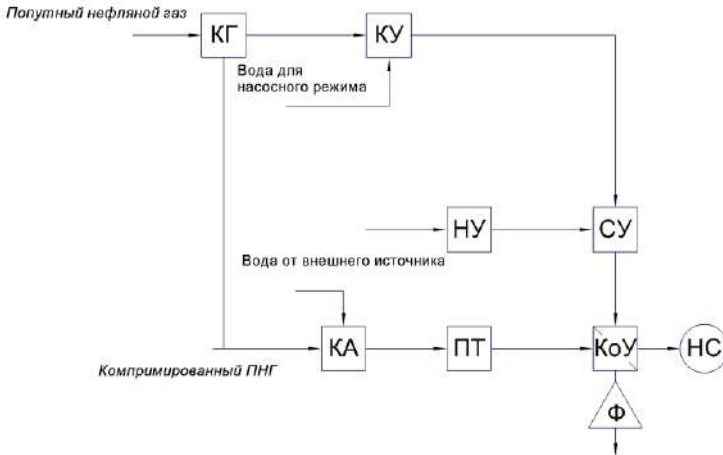


Рис. 1. Комбинированная схема утилизации попутного нефтяного газа:
 КГ - Компрессирование газа; КУ - Компрессорная установка; НУ - Насосная установка; СУ - Смесительное устройство; КА - Котельный агрегат; ПТ - Паровая турбина; КУ - Котёл-утилизатор; НС – Нагнетательная скважина; Ф – Фильтр

Применение котла из специальных материалов в сравнении с газовой турбиной обусловлено не только техническими, но и экономическими факторами. Газовая турбина требует дорогостоящего производства и сложного технического обслуживания, что делает её менее рентабельной для утилизации ПНГ. Использование специализированного котла позволяет избежать этих проблем, обеспечивая более стабильную работу, увеличенный срок службы оборудования и снижение затрат на эксплуатацию.

Несмотря на очевидные преимущества паротурбинной схемы, дале-

ко не все производители занимаются внедрением подобных решений. В настоящее время значительная часть ПНГ продолжает сжигаться или использоваться в малоэффективных процессах, что приводит к значительным потерям потенциальной энергии.

Вывод: на основании проведенного анализа можно заключить, что предложенная схема, несмотря на более высокие капитальные затраты, демонстрирует повышенный потенциал практического применения за счёт более эффективного использования ресурсов и увеличенной выработки электроэнергии.

Литература

1. Шишкин Н.Д., Трофименко К.В. Энерготехнологическая схема утилизации попутного газа // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2010. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energotehnologicheskaya-shema-utilizatsii-poputnogo-gaza> (дата обращения: 20.02.2025).
2. Рустамов З.А., Брюхова К.С. Проблема утилизации попутного нефтяного газа. Анализ и современное состояние // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. №58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-utilizatsii-poputnogo-neftyanogo-gaza-analiz-i-sovremennoe-sostoyanie> (дата обращения: 20.02.2025).
3. Шеин В.М., Краснова Н.П. Применение попутного нефтяного газа в тепло и электроэнергетике, как способ его утилизации // Энерго- и ресурсосбережение. 2017. С. 651-656. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/57745> (дата обращения: 20.02.2025).
4. Сайфуллин Э.Р., Ларионов В.М., Ваньков Ю.В. Численное моделирование стабилизации теплопроизводительности парового котла при сжигании ПНГ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2019. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie> (дата обращения: 20.02.2025).
5. Рядинская А.П., Череповицына А.А. Утилизация попутного нефтяного газа в России: методы и перспективы производства продуктов газохимии // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2022. № 2. С. 19–34. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2022.76.002

УДК 536.248.2

Ю.В. ВАНЬКОВ, д.т.н.,
Р.А. ПОНОМАРЕВ, ассистент

Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, д.51
E-mail: romanponomarevich@mail.ru

Построение модели плавления парафина в АТФП с ребристым теплообменником

Аннотация. В работе описана методика построения расчетной модели аккумулятора тепла фазового перехода в Comsol Multiphysics. Приведен график процесса фазового перехода в зависимости от времени нагрева

Ключевые слова: аккумулятор тепла, фазовый переход, моделирование, ребристый теплообменник

Yu. V. VANKOV, PhD,
R. A. PONOMAREV, assistant

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, Krasnoselskaya st., 51
E-mail: romanponomarevich@mail.ru

Construction of a model of paraffin melting in ATP with a finned heat exchanger

Abstract. The paper describes a method for constructing a computational model of a phase transition heat accumulator in Comsol Multiphysics. The graph of the phase transition process as a function of the heating time is given.

Key words: heat accumulator, phase transition, simulation, finned heat exchanger

В настоящее время создание цифровых двойников является неотъемлемой частью при разработке различных промышленных продуктов. Работа с цифровой моделью позволяет моделировать различные физические и технологические процессы, а также визуально показывать изменение элементов модели в течении времени.

В данной работе проводилось построение модели аккумулятора тепла фазового перехода (АТФП) в программе Comsol Multiphysics. В расчете не учитывался конвективный теплоперенос между жидкой и твердой фазой парафина, геометрия построена как осесимметричная 2D модель.

АТФП состоит из теплоаккумулирующего материала, внутри которого находится медный теплообменник. Теплоаккумулирующий материал имеет форму цилиндра (диаметр – 120 мм, высота – 190 мм). Теплообменник выполнен из трубки (диаметр – 10х1 мм, высота - 250 мм) и присоединенных к ней круглых пластин (число кругов – 6, диаметр – 95 мм, толщина – 1 мм, расстояние между пластинами – 30 мм). После построения геометрии в подразделе «Materials» происходит задание параметров свойств исследуемых материалов. Теплофизические свойства парафина, в частности плотность и теплопроводность, при разных агрегатных состояниях меняются, поэтому каждое фазовое состояние задается отдельно.

Задание граничных условий осуществляется в подразделе дерева модели под названием «Heat Transfer in Solids and Fluids». Температура теплоносителя на входе в теплообменник задана с помощью команды «Inflow». Задание параметров фазового перехода задается командой «Phase Change Material». Используемая модель режима течения теплоносителя к-ε [1], входные и выходные параметры потока взяты из результатов экспериментов с АТФП с другой теплообменной поверхностью [2]. Затем задается связывание теплообмена с течением теплоносителя в мультифизическом интерфейсе «Nonisothermal flow».

Настройка расчётной сетки осуществляется в подразделе «Mesh», она разбивает модель на множество элементов, в данном случае треугольники (рис. 1), и программа производит решение задачи методом конечных элементов. Точность результатов напрямую зависит от раз-

меров элементов расчетной сетки, чем они меньше, тем точнее будет конечный результат. Для рассмотрения процесса плавления парафина в разные моменты времени, в решателе «Time Dependent» выбран интервал 0-6000 с, с шагом 6 секунд.

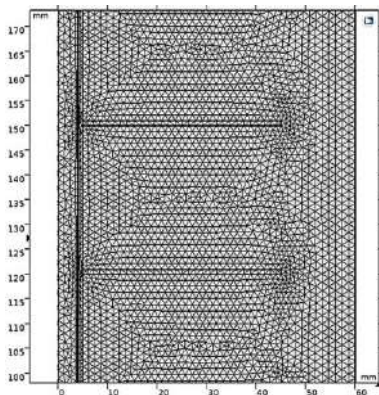


Рис. 1. Модель сетки АТФП

На рис. 2, показано температурное АТФП после 100 минут нагрева. На нем можно увидеть показания температуры АТФП по всей геометрии модели. Для демонстрации фазового перехода приведен график изменения температуры парафина по всей его толщине в зависимости от времени нагрева (рис. 3). На графике представлены показания температур от теплообменной поверхности до границы модели парафина. Линии на графике обозначают температуру парафина через: (1) = 0 мин; (2) = 20 мин; (3) = 40 мин; (4) = 60 мин; (5) = 80 мин; (6) = 100 мин времени нагрева.

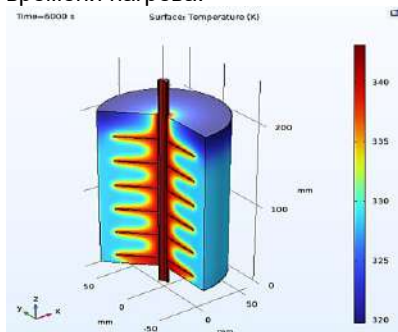


Рис. 2. Температурное поле модели после 100 минут нагрева

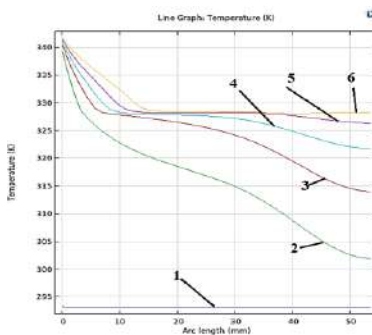


Рис. 3. Температурный график парафинового слоя в разные моменты времени

На нем можно заметить, что по достижению температуры фазового перехода 329 К, кривые температур выходят на полку. Это показывает, что тепловая энергия затрачивается на фазовое превращение, и температура границы раздела фаз будет одинаковая.

Вывод. В результате проведенного исследования построена математическая модель АТФП с ребристым теплообменником и описана методика ее построения. Получен график зависимости фазового перехода от времени нагрева.

Исследования выполнены по государственному заданию с номером соглашения 075-03-2024-226 от 15.02.2024.

Литература

1. Ходяшов Е.О. Повышение эффективности теплообменного оборудования путём применения математического моделирования //Иновационное развитие техники и технологий в промышленности. 2023. С. 254-257.
2. Vankov Y. et al. Intensification of heat exchange with a modified coolant in phase transition heat accumulators //E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2024. T. 592. С. 03005.

УДК 662.99

А.Р. ТИМЕРШИН, аспирант
Ю.В. ВАНЬКОВ, д.т.н, профессор
Л.В. ПЛОТНИКОВА, к.т.н., доцент

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская д.51.
E-mail: timer.az@yandex.ru, yvankov@mail.ru, mikhailovalv@mail.ru

Способы компримирования дымовых газов для добычи высоковязкой нефти

Аннотация. В работе рассмотрены возможные варианты компримирования дымовых газов промышленной котельной для повышения эффективности добычи высоковязкой нефти, производимой посредством паротеплового воздействия на продуктивный пласт методом парогравитационного дренирования.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, нефтедобыча, дымовые газы, компримирование, парогравитационное дренирование.

A.R. TIMERSHIN, post-graduate student, assistant
Yu.V. VANKOV, Doctor of Technical Sciences, professor
L.V. PLOTNIKOVA, Candidate of Technical Sciences, associate professor

Kazan State Power Engineering University
51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066.
E-mail: timer.az@yandex.ru, yvankov@mail.ru, mikhailovalv@mail.ru

Methods of flue gas compression for high-viscosity oil production

Abstract. The paper considers possible options for compressing flue gases of an industrial boiler house to improve the efficiency of high-viscosity oil production produced by means of steam-thermal action on a productive formation using the steam assisted gravity drainage method.

Key words: high viscosity oil, oil production, flue gases, compression, steam-assisted gravity drainage.

В настоящее время существует необходимость повышения эффективности добычи высоковязкой нефти и природных битумов в виду снижения запасов легкоизвлекаемых залежей. Основное препятствие широкого распространения использования сверхвязкой нефти заключается в трудности добычи и переработки [1].

Высокую эффективность показывают тепловые методы извлечения высоковязких нефтей, к которым и относится метод парогравитационного дренирования. При использовании тепловых методов достигаются высокие коэффициенты извлечения, однако часто возникают проблемы с эксплуатационной эффективностью.

Эффективность эксплуатации связана с высокими затратами на производство пара и очистку добываемой воды. Решением данной проблемы может являться снижение объема закачиваемого пара к единице добытой нефти. Этого можно добиться, заместив часть пара дымовыми газами, производимыми на котельной. При этом сократится негативное воздействие промышленных выбросов в атмосферу, и, как следствие, произойдет снижение теплового воздействия на окружающую среду. Помимо прочего повысится эффективность нефтедобычи за счет входящих в состав дымовых газов CO_2 и N_2 . При взаимодействии данных газов с нефтью происходит снижение ее вязкости, а также увеличение коэффициента вытеснения [2].

Основной проблемой закачки дымовых газов с котельной является необходимость обеспечения значительной степени сжатия. Для сжатия дымовых газов и получения смеси необходимых параметров требуется поиск и анализ сочетаний различного компрессорного оборудования [3].

Для получения парогазовой смеси необходимых параметров предлагаются 2 схемы, представленные на рис. 1 и 2.

В **первом варианте** (рис. 1) для компримирования дымовых газов предлагается использовать многоступенчатую поршневую компрессорную установку 2. В качестве исходной среды выступает газ 5 после утилизационных устройств. Данное решение обусловлено необходимостью подведения на линию всаса компрессора дымовых газов с минимальной температурой для повышения эффективности работы компрессорной установки, а также для удаления образовавшейся в процессе горения воды, чтобы не допустить образования угольной кислоты, так как она может привести к коррозии скважины и сопутствующего оборудования. Также предусмотрена установка устройства для снижения концентрации кислорода 3. Это также необходимо для снижения коррозионной активности потока.

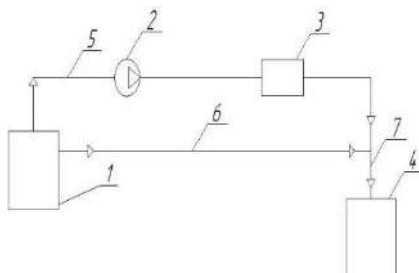


Рис. 1. Схема заправки дымовых газов с использованием компрессорной установки: 1 – котел; 2 – компрессорная установка; 3 – устройство удаления кислорода; 4 – скважина; 5 – поток дымовых газов; 6 – поток рабочего пара; 7 – поток парогазовой смеси

Недостатком данной схемы является необходимость введения дополнительных теплообменных поверхностей и охлаждающей среды для промежуточного охлаждения дымовых газов. Также необходима установка устройства смешения потока пара 6 и дымовых газов 5, для получения парогазовой смеси 7.

Во **втором варианте** (рис. 2) предлагается трехступенчатая схема сжатия, состоящая из компрессора 2, пароструйного компрессора 4 для получения парогазовой смеси и конечного компрессора 5 для сжатия получившейся смеси до требуемого давления.

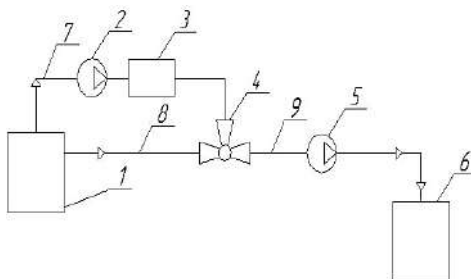


Рис. 2. Трехступенчатая схема заправки дымовых газов:

1 – котел; 2 – компрессорная установка; 3 – устройство удаления кислорода; 4 – пароструйный компрессор; 5 – компрессор парогазовой смеси; 6 – скважина; 7 – поток дымовых газов; 8 – поток рабочего пара; 9 – поток парогазовой смеси

Решение произвести сжатие поэтапно обусловлено возможностью использовать одноступенчатое компрессорное оборудование для сжатия газа, что позволяет снизить количество используемого охлаждающего агента. Также преимуществом данного варианта является наличие в схеме пароструйного компрессора, что дает возможность полезно использовать имеющийся избыток давления пара, также немаловаж-

ным является то, что пароструйный компрессор выступает в качестве смесительного оборудования.

Недостатком же данной схемы является необходимость ввода компрессорного оборудования для сжатия водяного пара, что является специфической задачей, требующей специализированного оборудования, способного к высокотемпературному сжатию, чтобы не допустить конденсации водяных паров. Подобное оборудование является более энергозатратным и дорогим.

Для определения наилучшего варианта необходимо производить тщательный анализ конкретного месторождения, так как на эффективность той или иной схемы влияет множество факторов.

Литература

1. Алтунина Л.К. и др. Тенденции и перспективы развития физико-химических методов увеличения нефтеотдачи месторождений тяжелой нефти // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. №. 3. С. 261-277.

2. Литературный анализ способов закачки дымового газа с паром / Е.А. Бурлуцкий, Р.Х. Садреева, А.А. Залятдинов [и др.] // Нефтяная провинция. 2023. № 4-2(36). С. 319-346.

3. Тимершин, А.Р., Плотникова, Л.В., Ваньков, Ю.В. Возможности использование дымовых газов котельной для добычи высоковязкой нефти / А.Р. Тимершин, Л.В. Плотникова, Ю.В. Ваньков [Текст] // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Альметьевск, 2024. С. 484-487.

УДК 621.355

Д.Е. ШАРАФИЕВ, ассистент,
Ю.В. ВАНЬКОВ, д.т.н,
К.Р. ХУСНУТДИНОВА, студент

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская д.51
E-mail: shd.kgeu@mail.ru, yvankov@mail.ru, kamel2003@mail.ru

Влияние различных аморфных веществ на процесс заряда теплового аккумулятора

Аннотация. В данной статье будет произведен анализ результатов экспериментальных исследований процесса заряда АФП с различными теплоаккумулирующими веществами.

Ключевые слова: тепловое аккумулирование, парафин, стеариновая кислота, фазовый переход

D.E. SHARAFIEV, assistant,
Yu.V. VANKOV, PhD
K.R. KHUSNUTDINOVA, student

Kazan State Power Engineering University
51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066
E-mail: shd.kgeu@mail.ru, yvankov@mail.ru, kamel2003@mail.ru

The influence of various amorphous substances on the process of charging a heat accumulator

Abstract. This article will analyze the results of experimental studies of the PCA charge process with various heat storage substances.

Key words: thermal accumulation, paraffin, stearic acid, phase transition.

В настоящее время на объектах промышленности, а также в сфере частного энергопотребления имеется ряд проблем, связанных с требованием уменьшения расхода потребляемых ресурсов, а также теплового аккумулирования в рамках повышения энергетической эффективности.

На смену традиционным технологиям аккумулирования тепловой энергии приходит аккумулирование посредством тепловых аккумуляторов на фазовом переходе (АФП) [1].

В качестве рабочего тела в АФП используют теплоаккумулирующие материалы (ТАМ), которые позволяют накапливать больше энергии за счет скрытой теплоты фазового перехода [2].

Экспериментальные исследования процесса заряда АФП были произведены с разработанной моделью аккумулятора, конструкция которого представлена на рис.1.

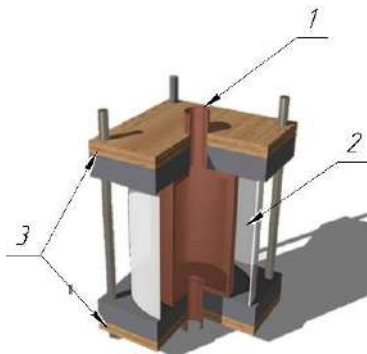


Рис. 1. Конструкция АФП: 1 - теплообменная медная поверхность, 2 - корпус АФП, 3 - верхняя и нижняя крышки

Термопары внутри рабочего пространства АФП располагались на разных глубинах, что позволяло оценивать температурное и агрегатное состояние рабочего тела в нижнем, среднем и верхнем слоях одновременно. Фиксация температур производилась хромель-алюмелевыми термопарами, подключенными к измерителю ОВЕН УКТ-38.

Для предотвращения тепловых потерь в окружающую среду была использована дополнительная изоляция из аэрогелевого композита.

В качестве рабочего тела были использованы парафин и стеариновая

кислота. Основные свойства данных веществ представлены в табл 1.

Таблица 1. **Основные свойства использованных теплоаккумулирующих материалов**

Параметр	Вид ТАМ	
	Парафин	Стеариновая кислота
Температура плавления, °С	55	60
Теплопроводность, Вт/(м·°С):		
твердая фаза	0,26	0,410
жидкая фаза	0,19	0,20 - 0,10
Теплота фазового перехода, кДж/кг	210	191

После обработки данных основные результаты экспериментальных исследований были занесены на табл. 2.

Таблица 2. **Результаты экспериментальных исследований**

Исследуемый параметр	Вид рабочего тела АФП	
	Парафин	Стеариновая кислота
Полное время заряда АФП, ч:мин	3:35	7:50
Средняя температура АФП, °С	65,7	65,8

За время полного заряда АФП было принят момент, в который изменение средней температуры ТАМ было минимальным.

Выводы. По результатам исследований было выявлено:

1) в случае, когда скорость процесса заряда является ведущим фактором при выборе рабочего тела для АФП, то применение парафина наиболее целесообразно, так как в модели АФП с рабочим телом – парафином, процесс заряда протекает на 54% быстрее, при этом установившаяся средняя температура меньше лишь на 0,15%;

2) при рассмотрении вопроса о количестве тепла, которое способны накопить рассмотренные модели при плавлении твердого рабочего тела (ТАМ), а также тепла, которое может быть запасено за счет теплоемкости жидкого ТАМ, было замечено, что конечное значение для рассмотренных моделей отличается на 2-3% в сторону парафина. Расчет был произведен по формуле 1.

$$Q = m \cdot L + m \cdot c_{ж} \cdot (T_{п} - T_{кр}) \quad (1)$$

где, m – масса загруженного ТАМ, кг; L – теплота фазового перехода, кДж/кг; $c_{ж}$ – теплоемкость ТАМ в жидком фазовом состоянии, кДж/(кг·°С); $T_{п}$ – температура перегрева ТАМ выше температуры кристаллизации, °С; $T_{кр}$ – температура кристаллизации ТАМ, °С.

3) в процессе экспериментов было замечено, что стеариновая кислота вступает в химическую реакцию с медью – материалом, который используется в качестве теплообменной поверхности в разработанных моделях АФП, и ТАМ приобретает светло-бирюзовый окрас, характеризующий образование такого вещества, как стеарат меди, при этом структура

твёрдого ТАМ остается неизменной (рис. 2);



Рис. 2. Внешний вид рабочего тела - стеариновой кислоты
слева - в начале эксперимента, справа - по окончании эксперимента

4) с экономической точки зрения применение парафина в качестве рабочего тела АФП будет 2,3-2,6 раза дешевле, а ввиду отсутствия весомых преимуществ у стеариновой кислоты в процессе эксплуатации в АФП, данный фактор будет также иметь большое значение при выборе ТАМ.

Исследования выполнены по государственному заданию с номером соглашения 075-03-2024-226 от 15.02.2024 г.

Литература

1. Razmat Makhmudov Mirzo Ulugbek, Samarkand Shavkat. Experimental technique for a heat storage model with a phase transition of substance // Universum. 2021. №5. 5 p.
2. Eletsii A.V. Phase Change Materials with Enhanced Thermal Conductivity and Heat Propagation in Them // Physchem. 2022. Т. 2. №. 1. С. 18-42.

УДК 620.192

Т.О. ПОЛИТОВА, ст. преподаватель

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: politovatatiana@yandex.ru

Использование метода k-ближайших соседей в обнаружении утечек трубопровода

Аннотация. В работе представлено исследование возможности использования искусственного интеллекта для нахождения течи, используя данные для обучения, полученные с помощью виброакустических датчиков.

Ключевые слова: утечки, трубопровод, контроль трубопровода

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya Str.
E-mail: politovatyana@yandex.ru

Using the k-nearest neighbors method in detecting pipeline leaks

Abstract. The paper presents a study of the possibility of using artificial intelligence to find leak detection using training data obtained using vibroacoustic sensors..

Key words: leaks, pipeline, pipeline control

Трубопроводы являются одним из важнейших элементов энергетических систем и комплексов. От их технического состояния зависит надежность энергоснабжения промышленных предприятий и коммунального сектора. Утечки в трубопроводных системах могут оставаться незамеченными в течение длительного периода времени и приводить к значительному экономическому ущербу, накоплению транспортируемых продуктов в почве, грунтовых водах, что приводит к экологическим нарушениям.

В связи с высоким износом элементов трубопроводного транспорта, актуальными являются вопросы разработки методов мониторинга их технического состояния.

Системы обнаружения утечек в трубопроводе в последние годы приобретают все большую популярность. И это неслучайно, так как в самых различных отраслях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства используются тысячи километров трубопроводов. Они предназначены для транспортировки различных видов продукта: водяного пара, воды, масла, газа, воздуха, мазута, имеют разную конфигурацию и диаметры. Расположение трубопроводов бывает, как наземное, так и подземное, доступ к ним чаще всего затруднен из-за прокладки трубопровода под слоем грунта, воды, или же доступ к ним может быть опасен для человека.

Для получения экспериментальных данных необходимые для дальнейших исследований была разработана экспериментальная установка.

Структурная схема экспериментальной установки представлены на рис. 1.

В качестве моделей дефектов трубопроводов использовали диски с отверстиями разного диаметра (от 1 до 8 мм), показанные на рис. 2. Диски были установлены и закреплены на фитинге, приваренном к трубе (рис. 3).

В ходе экспериментов были получены сигналы вибрации бездефектного трубопровода и с различными дефектами при прохождении по нему воды под давлением от 2 до 3,5 бар.

Для распознавания и классификации дефектов трубопроводов по их акустическим сигналам предлагается использовать алгоритмы машинного обучения. Преимуществом нейронных сетей является их способ-

ность обучаться выполнению задач на основе данных, которые сеть получает в процессе реальной работы.

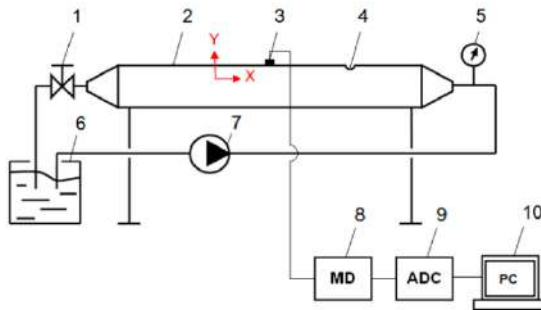


Рис.1. Экспериментальное устройство: 1 - клапан; 2 - трубопровод; 3 - датчик виброускорения AR2038R; 4 - дефект; 5 - манометр; 6 - бак с водой; 7 - насос LEO XKJ - 900 I; 8 - согласующее устройство AG01-3; 9 - аналого-цифровой преобразователь NI USB-6229; 10 - компьютер

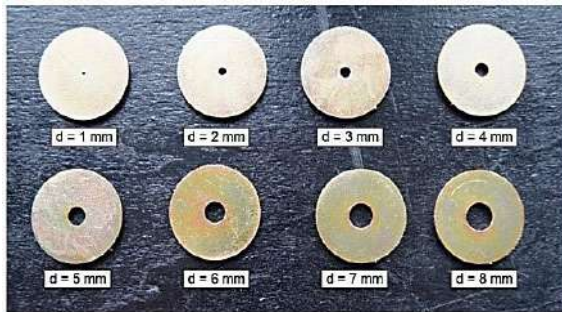


Рис. 2. Диски симуляции дефекта отверстия разного диаметра



Рис. 3. Способ крепления дисков на трубопроводе: вид сбоку

Метод k -ближайших соседей. Это метод непараметрического классификации и регрессии. Для классификации нового объекта он находит k ближайших к нему объектов в обучающей выборке и присваивает ему класс, наиболее распространенный среди этих k соседей. Для регрессии вычисляется среднее значение целевой переменной у k ближайших соседей. Выбор параметра k важен для производительности метода.

Использование искусственного интеллекта для определения течискания трубопровода возможно, что свидетельствует высокий процент верно определенного класса неисправности и высокий процент точности.

Вывод: метод k -ближайших соседей быстро обучается, несмотря на огромный массив из 7 миллионов значений. Высокий процент прогнозирования верных классов. За весь процесс работы с данным методом не было ошибочных прогнозирований бездефектного трубопровода, с редкими и незначительными промахами определялся машиной как бездефектный, а что касается дефектов, таких как трещины или отверстия, метод верно прогнозировал результат, что в испытательном стенде имеется дефект.

Литература

1. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Zagretdinov A.R. Low-frequency Vibro-acoustic Method of Determination of the Location of the Hidden Canals and Pipelines. // Proc. 2nd International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk, 2016. Pp. 2321-2326.
2. G. Loizou and S.J. Maybank, "The nearest neighbor and the bayes error rates," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intel., Vol. 9, pp. 254–62, Feb. 1987.
3. Метод K -ближайших соседей (KNN). [Электронный ресурс] // Хабр URL: <https://habr.com/ru/articles/801885/>: (Дата обращения 07.05.2024).

УДК 620.9

М.Д. КРАЙКОВ, ассистент,
К.Р. ГАФИАТУЛЛИНА, аспирант,
Ю.В. ВАНЬКОВ, д.т.н., профессор

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: ¹maksim_kraikov@mail.ru, ²kgafiatullina@yandex.ru, ³yvankov@mail.ru

Многофункциональная установка для исследования теплоизоляционных покрытий

Аннотация: В статье представлены функциональные возможности работы стенда для исследования теплоизоляционных покрытий.

Ключевые слова: лабораторная установка, теплоизоляция, теплопроводность, высокая температура, датчики.

M.D. KRAIKOV¹ assistant,
K.R. GAFIATULLINA² graduate student
Y.V. VANKOV³, Doctor of Technical Sciences, Prof.

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya Str.

E-mail: ¹maksim_kraikov@mail.ru, ²Kgafiatullina@yandex.ru, ³yvankov@mail.ru

Multifunctional mat for the study of thermal insulation coatings

Abstract. The article presents the functionality of the stand for the study of thermal insulation coatings.

Key words: laboratory installation, thermal insulation, thermal conductivity, high temperature, sensors.

Одной из проблем теплоэнергетической сферы являются потери тепловой энергии при её транспортировке от источника до потребителя. Применение теплоизоляционных покрытий позволит уменьшить вредные выбросы тепла в атмосферу, что сохранит озоновый слой и таяние ледников, а также сохранить свойства теплоносителя и позволит продлить срок эксплуатации теплоэнергетического оборудования. Теплоизоляция бывает разных видов и для разных сфер по градации применяемой температуры, стойкости к агрессивным средам, особенностям сохранения своих свойств при нагреве и охлаждении. Для оценки свойств теплоизоляции необходим лабораторный стенд [1].

Авторами доклада проведен литературный обзор методик определения свойств теплоизоляционных материалов, проведены исследования характеристик различных теплоизоляционных материалов.

Исследования теплоизоляции проводились при следующих параметрах: диаметр трубопровода 200 мм, длина участка трубопровода 600 мм, температура нагревателя 250 °С, снятие показателей производилось с помощью Arduino UNO и преобразователями сигнала с термомпар из аналогового в цифровой MAX6675 [2].

Установлено, что на результат измерений влияет большое количество факторов, создающих погрешности. Погрешности могут быть инструментальные – происходящие из-за сбоя измеряющего оборудования, случайные – в виде влияния окружающей среды на теплоизоляцию. Например, проведение лабораторных исследований показало нестабильность результатов измерений температуры поверхности теплоизоляции из-за изменения температуры окружающей среды. На рисунке 1 представлены экспериментальные данные температуры поверхности двух видов теплоизоляции – минеральной ваты и аэрогеля. Максимальная температура нагрева поверхности аэрогеля 61°С, у минеральной ваты 112°С, при температуре поверхности трубопровода 250 °С. По горизонтали отложено время проведения измерений, по вертикали температура поверхности теплоизоляционного слоя [3].

В промежутке времени: с 48:33 по 1:46:09 минут, происходит паде-

ние температуры у минеральной ваты и также с 1:15:53 по 3:39:22 минут у аэрогелевой теплоизоляции [4].

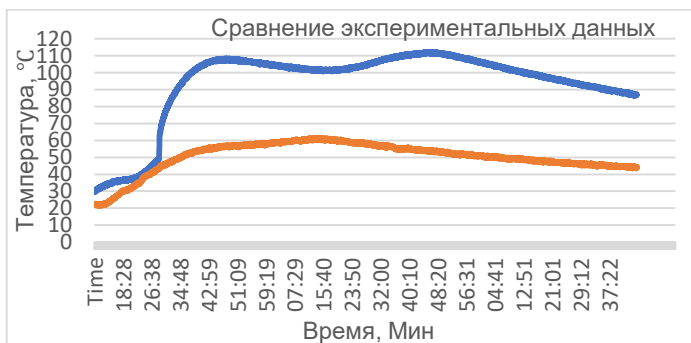


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных

Для эффективной оценки свойств теплоизоляционного материала и проведения качественного исследования необходимо сделать стенд с собственным микроклиматом, независимым от параметров окружающей среды. Применение закрытой системы нагрева позволит исследовать температуру и тепловой поток с минимальными погрешностями из-за конвекции и обдува (рис. 2).

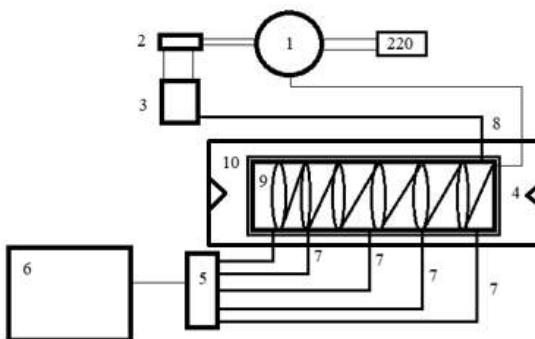


Рис.2. Схема лабораторной установки.

В целях экономии времени на охлаждение в устройстве предусмотрены вентиляторы на выдув из камеры нагрева. Для нагрева внутренней поверхности трубы применяется ТЭН ЭНГЛУ-400 с мощностью 1,5–1,8 кВт и нагревом до температуры 400 °C. С помощью подключенного к ТЭН ЛАТР, имеется возможность регулировки напряжения.

Нагрев обеспечивается с точностью ± 1 °С. Внутренняя конструкция лабораторного стенда предполагает использование разных по длине образцов с диаметрами от 120 до 250 мм. В лабораторной камере установлены форсунки с туманным распылением влаги. Они позволяют получать результаты исследований влияния гигроскопичности теплоизоляции на теплопроводность материалов. Регистрация значений датчиков температур, влажности, теплового потока на исследуемом образце производится программируемым контроллером. После фиксации значений строятся графики температур, теплового потока и влажности в Excel [5].

Заключение, модернизация стенда необходима для получения новых результатов исследования и написания диссертации.

Литература

1. К вопросу о методике расчёта тепловых потерь в сетях централизованного теплоснабжения // РосТепло: сайт. URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3386 (дата обращения: 11.03.2025)
2. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Расчётно-экспериментальные исследования эффективной теплопроводности композиционных материалов на основе полимеров // Мир измерений. 2017. № 3. С 26-28.
3. Аппаратное обеспечение платы Arduino Uno и назначение ее компонентов // Мир микроконтроллеров URL: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/apparatnoe-obespechenie-platy-arduino-uno-i-naznachenie-ee-komponentov/> (дата обращения: 11.03.2025).
4. Гапоненко С. О., Фазлиев Р. А., Калинина М. В., Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов // Вестник КГЭУ. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 142-147.
5. Шило М.А., Воробьёв Е.Н., Таранов В.Ф., Потапов А.Ю. Многослойная система теплоизоляции труб // URL: <https://www.ngpedia.ru/id508720p1.html> (дата обращения: 11.03.2025).

УДК 621.1

С.Н. ЯРУНИН, к.т.н., доцент
Н.Н. ЯРУНИНА, к.т.н., доцент
Н.М. ХУДЯКОВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: yarunin-ispu@yandex.ru

Повышение эффективности тепловых схем ТЭЦ на основе математического моделирования

Аннотация. В данной работе с помощью смоделированной в Microsoft Excel тепловой схемы с автоматизированным поиском термодинамических параметров был проведен анализ тепловой схемы турбоустановки Т-100/110-130 в четырех расчетных режимах, проанализировав которые, было предложено техническое решение для повышения эффективности тепловой схемы ТЭЦ.

Ключевые слова: тепловая схема, повышение эффективности, автоматизированный поиск теплофизических свойств воды и водяного пара, расчетный программный комплекс, коэффициент использования топлива, абсолютный электрический КПД, ГТУ, температура питательной воды, регенеративный подогреватель.

S.N. YARUNIN, Candidate of Technical Sciences, associate Professor
N.N. YARUNINA, Candidate of Technical Sciences, associate Professor
N.M. KHUDYAKOV, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskya St., 34
E-mail: yarunin-ispu@yandex.ru

Improving the efficiency of the thermal scheme of a thermal power plant based on mathematical modeling

Abstract. In this work, using a thermal scheme modeled in Microsoft Excel with an automated search for thermodynamic parameters, the thermal scheme of the T-100/110-130 turbine unit was analyzed in four design modes, after analyzing which, a technical solution was proposed to increase the efficiency of the thermal scheme of the thermal power plant.

Key words: thermal scheme, efficiency improvement, automated search for thermophysical properties of water and steam, calculation software package, fuel utilization factor, absolute electrical efficiency, GTU, feed water temperature, regenerative heater.

В качестве объекта для математического моделирования выбрана теплофикационная турбина Т-100/110-130. Для автоматизированного расчёта термодинамических параметров в среде Microsoft Excel было разработано несколько специальных модулей. Модули позволяют находить требуемые параметры воды и водяного пара (p , t , v , h , s) при давлениях от 1 кПа до 100 МПа и температурах от 0 до 800 °С.

Для повышения эффективности тепловой схемы ТЭЦ с турбоустановкой Т-100/110-130 предлагается дополнительно смонтировать газотурбинную установку (ГТУ) в комплекте с водогрейным котлом-утилизатором (КУВ). Это решение позволит отключить подогреватели высокого давления турбины (ПВД), а подогрев питательной воды осуществлять в котле-утилизаторе.

Принципиальная схема подключения ГТУ и КУВ вместо ПВД представлена рис.1.

Для обоснования данного технического решения по методике [1,2] рассчитаны четыре режима работы паровой турбины Т-100/110-130:

- 1) Номинальный режим с включенными подогревателями высокого давления (Режим 1);
- 2) Режим с выключенными подогревателями высокого давления и сохранением мощности турбины (Режим 2);
- 3) Режим с выключенными подогревателями высокого давления и сохранением расхода пара в 470 т/ч (Режим 3);

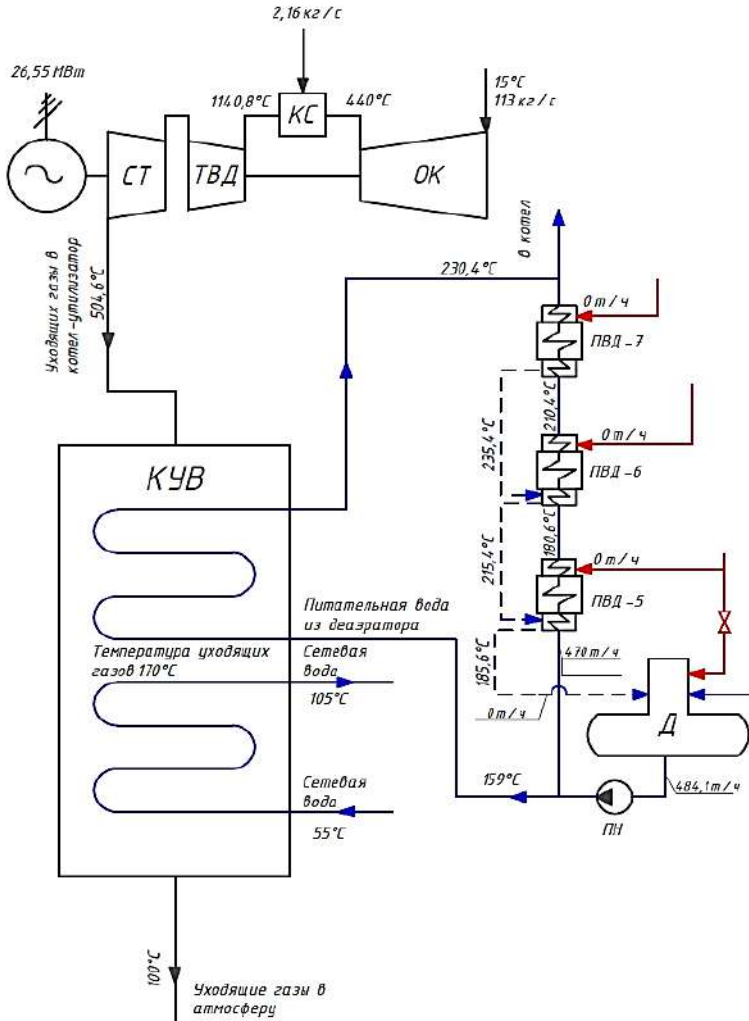


Рис. 1. Принципиальная схема подключения ГТУ и КУВ вместо ПВД

4) Режим с выключенными подогревателями высокого давления, сохранением расхода пара в 470 т/ч и работающей газотурбинной установкой с водогрейным котлом-утилизатором (Режим 4).

Для анализа расчетных режимов работы турбины результаты расчётов на математической модели сведены в табл.1.

Таблица 1. Сравнение режимов работы теплофикационной паротурбинной установки

Название	Обозначение, размерность	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Электрическая мощность	$N_э$, МВт	99,8	99,8	110,7	137,2
Теплофикационная нагрузка	$Q_т$, МВт	151,2	151,2	151,2	159,4
Расход пара на турбину	D_0 , т/ч	470	430	470	470
Расход топлива на котел	$B_т$, $м^3/с$	10,7	11,1	12,1	12,6
Температура питательной воды	$t_{пв}$, °C	230	159	159	230
Абсолютный электрический КПД	$\eta_э$, %	27,5	26,5	26,9	32,0
Коэффициент использования топлива	КИТ, %	69,1	66,7	63,7	69,3

Из таблицы с результатами расчетов можно сделать следующие выводы:

1) Отключение ПВД приведет к уменьшению расхода пара на турбину на 40,4 т/ч (8,6%). При этом из-за снижения температуры питательной воды с 230 °C до 159 °C произойдет увеличение расхода топлива на котел с 10,7 до 11,1 $м^3/с$ на 3,55% (режим 2);

2) Если при отключении ПВД сохранить постоянный номинальный расход пара на турбину 470 т/ч, то появляется возможность увеличить электрическую мощность генератора на 10% с 99,6 до 110,6 МВт. При этом расход топлива на котел увеличится на 13,3% с 10,7 до 12,1 $м^3/с$, что, в свою очередь, приведет к снижению коэффициента использования топлива (КИТ) с 69,1 до 63,7% (режим 3);

3) Установка ГТУ с котлом-утилизатором для нагрева питательной воды со 159 до 230 °C позволит увеличить выработку электроэнергии на 25% до 137,2 МВт (110,6 МВт ПТУ + 26,55 МВт ГТУ). Это, в свою очередь, позволит повысить абсолютный электрический КПД установки с 27,5 до 32 % без снижения коэффициента использования топлива (режим 4).

По результатам расчётов на математических моделях была выбрана газотурбинная установка мощностью 28 МВт с температурой уходящих газов 505 °C, а также водогрейный котел-утилизатор, имеющий 2 трубных пучка. Первый трубный пучок предназначен для нагрева питательной воды со 159 до 230 °C уходящими газами ГТУ (вместо ПВД), второй трубный пучок предназначен для подогрева сетевой воды.

Таким образом, разработанный программный комплекс, на который получено свидетельство о государственной регистрации программы [3], позволяет проводить расчеты, направленные на поиск технических решений по совершенствованию и модернизации тепловых схем паротурбинных установок.

Кроме того, математические модели и программное обеспечение можно использовать для обучения студентов по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», что в конечном счете будет способствовать внедрению методов программной инженерии в учебный процесс.

Литература

1. Орлов Г.Г., Зорин М.Ю. Расчёт принципиальной тепловой схемы ТЭЦ с турбиной типа Т: учебно-метод. пособие / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2020. 100 с.
2. Ярунин С.Н., Тимошин Л.И., Ярунина Н.Н. Промышленные тепловые двигатели: учебно-метод. пособие. / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2023. 128 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689978 Российская Федерация. Расчет теплофикационных паровых турбин: № 2024688394: заявл. 22.11.2024; опубл. 11.12.2024/ А.В. Банников, С.Н. Ярунин, Н.М. Худяков; заявитель ФГБОУ ВО ИГЭУ.

УДК 697.343

А.В. КОНОВАЛОВ, к.т.н. доцент,
В.В. СЕННИКОВ, к.т.н. доцент,
В.В. СМИРНОВ, к.т.н. доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kbispu@mail.ru

Устройство по устранению «перетопа» в тепловых пунктах зданий

Аннотация. Приводятся математическая модель, результаты вычислительного эксперимента и экспериментальных исследований устройства по устранению «перетопа» с рециркуляционным насосом с ЧРП и регулируемым клапаном. Устройство в составе автоматизированного ИТП здания обеспечивает гидравлическую независимость режимов работы ИТП и тепловой сети.

Ключевые слова: математическое моделирование, вычислительный эксперимент, экспериментальные исследования.

A.V. KONOVALOV, Candidate of Engineering, docent,
V.V. SENNIKOV, Candidate of Engineering, docent,
V.V. SMIRNOV, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kbispu@mail.ru:

Device for eliminating "overheating" in domestic heating plant of buildings

Abstract. The paper presents a mathematical model, results of a computational experiment and experimental studies of a device for eliminating "overheating" with a

recirculation pump with a VFD and an adjustable valve. The device as part of an automated building IWP ensures hydraulic independence of the heating network operating mode.

Key words: mathematical modeling, computational experiment, experimental studies.

При подключении системы отопления жилых и общественных зданий по 2-х трубной схеме теплоснабжения с открытым или закрытым водоразбором наблюдается явление «перетопа». Причина: из-за необходимости поддержания температуры в подающем трубопроводе в период излома температурного графика $80^{\circ}\text{C} > t_n > t_{н.и}$ на нужды отопления подается завышенное количество теплоты, которое и приводит к возрастанию внутренней температуры воздуха в отапливаемых помещениях выше допустимых значений. Обычно «перетоп» происходит при $t_n > t_{н.и}$ при температуре в подающем трубопроводе не ниже 70° . Таким образом, явление «перетопа» является следствием эксплуатации тепловых сетей с нагрузками отопления и горячего водоснабжения.

Устройство «перетопа» возможно за счет организации подмеса обратной сетевой воды в подающий и подающей сетевой воды в обратный трубопровод. Для этого предлагается устройство с рециркуляционным насосом и регулируемым клапаном. Предлагаемое устройство аналогично схеме с перемычкой и рециркуляционным насосом, применяемой в водогрейных котельных, но с более широкой функциональной возможностью. Основное техническое требование предлагаемого устройства: равенство коэффициентов смешения в узловых точках схемы ИТП здания, что позволяет сохранить расчетные расходы сетевой воды на участках тепловой сети и через системы отопления подключаемых зданий.

Схема по устранению «перетопа» применима при любых температурных графиках: $150/70, 130/70, 105/70$ и $95/70^{\circ}\text{C}$. Если температурный график более $95/70^{\circ}\text{C}$, то в схему ИТП надо добавить смесительное устройство: элеватор или насос смешения; при этом оба устройства представляют собой единое целое.

Разработана математическая модель регулирования режимов работы тепловой сети с потребителями, подключенными с помощью устройства по устранению «перетопа» с рециркуляционным насосом с ЧРП и регулируемым клапаном. Схема устройства представлена на рис.1. Для расчета потокораспределения в кольцевых сетях необходимо составить систему уравнений, описывающую функциональность данной схемы: 3 уравнения баланса масс (аналог 1 закона Кирхгофа) на единицу меньше числа узлов схемы; 3 уравнения сумм потерь напора (аналог 2 закона Кирхгофа), равному числу открытых и закрытых контуров схемы. Кроме того, при смешении потоков с разными температурами, необходимо добавить уравнения теплового баланса для каждого узла смешения.

По результатам вычислительного эксперимента и исследовательских испытаний на физической модели устройства по

предотвращению «перетопа» с ЧРП и с регулируемым клапаном с ЧРП: доказана экспериментально возможность устранения «перетопа» в отапливаемых помещениях при температурах наружного воздуха от точки излома $t_{н.и}$ до температуры окончания отопительного сезона (+8°C); а также возможность работы данной схемы при любых температурных графиках.

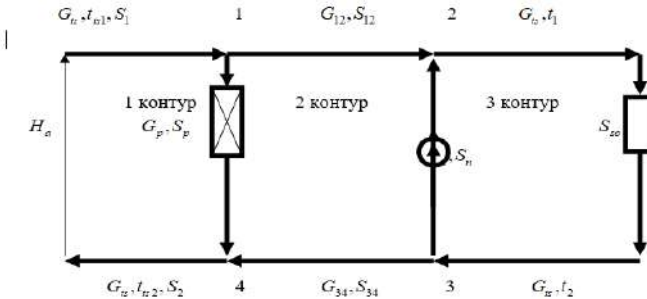


Рис. 1. Схема устройства по устранению «перетопа» с насосом смешения с ЧРП и регулируемым клапаном

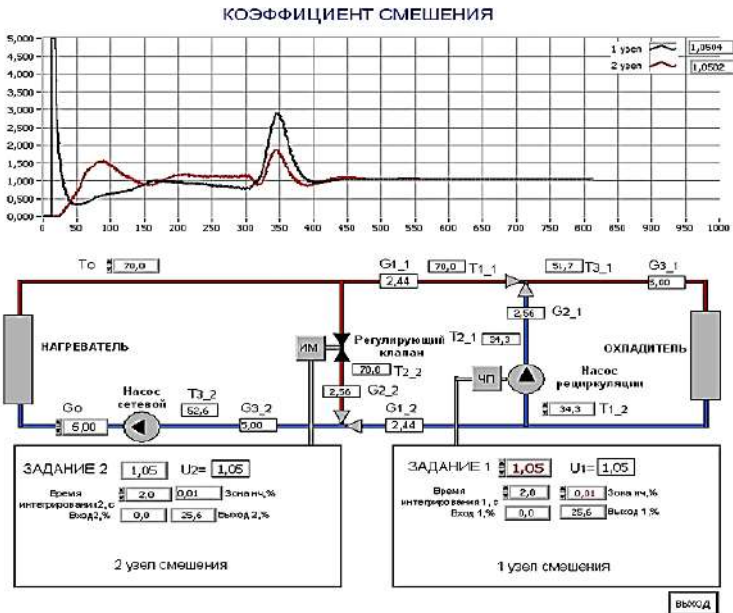


Рис. 2. Результаты вычислительного эксперимента устройства по устранению «перетопа» с насосом смешения с ЧРП и регулируемым клапаном

Также к основным преимуществам применения данного устройства в составе автоматизированного ИТП является возможность обеспечения гидравлической независимости режимов работы ИТП и тепловой сети.

Устройство по устранению «перетопа» в тепловых сетях централизованного теплоснабжения в настоящее время не применяются.

Литература

1. Отчет НИР. Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления в сетях централизованного теплоснабжения за счет разработки научно-технических основ и способов регулирования отпуска теплоты / Минобрнауки РФ, ИГЭУ, Этапы 1-4, 2010-2011 г г.

УДК 655.228.6

А.А. ДАНИЛОВА, студент,
А.В. КОНОВАЛОВ, к.т.н. доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: anatoliy.v.konovalov@mail.ru

Комплексный анализ материалов как объектов сушки

Аннотация. Произведена оценка высушиваемых материалов на основе комплексного анализа материалов как объектов сушки. Составлена блок-схема для выбора и расчета сушильного оборудования в зависимости от свойств высушиваемого материала. Разработана программа расчета конвективной сушильной установки для ткани с применением программных средств «Excel».

Ключевые слова: Комплексный анализ объектов сушки, блок-схема, тепловой и материальный расчет.

А.А. DANILOVA¹, student,
А.В. KONOVALOV¹, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: anatoliy.v.konovalov@mail.ru

Comprehensive analysis of materials as drying objects

Abstract. The evaluation of dried materials is based on a complex analysis of materials as drying objects. The block diagram is designed for the selection and calculation of drying equipment depending on the properties of the dried material. The calculation program for a convective drying unit for fabric has been developed using software tools «Excel».

Key words: Comprehensive analysis of drying facilities, the block diagram, thermal and material calculation.

В процессе сушки избыточная влага из влажного материала удаляется испарением.

В жидкости, как и в газах, при любой температуре, отличающейся от абсолютного нуля, всегда имеется некоторое число молекул, обладающих наибольшей кинетической энергией, которые, оказавшись вблизи открытой поверхности жидкости, способны преодолеть поверхностное натяжение и покинуть жидкость. Средняя кинетическая энергия оставшихся в жидкости молекул уменьшается, следовательно, уменьшается и температура жидкости. Таким образом, испарение является эндотермическим процессом; на испарение единицы массы жидкости необходимо затратить удельную теплоту парообразования r (Дж/кг), которую жидкость получает от окружающего воздуха или от специального теплоносителя. Молекулы пара, покинувшие жидкость, переходят в окружающий воздух вследствие концентрационной диффузии - движения молекул под влиянием перепада относительной концентрации какого-либо компонента смеси. Концентрационная диффузия пара и воздуха взаимна: одновременно молекулы воздуха диффундируют к поверхности жидкости под влиянием относительной концентрации воздуха. По мере удаления от поверхности жидкости этот так называемый молекулярный перенос, осуществляемый отдельными молекулами независимо друг от друга, постепенно заменяется молярным переносом, осуществляемым некоторыми объемами, т.е. конвекцией. На расстоянии от поверхности жидкости порядка 1 мм конвекция становится доминирующим способом переноса пара.

Испарение свободной, не связанной с материалом жидкости характеризуется тремя особенностями:

- 1) испарение происходит в молекулярном поверхностном слое, так называемом зеркале испарения;
- 2) влага перемещается к зеркалу испарения только в виде жидкости;
- 3) перемещение массы жидкости к зеркалу испарения осуществляется в основном молярным переносом – конвекцией и, в меньшей степени, молекулярным переносом – броуновским движением;
- 4) на испарение затрачивается лишь теплота парообразования.

Во влажных телах только часть влаги свободна, а значительная ее часть более или менее прочно связана с материалом: движение связанной влаги внутри твердого тела затруднено пространственной структурой (каркасом) тела. Прочность связи влаги с материалом и механизм ее движения внутри твердого тела зависят от вида тел. Пространственная структура тел и различные формы связи влаги с материалом определяют особый механизм испарения и движения влаги внутри тела: она может перемещаться не только в виде жидкости, но и в виде пара, причем перенос пара может быть, как молярным, так и молекулярным; испарение может происходить в относительно толстом слое, в так называемой зоне испарения.

Развитие технического процесса в современном отделочном производстве характеризуется широким освоением интенсифицированных технологических процессов на основе повышения параметров тепловой обработки, совмещение отдельных технологических операций и создание поточных линий отделки ткани.

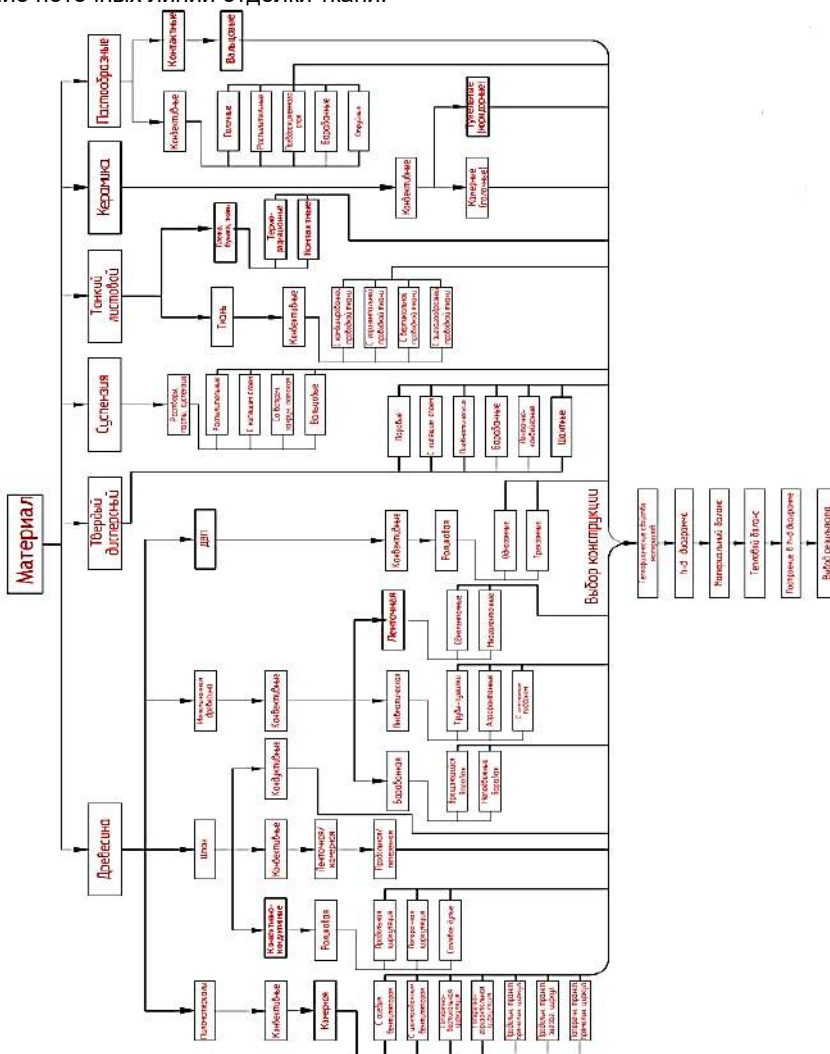


Рис. 1. Блок-схема материалов в зависимости от их свойств

Технологические процессы отделочного производства включают многочисленные операции по влажностно-тепловой обработке тканей (увлажнение, пропитка, запаривание, термическая обработка, прогрев, сушка).

Физико-химические процессы, происходящие на тканях во время обработки, связаны с тепло- и массообменом и являются составной частью любой технологической операции отделки ткани.

Разработка высокоэффективных типовых сушилок невозможна без классификации высушиваемых материалов, которая должна осуществляться на основе комплексного анализа материалов как объектов сушки.

Классификация высушиваемых материалов по определяющим характеристикам и знание их свойства дают возможность выбрать рациональный метод и режим сушки, а также спроектировать эффективную сушильную установку.

С учетом вышеизложенного была разработана блок-схема по выбору и расчету различного типа сушильных установок, представленная на рис. 1.

В связи с задачей выбора способа сушки влажные материалы делят на 6 основных групп:

- 1) твердые дисперсные материалы, обладающие сыпучестью во влажном состоянии: пылевидные, зернистые, кусковые;
- 2) штучные, массивные, крупногабаритные материалы и изделия: элементы строительных конструкций, изделия из древесины;
- 3) жидкотекучие материал – это истинные и коллоидные растворы, эмульсии, суспензии, т.е. материалы, которые можно не перекачивать насосами;
- 4) пастообразные материалы – это влажные материалы, которые не перекачиваются насосами;
- 5) тонкие, гибкие материалы: ткани, бумага, картон;
- 6) изделия, подвергающиеся сушки после окрашивания, склеивания и т.п.

После выбора типа сушильной установки на основе комплексного анализа объекта сушки были проведены материальный и тепловой расчеты. Определен расход воздуха на процесс сушки и рассчитано количество теплоты. Расчет проведен в программе Excel. Расчет проведен по «цепочке» «тонкий листовой» для высушивания ткани в конвективной сопловой сушилке.

Литература

1. Бунин О.А., Малков Ю.А. Машины для сушки и термообработки ткани. М.: Машиностроение, 1971.180 с.
2. Пяточков П.И. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок. Раздел 4. Сушильные установки. Учебю пособие. Иваново 1973. 350 с.
3. Сажин, Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б.Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.: ISBN 5-02-003715-X. 43 с.

УДК 621.187.12

Д.С. МОРОЗОВ, аспирант
О.В. ПАЗУШКИНА, к.т.н., доцент

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д.32
E-mail: morozov.d78@yandex.ru

Повышение качества атмосферной деаэрации путем модернизации барботажного устройства

Аннотация. Предложен вариант модернизации одной из ступеней деаэрации атмосферного деаэратора на производственной котельной. Увеличение площади поверхности барботажного устройства позволяет добиться снижения содержания остаточного кислорода в питательной воде при повышенных нагрузках на атмосферный деаэратор более чем в 2 раза.

Ключевые слова: атмосферная деаэрация, барботажное устройство, многоступенчатая система термической деаэрации.

D. S. MOROZOV, graduate student
O.V. PAZUSHKINA, Ph.D., Associate Professor

Ulyanovsk State Technical University
432027, Ulyanovsk, Severny Venets, 32
E-mail: morozov.d78@yandex.ru

Improving the quality of atmospheric deaeration by upgrading the bubbling device

Abstract. The article describes an option for upgrading one of the deaeration stages of an atmospheric deaerator, which makes it possible to improve the quality of feedwater by using a simple and inexpensive solution. By increasing the area of the bubbling device, it is possible to reduce the residual oxygen content in the feed water at increased loads on the atmospheric deaerator by more than 2 times.

Key words: atmospheric deaeration, bubbling device, multi-stage thermal deaeration system.

Одним из основных теплоносителей в промышленности является пар. Для его производства часто предприятия имеют собственные источники генерации тепловой энергии. На котельных предприятиях устанавливаются паровые котлы, а для их питания применяют специальные водоподготовительные модули. Атмосферная термическая деаэрация позволяет удалить агрессивные газы, которые вызывают внутреннюю коррозию трубопроводов и котлоагрегатов.

Нормативом установлена концентрация остаточного кислорода в деаэрированной воде на уровне до 20 мг/дм³, что вполне осуществимо, особенно, если подпитка котла осуществляется не только химически очищенной водой (ХОВ), но и возвращаемым с производства конденсатом, в котором содержание кислорода часто бывает

незначительным [1,2]. Но при отсутствии чистого конденсата и подпитке только ХОВ возможен рост данного показателя.

Рассмотрим котельную Больше-Каменская ПАО Татнефть, которая используется для подачи пара в скважины при разработке сверхвязких нефтей. На котельной установлены 6 паровых котлов ДЕ-25-3,9, паропроизводительность каждого 25 т/ч. Для приготовления питательной воды используется атмосферный деаэратор ДА-150/75 с производительностью до 150 м³/ч деаэрированной воды (рис. 1).

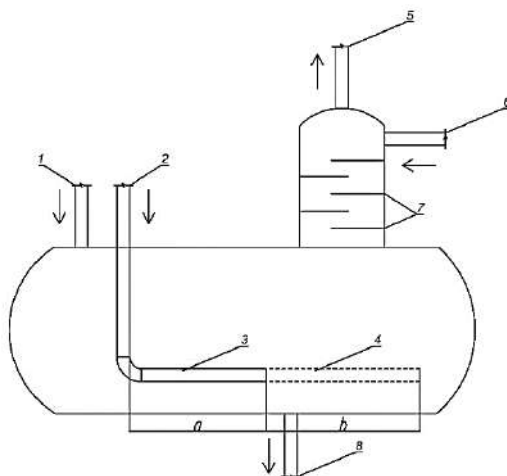


Рис. 1. Схема модернизации барботажной ступени деаэратора ДА 150/75:
1 – подвод основного пара, 2 – пар на барботаж, 3 – изначальная длина барботажного устройства, 4 – удлинение барботажа, 5 – выпар, деаэратора, 6 – ХОВ, 7 – тарелки деаэратора, 8 – трубопровод деаэрированной воды на паровые котлы

По причине отсутствия возврата конденсата в деаэратор поступает только ХОВ с изначально высоким содержанием кислорода (до 5-9 мг/дм³). При высокой потребности в паре могут включаться в работу все 6 котлов, а значит нагрузка на деаэратор возрастает до максимальной. При этом содержание остаточного кислорода в питательной воде возрастало с 50 мкг/дм³ до 70 мкг/дм³. Поэтому возникла потребность в модернизации агрегата.

Изначально была предпринята попытка замены тарелок деаэрационной колонки. Был увеличен диаметр отверстий в них, но это не повлияло на качество деаэрированной воды. Тогда было предложено увеличить площадь барботажного устройства, которое располагается в объеме бака-аккумулятора деаэрированной воды и является второй ступенью деаэрации. В данной модели применяется барботаж, состо-

ящий из трубопровода диаметром 100 мм, длиной 2,5 м и отверстиями для выхода пара по всей длине диаметром в 10-12 мм. При реконструкции был удлинён перфорированный трубопровод до 6 м (это позволял внутренний объём бака-аккумулятора). В итоге после данной реконструкции понизилось остаточное содержание кислорода с максимальных 70 мкг/дм³ до 20-30 мкг/дм³ (рис. 2).

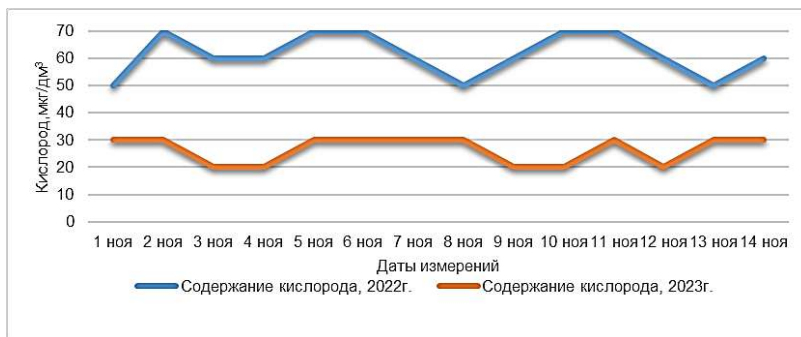


Рис. 2. Содержание кислорода в деаэрированной воде до и после реконструкции

Вывод. Предложено недорогое решение, позволяющее понизить содержание агрессивных газов в питательной воде. Такой способ модернизации более всего подходит для деаэрационных установок с баками-аккумуляторами значительной ёмкости из-за достаточного внутреннего объёма, который можно использовать максимально эффективно.

Литература

1. Направления повышения эффективности производственных котельных // Морозов Д.С., Пазушкина О.В. / Вузовская наука в современных условиях. Сборник материалов 58-й научно-технической конференции. В 2-х частях. Ульяновск, 2024. С. 21-23.
2. Пути повышения экономичности атмосферных деаэраторов, преимущества и недостатки // Морозов Д.С., Пазушкина О.В. / Энергоэффективные технологии в строительстве, энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве. III научно-техническая конференция студентов и аспирантов с международным участием: сб. науч. трудов. Ульяновск, 2023. С. 56-60.

УДК 621.311.24:621.313.12

Д.Ю. СЕРОВ, к.т.н., доцент,
Д.Д. ВЕСТ, студент

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: vest_d@bk.ru

Технико-экономическое обоснование технологии сушки при производстве кристаллической глюкозы

Аннотация. В работе приводится экономическое обоснование технологии сушки кристаллической глюкозы. Экономически обоснована целесообразность применения сушилки барабанного типа.

Ключевые слова: сушильная установка, время сушки, дисконтированные затраты, массоотдача

D.Y. SEROV, PhD.,
D.D. VEST, Student

Yuri Gagarin State Technical University, Russia,
410054, Saratov, Polytechnicheskaya str., 77
E-mail: vest_d@bk.ru

Economic substantiation of drying technology in glucose production

Annotation. The paper provides an economic justification for the technology of drying crystalline glucose. The expediency of using a tumble type dryer is economically justified.

Key words: drying plant, drying time, discount costs, mass removal

В работе рассматриваются завершающий этап производства кристаллической глюкозы – сушка ее гидратных кристаллов. Кристаллы глюкозы содержат кристаллизационную (около 9%) и поверхностную влагу (до 6%) [1]. В процессе высушивания удаляется только поверхностная влага. Температура кристаллов не должна превышать порог плавления в собственной кристаллизационной влаге. Максимально допустимая температура кристаллов глюкозы при сушке (не более 50°C) достигается понижением температуры сушильного агента, либо сокращением времени сушки [1].

Традиционно для сушки глюкозы применяются барабанные и пневматические сушильные установки (СУ). В качестве альтернативы в работе рассматриваются СУ со взвешенным слоем, а также распылительные, ленточные и комбинированные.

В ходе работы по методикам, в частности [2, 3], выполнены расчеты статики и кинетики сушки в СУ, типы которых указаны в табл. 1. Для сушилок рассчитывались, в частности, коэффициенты массоотдачи, критические и рабочие скорости сушильного агента, время сушки, за-

траты электроэнергии на привод нагнетателей сушильного агента, а также на механический привод для СУ соответствующего типа (баранных, распылительных, ленточных). Учитывались взаимосвязанные ограничения на температуру сушимого материала и время сушки. Для обеспечения сопоставимости результатов, расчеты проводились для одинаковой производительности установки 1,5 т/ч по высушенному материалу при начальной влажности материала $w_1 = 15\%$ и конечной влажности $w_2 = 9\%$, согласно [4]. Для двухступенчатых комбинированных СУ сопоставлялась промежуточная влажность, принятая $w_{пр} = 12\%$. При расчётах экономических показателей, в составе затрат учтена стоимость как основного, так и вспомогательного оборудования СУ согласно каталогам [5, 6, 7], а также затраты на энергоносители согласно [8, 9]. Расчёт выполнен в ценах 2025 г.

Таблица 1. Рассмотренные типы сушильных установок

номер типа СУ	Наименование типа сушильной установки (СУ)	
	1-ая ступень	2-ая ступень
1	Распылительная СУ	Ленточная СУ
2	Распылительная СУ	СУ со взвешенным слоем
3	Распылительная СУ	Пневматическая СУ
4	Баранная СУ	Пневматическая СУ
5	Баранная СУ	СУ со взвешенным слоем
6	Баранная СУ	Ленточная СУ
7	Распылительная СУ	Баранная СУ

На рис. 1 показаны удельные затраты на удаление 1 кг влаги в СУ соответствующего типа.

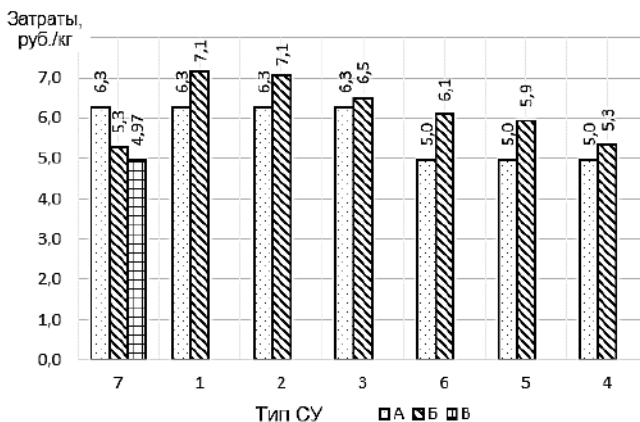


Рис. 1. Сравнение затрат на удаление 1 кг влаги в СУ различных типов, указанных в табл. 1

На рис. 1 каждый столбец А диаграммы соответствует предельному случаю $w_{\text{пр}} = w_2$, при котором предусматривается только одна ступень сушки, указанная в качестве первой ступени СУ соответствующего типа в табл. 1. Каждый столбец Б соответствует применению двухступенчатой СУ при $w_{\text{пр}} = 12\%$. Каждый столбец В соответствует предельному случаю $w_{\text{пр}} = w_1$, когда предусматривается только одна ступень сушки, указанная в качестве второй ступени СУ соответствующего типа в табл. 1. В качестве единственной ступени сушки рассматриваются сушилки распылительного типа с центробежно-дисковым распылом, либо барабанные сушилки со специальными насадками, т.к. только эти варианты надёжно предотвращают агрегатирование кристаллов глюкозы.

Выводы.

1. Среди рассмотренных вариантов комбинированных СУ наиболее выгодным является комбинирование распылительной и барабанной СУ.
2. Наиболее выгодным вариантом сушильной установки при производстве кристаллической глюкозы является барабанная сушильная установка. Следует, однако, учесть, что возможность реализации этого варианта предполагает строгое поддержание влажностных и механических параметров кристаллов глюкозы, подаваемых в барабан.

Литература

1. Голыбин, В.А. Технология крахмала, крахмалопродуктов и глюкоз фруктозных сиропов: учеб. пособие / В.А. Голыбин, А.А. Ефремов. Воронеж: ВГУИТ, 2013. 140 с.
2. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Г.С. Борисов, Ю.И. Дытнерский, В.П. Брыков / под ред. Ю.И. Дытнерского. М.: Альянс-Книга, 2021. 496 с.
3. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии: учеб. пособие / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2018. 440 с.
4. ГОСТ Р 70295-2022 Глюкоза кристаллическая. Технические условия. Введ. 2023-03-01. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. 17 с.
5. Ассоциация предприятий БМП: производственно-коммерческая компания: сайт. Вологда, 2025. URL: <https://bmpa.ru/barabannaya-sushilka-dlya-shchep-y-i-sypuchih-materialov>
6. ЗАО Т.С.Т., Калориферы.Новокузнецк, 2025. URL: <https://zao-tst.ru/podbor-raschet-kaloriferov.html>
7. Прогноз цен покупки электрической энергии для конечного потребителя на 2025 год. Саратов, 2025. URL: https://www.ruscable.ru/articles/tarifs/_na_elektroenergiu_na_2025_god/_na_elektroenergiu_v_saratove_i_saratovs_1
8. ПАО «Т-Плюс». Саратов, 2025. URL: <https://www.tplusgroup.ru/>

УДК 621.565.93/95

А.С. РУМЯНЦЕВ¹, студент
М.В. КОЗЛОВА², к.т.н., доцент
ЛАВРЕНОВ В.С., нач. РЦ-2, Ленинградская АЭС
ГОДОВЫХ П.В., вед. инж. (по технологии) РЦ-2, Ленинградская АЭС.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: rumoal@yandex.ru¹, mariyakozlova1996@gmail.com²

Исследование гидравлического режима кожухотрубного теплообменного аппарата в условиях наличия отложений

Аннотация. В статье представлены результаты исследования влияния биологических отложений со стороны охлаждающей воды кожухотрубного теплообменного аппарата системы регулирования мощности энергоблока типа РБМК, смоделированного в программном комплексе Aspen Exchanger Design and Rating, на гидравлические параметры его работы.

Ключевые слова: гидравлический режим, биологические отложения, система охлаждения, кожухотрубный теплообменный аппарат, прямоточная система водоснабжения

A.S. RUMYANTSEV¹, student
M.V. KOZLOVA², Candidate of Engineering, docent
V.S. LAVRENOV, Head of RC-2, Leningrad NPP
P.V. GODOVYKH, Leading Engineer (Technology), RC-2, Leningrad NPP.

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: rumoal@yandex.ru¹, mariyakozlova1996@gmail.com²

Research on shell-and-tube heat exchanger hydraulic mode under conditions of deposits

Abstract. The article presents the RBMK power control system shell-and-tube heat exchanger cooling-water-side fouling influence researching results modeled in the Aspen Exchanger Design and Rating software package on the heat exchanger operation hydraulic parameters.

Key words: hydraulic mode, fouling, cooling system, shell-and-tube heat exchanger, once-through water-supply system

Стабильная бесперебойная работа энергетического оборудования является залогом безопасной и эффективной работы энергоблоков РБМК атомных электрических станций. Одной из систем, обеспечивающих безопасность реактора и регулирование его мощности, является система управления и защиты (СУЗ) реактора. Ее задача заключается в компенсации избыточной реактивности реактора, регулировании энерговыделения, аварийном прекращении цепной реакции и не только

Отвод тепла от активной зоны проводится в контуре охлаждения системы управления и защиты (КО СУЗ) водой промежуточного контура (ПК) через кожухотрубные теплообменники. Охлаждение же воды промежуточного контура осуществляется исходной либо оборотной водой системы технического водоснабжения (СТВ). Рабочей средой в КО СУЗ

и ПК является химически очищенная вода, что препятствует образованию отложений на поверхностях теплообмена. В свою очередь вода СТВ несмотря на проводимые мероприятия по очистке несет в себе вещества, оседающие на внутренней поверхности теплообменных трубок, что приводит к снижению интенсивности теплообмена и вызывает необходимость в выводе оборудования на внеплановое обслуживание.

Объектом исследования в данной работе является система охлаждения РБМК-1000, а именно теплообменное оборудование ПК, представленное кожухотрубным, одноходовым, горизонтальным теплообменным аппаратом (ТА), охлаждающей средой в котором служит исходная вода прямоточной системы водоснабжения.

Расчет гидравлических параметров объекта исследования проводился на основе полученных с атомной станции параметров рабочих сред за длительный промежуток времени в программном комплексе Aspen Exchanger Design and Rating, где для проведения симуляции также был смоделирован ТА.

Для исследуемого теплообменника перед очисткой $R_{\text{загр}}$ составило $0,315 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{кВт}$. Теплопроводность отложений со стороны технической воды в расчетной модели была принята равной $\lambda_{\text{загр}} = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ на основании зависимости биологических отложений от их пористости $\Pi, \%$, представленной Р. Цвиклером [1], эта зависимость изображена на рис. 1.

Также И. Бубликов приводит полученную им экспериментально зависимость удельного количества илстых отложений от числа Рейнольдса, она изображена на рис. 2.

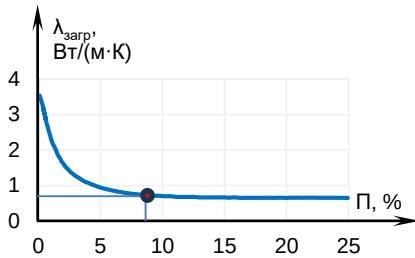


Рис. 1. Зависимость теплопроводности биологических отложений от их пористости

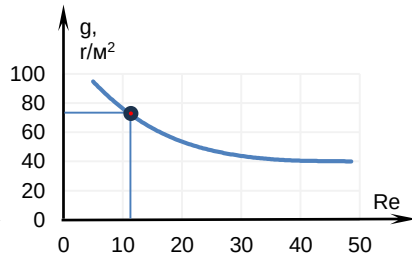


Рис. 2. Зависимость удельного количества биологических отложений от числа Рейнольдса

Данная зависимость была также экспериментально подтверждена И. Бубликовым в его диссертации [1]. Таким образом средняя толщина слоя загрязнений $\delta_{\text{загр}}$, мм, по всем теплообменным трубкам составила:

$$\delta_{\text{загр}} = \lambda_{\text{загр}} \cdot R_{\text{загр}} = 0,8 \cdot 0,315 \cdot 10^{-3} = 0,25 \text{ мм.} \quad (1)$$

Для рассматриваемых условий Рейнольдс в трубном пространстве

составляет 11374, что соответствует удельному количеству отложений в $g = 72,4 \text{ г/м}^2$ поверхности теплообмена, а значит на основании показаний датчиков в контуре системы можно предполагать нахождение на эффективной площади теплообмена $F_{эф} = 627,5 \text{ м}^2$ следующей массы отложений m , кг, внутри теплообменных трубок ТА:

$$m = g \cdot F_{эф} = 72,4 \cdot 627,5 = 45,4 \text{ кг}. \quad (2)$$

В результате симуляции в числе прочих были получены гидравлические параметры рабочих сред как в целом по ТА, так и в его характерных зонах. Средняя скорость рабочих сред в трубном и межтрубном пространствах составили 0,69 м/с и 1,1 м/с, соответственно, а наибольшие – 0,69 м/с и 2,46 м/с. Средняя скорость в трубном пространстве близка к минимальному допустимому значению в 0,5 м/с, а во многих режимах и вовсе ниже этого значения, что является одним из факторов, оказывающих влияние на интенсивность нарастания илистых отложений на поверхности трубок.

В табл. 1 представлено значение скоростей охлаждаемой воды в характерных зонах межтрубного пространства, а на рис. 3 иллюстрация с расположением этих зон в потоке внутри ТА.

Таблица 1. Скорость потока в характерных зонах м/т пространства

Обозначение потока	Скорость потока, м/с		
	Вход	Середина	Выход
Сквозной поток (поток В)	0,72	0,56	0,71
Окно (потoki В+С+F)	0,74	0,58	0,74
Просвет в отверстиях трубной решетки (поток А)	0,13	0,2	0,12
Неплотность между трубной решеткой и кожухом (поток Е)	0,13	0,22	0,14
Просвет между краем трубного пучка и кожухом (поток С)	0,03	0,02	0,03
Просвет между пучками труб (поток F)	0	0	0

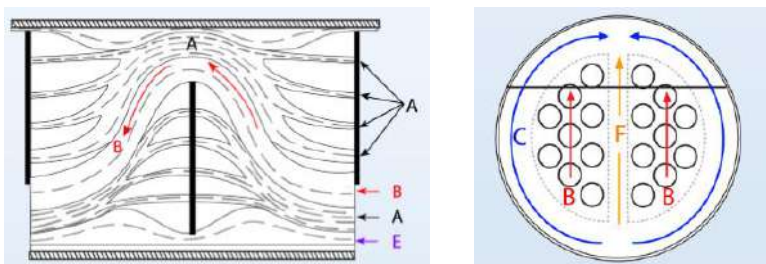


Рис. 3. Поля скоростей в кожухотрубном теплообменном аппарате

Программный анализ на возникновение вибрации показал, что данное явление оказалось возможным в вырезах межтрубных перегородок.

Важным показателем, позволяющим оценить характер гидравлического режима в ТА, является значение потерь давления на преодоление рассматриваемого пространства аппарата. На рис. 4 представлена зависимость расчётного гидравлического сопротивления трубного пространства от числа Рейнольдса в различных период времени относительно вывода ТА на очистку.

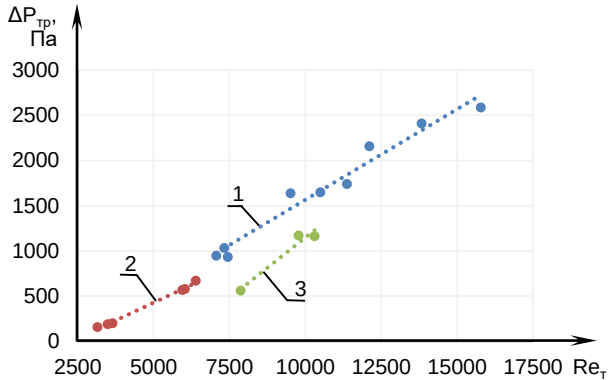


Рис. 4. Расчётное гидравлическое сопротивление трубного пространства по экспериментальным данным:

- 1 – период перед очисткой, 2 – после очистки,
- 3 – спустя 2/3 срока до следующей очистки

На основании среднего значения в диапазонах можно говорить о линейном характере зависимости гидравлического сопротивления трубного пространства от числа Рейнольдса, что позволяет прогнозировать затраты мощности на прокачку теплоносителя с увеличением скорости течения рабочей среды.

Также, был рассчитан расход охлаждающей воды, необходимый для обеспечения отвода тепла от ПК, в условиях отсутствия загрязнений, и проведён сравнительный анализ, отражающий их влияние на повышение расхода охладителя в зависимости от нагрузки на ТА. Описанные зависимости представлены на рис. 5.

Представленные на рис. 5 графики показывают, что на обеспечение требуемого теплоотвода через загрязнённый ТА требуется прокачивать исходной воды в среднем на 498 м³/ч больше во всем диапазоне измерений. Анализ результатов проведенного исследования свидетельствует о том, что в условиях наличия отложений в трубном пространстве затраты электроэнергии на привод насосов для перемещения энергоносителя увеличиваются минимум в 1,49 раза.

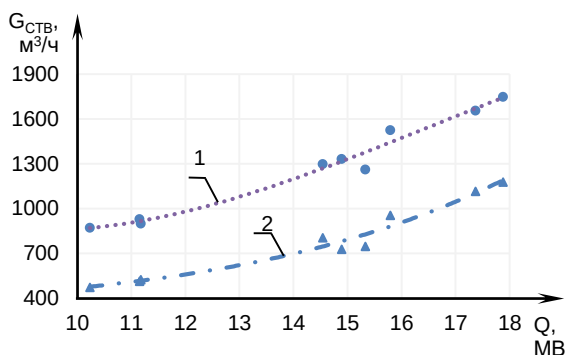


Рис. 5. Расход охлаждающей воды в зависимости от нагрузки на ТА:
1 – опытные данные загрязненного ТА, 2 – модель чистого ТА

Подводя итог, можно сказать о необходимости регулярного проведения моделирования работы ТА для оценки его состояния и превентивного реагирования в отношении факторов, оказывающих влияние на предсказуемость его работы.

Литература

1. Бубликов, И.А. Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых и атомных электростанций: автореферат дис. доктора технических наук: 05.14.14 / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т). Новочеркасск, 2004. 34 с.

УДК 621.6.022

М.В. КОЗЛОВА, к.т.н., доцент
Р.Д. СЕМЯШКИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: mariyakozlova1996@gmail.com, roman.semyashkin@mail.ru

Интеграция абсорбционного теплового насоса в тепловую схему контактной опреснительной установки

Аннотация. В работе представлена разработанная авторами тепловая схема контактной термической опреснительной установки, в которую встроены абсорбционный тепловой насос (АБТН). Выполнена оценка эффективности работы АБТН в составе опреснителя, установлено, что для температуры осушки паровоздушной смеси 60–90 °С коэффициент трансформации составляет 1,67–1,74.

Ключевые слова: опреснительная установка, паровоздушная смесь, абсорбционный тепловой насос, коэффициент трансформации.

M.V. KOZLOVA, Candidate of Engineering, docent
R.D. SEMYASHKIN, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: mariyakozlova1996@gmail.com, roman.semyashkin@mail.ru

Integration of an absorption heat pump into the thermal circuit of a contact desalination plant

Abstract. The paper presents the thermal scheme of a contact thermal desalination plant developed by the authors, in which an absorption heat pump (ABTN) is integrated. The efficiency of the ABTN operation in the desalination plant was evaluated, and it was found that for the drying temperature of the steam-air mixture of 60-90°C, the transformation coefficient is 1.67–1.74.

Key words: desalination plant, steam-air mixture, absorption heat pump, transformation coefficient.

Интеграция трансформаторов теплоты различного принципа действия в процесс получения обессоленной воды является одним из способов повышения эффективности работы термических опреснительных установок [1]. Перспективным решением является установка абсорбционных тепловых насосов поскольку для их функционирования могут использоваться солнечная энергия, а также тепловые вторичные энергетические ресурсы.

Включение АБТН в схему опреснительной установки возможно путем использования его для обеспечения процесса увлажнения паровоздушной смеси (ПВС), а также ее осушки.

Авторами было разработано техническое решение по повышению эффективности опреснителей гигроскопического типа за счет включения в их цикл трансформатора тепла абсорбционного типа, принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Зеленым цветом показан контур крепкого раствора, красным – слабого, голубым – рабочего агента.

В соответствии с данной тепловой схемой тепловая энергия, отводимая в конденсаторе трансформатора тепла, обеспечивает подогрев морской воды до температуры барботажа, испарение воды, компенсацию тепловых потерь, а теплоноситель, циркулирующий в абсорбере, обеспечивает интенсификацию процесса упаривания рассола в испарительных бассейнах.

На сегодняшний день наиболее широкое распространение получили бромистолитиевые и водоаммиачные АБТН, ведутся исследования применения других пар веществ. В работе рассматривается установка водоаммиачного АБТН.

Принцип работы установки заключается в следующем. Морская вода предварительно подогревается в теплообменнике 7 за счет охлаждения пресной воды поступает в испарительную колонну 1, где дополнительно нагревается, за счет конденсации рабочего агента, циркули-

рующего в контуре АБТН. В результате контакта с морской водой воздушный поток, подаваемый через газораспределительную решетку 2, увлажняется, а затем поступает в испаритель 6, где вследствие отвода тепла осушается.

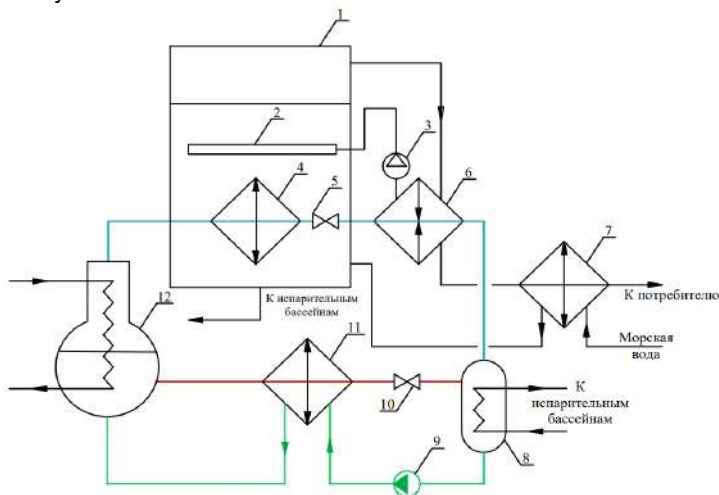


Рис. 1. Принципиальная схема контактной термической опреснительной установки с абсорбционным тепловым насосом:

- 1 – испарительная колонна; 2 – газораспределительная решетка; 3 – газодувка;
- 4 – конденсатор; 5, 10 – терморегулирующий вентиль; 6 – испаритель;
- 7 – теплообменник пресной воды; 8 – абсорбер; 9 – насос;
- 11 – регенеративный теплообменник; 12 – генератор

Полученный конденсат является пресной водой, которая используется далее для подогрева морской воды. Осушенный воздух после испарителя 6 газодувкой 3 подается в газораспределительную решетку 2. Образующийся в ходе работы рассол отправляется в испарительные бассейны, подвод энергии в которые осуществляется теплоносителем, поступающим из абсорбера 8. Для повышения эффективности работы абсорбционного теплового насоса между генератором 12 и абсорбером 8 установлен регенеративный теплообменный аппарат 11, перемещение и повышение давления раствора осуществляется насосом 9.

Согласно исследованиям работы контактных опреснительных установок одним из факторов, оказывающих влияние на их производительность, является температура осушки ПВС [1]. В этой связи авторами было проведено исследование влияния данного фактора на основной показатель эффективности работы АБТН – коэффициент трансформации (рис.2), при этом расчет параметров цикла выполнен с использованием методики, изложенной в [2].

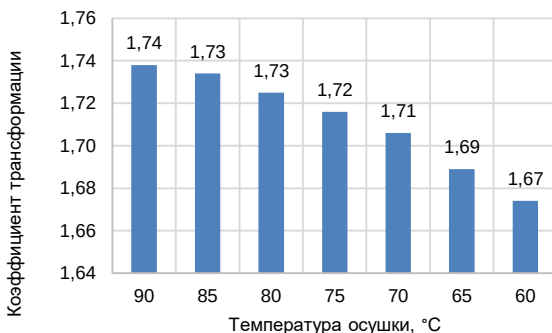


Рис. 2. Зависимость коэффициента трансформации АБТН от температуры сушки

Как видно из диаграммы изменение температуры сушки в опреснительной установке приводит к незначительным изменениям коэффициента трансформации АБТН.

Литература

1. Козлова, М.В. Исследование работы термической опреснительной установки с контактным испарителем и компрессией паровоздушной смеси / М.В. Козлова, А.В. Банников, С.А. Банникова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2024. № 5. С. 21-30.

2. Соколов Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Соколов, Е.Я.; Бродянский, В.М. Изд-во: М.: Энергия, 1981 г. 320 с.

УДК 502.174

М.В. КОЗЛОВА, к.т.н., доцент
А.В. САМОЛОВОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул.Рабфаковская, 34
E-mail: mariyakozlova1996@gmail.com, rbk201548@gmail.com

Оценка эффективности термодинамических циклов паротурбинных установок при утилизации теплоты уходящих газов

Аннотация. В работе приведены результаты исследования способов использования тепла дымовых газов для генерации электроэнергии путем применения паротурбинных установок, работа которых основана на цикле Ренкина (на водяном паре и органических веществах), а также цикле Калины.

Ключевые слова: термодинамические циклы, паротурбинная установка, уходящие газы, низкопотенциальная энергия.

M.V. KOZLOVA, Candidate of Engineering, senior lecturer
A.V. SAMOLOVOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: mariyakozlova1996@gmail.com, rbk201548@gmail.com

Comparison analysis of efficiency of thermodynamic cycles of steam turbine plants at utilization of heat of flue gases

Abstract. The paper presents the results of a study of methods for using flue gas heat to generate electricity by using steam turbine units whose operation is based on the Rankine cycle (on water vapor and organic substances), as well as the Kalina cycle.

Key words: thermodynamic cycles, steam turbine plant, flue gases, low-potential energy.

В современных энергетических системах значительное количество тепловой энергии теряется вместе с уходящими газами, образующимися при сжигании топлива на электростанциях, котельных и промышленных предприятиях. Эти газы, имеющие высокую температуру, представляют собой ценный энергетический ресурс, рациональное использование которого способно повысить общую эффективность применения первичных ресурсов, снизить вредные выбросы в атмосферу.

Теплота дымовых газов может использоваться в котлах-утилизаторах, которые работают в составе паротурбинных установок. Эффективность таких систем определяется используемым термодинамическим циклом.

Для утилизации теплоты уходящих газов могут использоваться:

1. **Цикл Ренкина на водяном паре** – основа большинства тепловых электростанций;

2. **Органический цикл Ренкина** – модификация для использования на энергетических установках малой мощности при низких температурах;

3. **Цикл Калины** – альтернативный цикл с зеотропным рабочим телом.

В работе представлены результаты сопоставления эффективности данных термодинамических циклов при функционировании на различных рабочих телах и температурах греющей среды.

В классическом цикле Ренкина в качестве рабочего тела используется водяной пар. Данный цикл может быть адаптирован для утилизации тепла дымовых газов, если их температура достаточно высокая (как правило более 250°C). В результате расчета установлено, что для цикла Ренкина на водяном паре КПД установки составляет 25,7% при температуре уходящих газов 200°C, 27,4% – 300°C, 28,2% – 350°C.

Органический цикл Ренкина является модификацией классического цикла Ренкина, в котором в качестве энергоносителя используется

органическое рабочее тело с низкой температурой кипения, данный цикл особенно эффективен для утилизации низкопотенциального тепла, такого как тепло дымовых газов с температурой 100–300 °С). На рис. 1 приведена зависимость КПД цикла Ренкина в зависимости от рабочего тела и температуры греющей среды.

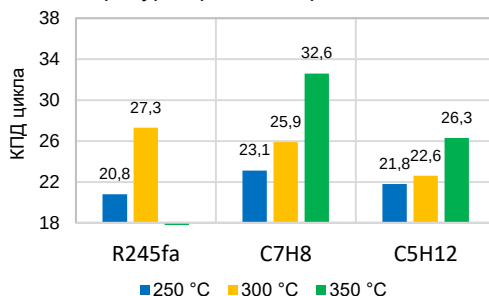


Рис. 1. Зависимость КПД органического цикла Ренкина от температуры греющей среды для различных органических веществ

Наибольшая эффективность при температуре 350 °С достигается при использовании толуола, однако стоит отметить, что его использование при температурах выше 380 °С невозможно, данное обстоятельство справедливо для рабочего агента R245fa, его рабочий диапазон не превышает 300 °С.

Цикл Калины – это термодинамический цикл, используемый в бинарных энергетических установках для преобразования низкопотенциального тепла в полезную работу. Наиболее распространенными смесями веществ, используемых в цикле Калине на сегодняшний день, является водоаммиачный ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) и бромистолитиевый ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) растворы.

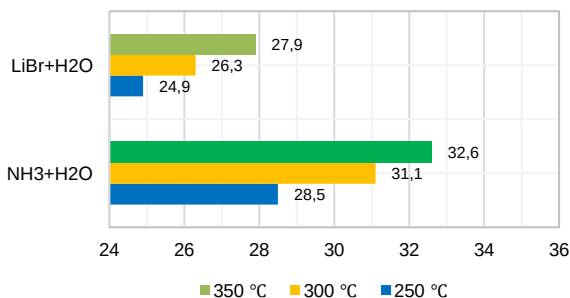


Рис. 2. Зависимость КПД цикла Калины от температуры греющей среды для различных органических веществ

Повышение эффективности цикла Калины по сравнению с циклом Ренкина обусловлено возрастанием работы, совершаемой в турбине, за счет замещения процесса конденсации пара на его абсорбцию, которая протекает при более низких параметрах, а также обусловлено свойствами рабочих тел. Как видно из диаграммы (рис. 2) использование водоаммиачного раствора в цикле Калины для рассматриваемого диапазона параметров является наиболее эффективным.

В табл. 1 приведены параметры работы рассматриваемых циклов, а также основные характеристики циклов.

Таблица 1. Характеристики термодинамических циклов паротурбинных установок

Параметр	Цикл Ренкина	Орган. Цикл Ренкина	Цикл Калины
Рабочее тело	Вода/пар	Органические вещества	$\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Рабочий температурный диапазон (°C)	250-550	70-350	100-400
Достоинства	Надежность, масштабируемость	Работа при низких температурах	Работа при низких температурах
Недостатки	Низкий КПД при малых температурах	Дорогостоящие рабочие агенты	Сложность системы

В результате расчетного исследования выявлено, что наиболее эффективным при утилизации теплоты является использование цикла Калины и органического цикла Ренкина при его функционировании на толуоле в диапазоне температур от 250 до 350 °C.

УДК 621.311

С.В. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н., доцент
Е.Д. НОВИКОВА, магистр

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E – mail: vasilyev.pte@mail.ru, katerinanovikova980@mail.ru

Выбор автономного источника энергоснабжения

Аннотация. В данной статье рассматривается методика выбора ГПУ в качестве автономного источника энергоснабжения, на основе сравнительного анализа по группам критериев, характеризующих различные показатели энергетических установок.

Ключевые слова: когенерация, газопоршневая установка, электрический КПД и мощность, энергетическая эффективность.

S.V.VASILIEV, Candidate of engineering, docent
E.D. NOVIKOVA, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E – mail: vasilyev.pte@mail.ru, katerinanovikova980@mail.ru

Selecting an Autonomous Power Supply Source

Abstract. This article presents a methodology for selecting a GPU as an autonomous power supply source, based on a comparative analysis of groups of such units that characterize various indicators of power plants.

Key words: cogeneration, Gas Piston Unit (GPU), electrical efficiency and power, energy efficiency.

В настоящее время все большую актуальность приобретают проблемы, связанные производством тепловой и электрической энергии. Развитие экономики влечет за собой значительное повышение энергопотребления как в нашей стране, так и во всем мире.

В связи с этим, использование когенерационных установок (КГУ) на базе газопоршневых двигателей, является все более востребованной технологией для повышения эффективности систем энергоснабжения предприятий различных отраслей экономики РФ. Применение технологии когенерации позволяет достигать экономии топлива, сокращения потерь при транспортировке энергоносителей, повышения надежности энергоснабжения и снижения вредных выбросов.

Для обоснованного выбора источника автономного энергоснабжения необходимо решить следующие задачи:

- определение требуемой электрической мощности источника автономного энергоснабжения на основании графика потребления электроэнергии;
- выполнить анализ существующих методов выбора источника энергоснабжения;
- провести исследование основных технических характеристик газопоршневых установок (ГПУ);
- выделить основные технические критерии и провести расчетные исследования по выбору типа ГПУ;
- выполнить расчет технико-экономических показателей для объективного выбора наиболее перспективных газопоршневых установок.

Для выбора типа энергоустановки необходимо проведение комплексного анализа с учетом технических, эксплуатационных, ресурсных и режимных характеристик ГПУ.

Исходными данными для проведения расчетов и анализа являются тепловые и электрические нагрузки, а также графики энергопотребления объекта. Выбор основного оборудования проводится по электрическому графику.

В работе проводился анализ факторов, влияющих на выбор источ-

ника автономного энергоснабжения [1–3] и др. Основными факторами для проведения исследований были выбраны:

- электрический КПД, %;
- скорость нагружения и разгружения, %, характеризующая возможность устойчивой работы ГПУ при резкопеременных графиках электрической нагрузки;
- ресурсные показатели до капитального ремонта, моточасы, определяющие совершенство конструкции ГПУ;
- удельная масса, кг/кВт;
- удельный расход топлива при номинальной мощности ГПУ, м³/ч;
- экологические показатели NO_x, г/кВт·ч;
- удельная стоимость ГПУ, руб/кВт.

В работе проведены исследования вариантов ГПУ отечественных и зарубежных производителей по наиболее важным критериям, на основании которых были отобраны наиболее перспективные установки, имеющие лучшие показатели по совокупности факторов.

Зависимости некоторых показателей для ГПУ различных производителей в качестве примера представлены на рис. 1 и 2.

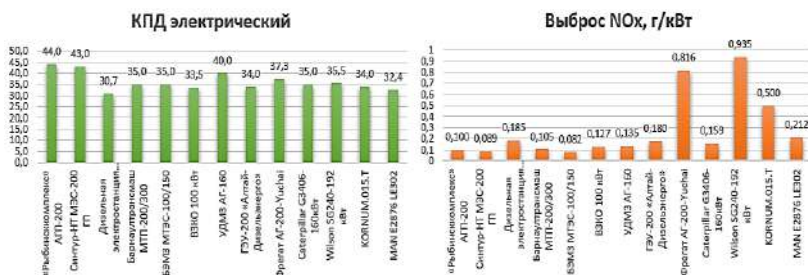


Рис.1. Зависимость электрического КПД и показателей выброса NO_x для ГПУ отечественных и зарубежных производителей.

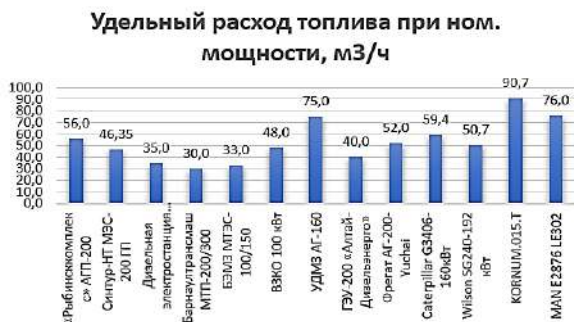


Рис. 2. Зависимость удельного расхода топлива для ГПУ отечественных и зарубежных производителей.

С целью объективной оценки при выборе наиболее эффективного типа ГПУ для обеспечения энергоснабжения потребителей в работе рассмотрен метод, основанный на построении квалиметрической факторно-критериальной модели [1].

В работе выполнен расчет технико-экономических показателей для последующего сравнительного анализа мини-ТЭЦ на базе ГПУ различных производителей с использованием программы, разработанной авторами в MS Excel [4].

В периоды снижения электропотребления потребителями имеет место уменьшение количества вырабатываемой тепловой энергии. В работе рассмотрен вопрос расчета мощности дополнительного источника теплоты, путем сравнения тепловой энергии, вырабатываемой системой утилизации тепла (СУТ) ГПУ, с тепловой энергией, необходимой потребителям.

В качестве объекта исследования для реализации рассмотренного метода выбора автономного источника энергоснабжения выбран дом отдыха Ивановской области.

Литература

1. Буров В.Д., Дудолин А.А., Макаревич В.В., Макаревич Е.В. Применение критериального метода при выборе газопоршневых установок для энергоснабжения различных категорий потребителей. Новое в Российской энергетике. №10, Москва. 2010. С. 12-23;
2. Мишин Е.А., Яворовский Ю.В., Куличихин В.В. Анализ характеристик газопоршневых установок, представленных на Российском рынке. Надежность и безопасность энергетики. №2(17), Москва. 2012. С. 55-58.
3. Буров В.Д., Дудолин А.А., Макаревич В.В., Макаревич Е. В. Потенциал применения газопоршневых двигателей зарубежных производителей на территории РФ. Турбины и дизели. Май. Рыбинск. 2009. С. 30-35.
4. Свидетельство 2022661360 РФ. Расчетный модуль для технико-экономического обоснования выбора газопоршневой установки для мини-ТЭЦ / Васильев С.В., Ставровский Е.С., Махов О.Н., Урвачев А.В. № 2022661360; заявл. 06.06.2022; опубл. 20.06.2022.

УДК 620.92

М.В. КАЛИНИНА, ассистент,
Л.В. ПЛОТНИКОВА, к.т.н.

Казанский государственный энергетический университет,
420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: esp_mvkalinina@mail.ru, mikhailovalv@mail.ru

Использование трансформаторов теплоты для утилизации вторичной энергии в целлюлозно-бумажной промышленности: технологии и перспективы

Аннотация. Одним из вариантов утилизации вторичной энергии с целью повышения энергоэффективности производства является использование транс-

форматоров теплоты в процессах сушки. Предложенная схема включает в себя установку теплового насоса, который позволяет нагреть холодный воздух до необходимых температур перед подачей в сушильную камеру, а затем извлечь тепло из отработанного влажного воздуха для дальнейшего использования. Такой подход демонстрирует значительный потенциал для снижения затрат топливно-энергетических ресурсов в промышленных процессах сушки за счет возврата в производство тепловой энергии, сбрасываемой ранее в окружающую среду.

Ключевые слова: утилизация вторичной энергии; трансформаторы теплоты; процессы сушки; тепловой насос; энергоэффективность; энергосбережение.

M.V. KALININA, Assistant,
L.V. PLOTNIKOVA, Ph.D.

Kazan State Power Engineering University
51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066
E-mail: esp_mvkalinina@mail.ru, mikhailovalv@mail.ru

The use of heat transformers for recycling secondary energy in the pulp and paper industry: technologies and prospects

Abstract. One of the options for recycling secondary energy in order to increase the energy efficiency of production is the use of heat transformers in drying processes. The proposed scheme includes the installation of a heat pump that allows you to heat the cold air to the required temperatures before feeding it to the drying chamber, and then extract heat from the exhaust humid air for further use. This approach demonstrates significant potential for reducing the cost of fuel and energy resources in industrial drying processes by returning heat energy previously discharged into the environment to production.

Key words: recycling of secondary energy; heat transformers; drying processes; heat pump; energy efficiency; energy saving.

Повышение энергоэффективности является приоритетной задачей современных промышленных предприятий в том числе и целлюлозно-бумажной промышленности, в связи с высокой стоимостью натуральных видов топлива.

Анализ показывает, что возможное улучшение работы промышленных предприятий целлюлозно-бумажной промышленности может быть достигнуто переходом на более высокий энерго- и ресурсосберегающий технологический уровень, который может быть получен следующими направлениями энергосбережения.

Пути решения проблем, стоящих перед целлюлозно-бумажной промышленностью – основные направления энергосбережения:

1. переход на энергосберегающие технологии и конструктивное совершенствование процессов и технологических агрегатов производства;

2. повышение тепловых и термодинамических КПД энергетических установок и энергопотребляющих элементов, агрегатов;

3. построение энерготехнологического комплекса для теплотехноло-

гической схемы с привлечением методов математического моделирования [1,2].

Наибольшие потери тепловой энергии в процессах сушки – это потери с отработанным нагретым воздухом. Поэтому предлагается рассмотреть возможность использования потенциала отработанного воздуха для нужд технологии; наибольший энергетический эффект дает вариант с поднятием потенциала в трансформаторе. Он показан на рис. 1. Перед процессом сушки воздух всегда требует нагрева [2, 3] (рис. 1а). Снизить затраты тепловой энергии на процесс подогрева воздуха возможно использованием теплоты отработанного воздуха (рис. 1 б), потенциал которого повышается в термотрансформаторе (рис. 1 в).

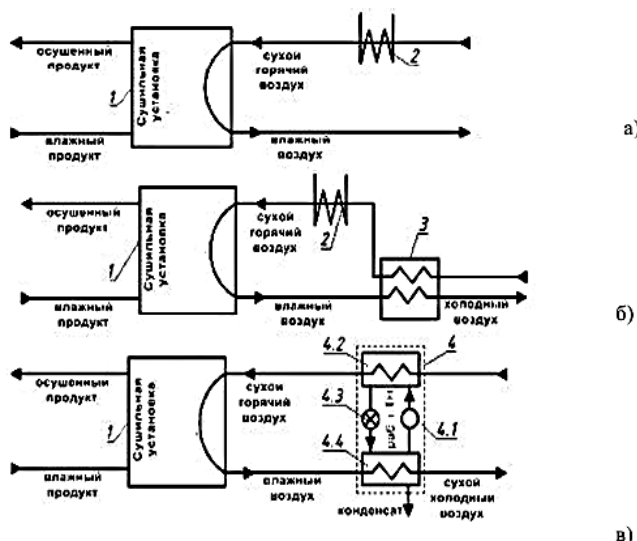


Рис. 1. Включение трансформатора теплоты в технологические процессы сушки: а) схема подготовки воздуха для сушильной камеры; б) схема подготовки воздуха для сушильной установки с рекуператором; в) схема включения термотрансформатора; 1 – сушильная камера; 2 – нагреватель; 3 – рекуператор; 4 – тепловой насос; 4.1 – компрессор, 4.2 – конденсатор; 4.3 – дроссельный клапан; 4.4 – испаритель; раб.т. ТН – рабочее тело теплового насоса.

Работа схемы включения теплового насоса для утилизации теплоты отработанного влажного воздуха сушильной части бумагоделательной машины, с целью доведения параметров влажного воздуха до требуемых параметров греющего сухого воздуха (рис. 1 в): холодный воздух поступает в конденсатор теплового насоса, где он нагревается до необходимой температуры и направляется в сушильную камеру. В сушиль-

ной камере за счет тепломассообмена температура воздуха понижается, а влагосодержание увеличивается. Происходит удаление влаги из продукта. Далее влажный воздух направляется в испаритель теплового насоса, где охлаждается. Одновременно с процессом охлаждения происходит удаление выпавшей влаги. В результате использования тепловых насосов в процессах сушки достигается экономия энергоресурсов до 80 % [4].

Осуществление вышеуказанных мероприятий и организация системы утилизации сбросной энергии обеспечат повышение энергетической и технологической эффективности исследуемого производства. Это даст возможность дополнительно вырабатывать энергетические ресурсы и сэкономить значительные объемы топлива, тепловой и электрической энергии. Трансформаторы теплоты служат эффективным инструментом для утилизации вторичной энергии в промышленности. Они заметно улучшают показатели энергоэффективности предприятий, снижают затраты на энергоресурсы и уменьшают отрицательное воздействие на природную среду. Благодаря своей многофункциональности и разнообразию областей применения, эти устройства становятся важной составляющей современных производственных процессов, ориентированных на усиление устойчивости и конкурентоспособности бизнеса.

Благодарности. Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2025-458 от 17.01.2025 г.

Литература

1. Назмеев Ю.Г., Конахина И.А. Организация энерготехнологических комплексов в нефтехимической промышленности: научное издание. М.: МЭИ, 2001. 364 с.
2. Рекуперация и аккумулирование вторичных энергетических ресурсов на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса / Ю.В. Ваньков, Л.В. Плотникова, Ш.Г. Зиганшин, А.Р. Загретдинов. СПб.: Изд-во «Научное издание технологий», 2024. 142 с. ISBN 978-5-907804-203. EDN QDKPAB.
3. Байнов А.М., Плотникова Л.В. Преимущества и недостатки моделирования теплотехнологических процессов нефтепереработки и газофракционирующих установок в среде ASPEN HYSYS // Математические методы в технологиях и технике, 2024, № 6, С. 111-114.
4. Красавина Е.О., Плотникова Л.В. Энергосберегающий тепловой насос в системах промышленного разделения веществ // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2016, № 4 (32), С. 95-105.

УДК 699.86

Г.И. ПАРФЕНОВ, аспирант,
С.О. ГОРДЕЕВ, студент,
Н.Н. СМIRНОВ, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: parfenovgip@gmail.com

Результаты натурных испытаний оконного блока с энергоэффективным ставнем для условий г. Иваново

Аннотация. В работе приведены результаты натурного физического эксперимента по определению эффективности применения энергоэффективного ставня в окнах на снижение тепловых трансмиссионных потерь. Окна с теплоотражающими ставнями были смонтированы на жилой дом. В качестве светопрозрачной части окна использовался двухкамерный стеклопакет. Прослойки между теплоотражающими экранами были заполнены как воздухом, так и аргоном. Результаты эксперимента подтвердили эффективность применения ставня.

Ключевые слова: стеклопакет, оконный блок, ставень, аргон, теплоотражающие экраны, натурные испытания

G.I. PARFENOV, postgraduate student,
S.O. GORDEEV, student,
N.N. SMIRNOV, PhD.

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, st. Rabfakovskaya, 34
E-mail: parfenovgip@gmail.com

Results of field tests of a window block with an energy-efficient shutter for the conditions of Ivanovo

Abstract. The paper presents the results of a full-scale physical experiment to determine the efficiency of using an energy-efficient shutter in windows to reduce heat transmission losses. Windows with heat-reflecting shutters were mounted on a private house. A double-chamber glass unit was used as the translucent part of the window. The layers between the heat-reflecting screens were filled with both air and argon. The results of the experiment confirmed the efficiency of using the shutter.

Key words: double-glazed window, window unit, shutter, argon, heat-reflecting screens, full-scale testing

В строительной теплофизике особое внимание уделяется вопросам повышения тепловой защиты существующих и проектируемых зданий и сооружений [1]. «Слабым звеном» в тепловой защите являются светопрозрачные конструкции (СПК), обладающие наименьшим значением сопротивления теплопередаче. В качестве энергосберегающих решений предлагается увеличение количества слоёв остекления, применение теплоотражающих покрытий и металлических экранов, заполнение воздушных прослоек газами с низкой теплопроводностью, вакуумиро-

вание и т.д. Одним из наиболее рациональных энергосберегающих решений является применение теплоотражающих перемещаемых металлических экранов в СПК, которые значительно снижают тепловые трансмиссионные потери [2]. Экраны необходимо использовать в темный период суток или во время отсутствия людей в помещении.

В работе [2] были проведены экспериментальные лабораторные исследования в климатической камере АНО "Ивановостройиспытания", а также имитационное моделирование процесса теплопередачи через светопрозрачные ограждающие конструкции в нескольких программно-вычислительных комплексах, подтвердившие высокую энергоэффективность применения экранов.

Авторами была доработана конструкция энергоэффективного наружного ставня [3] в части использования в качестве основы для слоя теплоизоляционной сэндвич-панели, а также заполнения прослоек между теплоотражающими экранами малотеплопроводными газами, такими как аргон. На теплоизоляционные панели с помощью клея фиксировались фрагменты алюминиевой фольги, обладающей высокими теплоотражающими свойствами. Благодаря поддержке и помощи крупнейшего завода по производству окон ООО «Штандарт» были изготовлены промышленные образцы ставня.

Был выполнен натурный физический эксперимент по определению эффективности использования ставня на оконном блоке, включающем в себя двухкамерный стеклопакет, установленный в частном жилом доме. Моделировали процесс теплопередачи через оконный блок, включающий в себя двухкамерный стеклопакет формулой СПД 4M₁-10-4M₁-10-4M₁ и раму из ПВХ (поливинилхлорид) профиля. Со стороны окружающей среды размещали энергоэффективный ставень, состоящий из трех металлизированных сэндвич-панелей, толщиной 10 мм, прослоек толщиной 10 мм, заполненных как воздухом, так и аргоном. В качестве рамы использовался ПВХ профиль. Окна с теплоотражающими ставнями были смонтированы на частный дом (рис. 1).

Температуры воздуха в помещении дома, наружного воздуха, а также на поверхностях фиксировались с помощью платиновых термометров сопротивления. Удельный тепловой поток измерялся с помощью откалиброванных тепломеров на основе термобатареи, предоставленных Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии имени Д.И. Менделеева. Первичные преобразователи подключались к измерителю-регулятору температуры ИРТ-4/16-Т. Общая приборная погрешность измерений приведенного сопротивления теплопередаче не превышала 5%.

В ходе выполнения анализа результатов эксперимента было выявлено положительное влияние от применения ставня на увеличение как приведенного сопротивления теплопередаче окна, так и температуры его внутренней поверхности. Самое большое значение приведенного сопротивления теплопередаче, равное 2,65 (м²·°С)/Вт, было получено при заполнении прослоек между экранами аргоном.



Рис. 1. Энергоэффективные ставни с теплоотражающими экранами, установленные на оконные блоки жилого дома

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия инновациям, предоставленного в рамках программы «Студенческий стар-тап» федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства» по договору №3366ГССС15-L/100096.

Литература

1. Савин В.К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. М.: Лазурь, 2005. 432 с.
2. Смирнов Н.Н. Совершенствование систем по созданию динамического микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями // диссерт. ... канд. техн. наук: 05.14.04. Иваново, 2022. 333 с.
3. Пат. №154163 Российская Федерация, МПК Е 06 В 9/17. Многофункциональный энергоэффективный ставень / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, Д.А. Лапатеев и др.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. №2014137231/12, заявл. 15.09.2014; опубл. 20.08.2015, бюл. №23.

АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

А

АБДУЛЛИНА А.А. 179
 АВДОКУНИН Н.В. 193
 АДАКИН Р.Д. 205
 АКСАКОВСКИЙ И.Д. 335
 АКСЕНЧИК К.В. 307
 АНДРЕЕВ А.С. 307
 АРБАТСКИЙ А.А. 155, 188

Б

БАДРЕТДИНОВА Г.Р. 173
 БАННИКОВ А.В. 341
 БАННИКОВА С.А. 341
 БАРАКОВСКИЙ Д.С. 335
 БАРОЧКИН А.Е. 91
 БАРОЧКИН Е.В. 68
 БАСОВА Е.В. 329, 332
 БАТАРОНОВ И.Л. 320
 БАШКИНОВ В.Ю. 345
 БЕЛЯЕВ А.Р. 133
 БЕЛЯЕВ И.А. 166
 БЕЛЯКОВ А.А. 130, 133
 БЕЛЯКОВ А.Н. 329, 332
 БОГАЧЕВ В.Е. 324
 БОЛОНИН Е.В. 3
 БОРИСОВ А.А. 65, 74
 БОРЩЕВ Н.О. 166
 БУДАНОВ В.А. 97
 БУЛАЕВА В.С. 182
 БУРАКОВ И.А. 200, 203
 БУРМАКИНА А.В. 213, 225
 БУРОВ В.Д. 34, 37, 40, 43
 БУХМИРОВ В.В. 151, 237, 240
 БУШУЕВ Е.Н. 102, 105, 151
 237
 БУШУЕВА Н.В. 102
 БЫКОВ К.А. 142

В

ВАЛИНЕЕВА А.А. 222
 ВАНЬКОВ Ю.В. 345, 352, 355,
 358, 364
 ВАНЮШКИН В.Д. 225
 ВАСИЛЬЕВ С.В. 394
 ВДОВИНА В.А. 176, 317
 ВЕРЕНИН А.А. 93
 ВЕСТ Д.Д. 381
 ВИНОГРАДОВ А.Л. 97
 ВИНОГРАДОВ В.Н. 324

ВИХАРЕВ И.Е. 130
 ВОЛЬМАН М.А. 127
 ВОРОНОВ А.Н. 136

Г

ГАБИТОВ Р.Н. 249
 ГАРЯЕВ А.Б. 155, 184, 234
 ГАФИАТУЛЛИНА К.Р. 364
 ГИЛЬМУТДИНОВ Е.Д. 77
 ГЛАЗОВ В.С. 162, 210
 ГОДОВЫХ П.В. 384
 ГО ЦЗИНЬФА 43
 ГОЛУБЕВ А.В. 3, 6, 15
 ГОРБУНОВ В.А. 139, 142
 ГОРДЕЕВ С.О. 401
 ГОРЕЛОВ М.В. 188
 ГОРИНОВ О.И. 249
 ГОРЧАКОВ Д.А. 350
 ГОРШЕНИН С.Д. 65, 74, 77,
 303
 ГРЕСЕВА В.М. 21
 ГРИГОРЬЕВ Е.Ю. 97, 100
 ГРИГОРЬЕВ Е.Ю.
 ГУСАРОВ А.В. 46, 55
 ГУСЕВ Е.В. 285, 288, 299

Д

ДАНИЛОВА А.А. 374
 ДЕМЬЯНЕНКО Р.П. 139
 ДМИТРИЕВ А.В. 173
 ДОЛИНИН Д.А. 240
 ДОРОХОВА О.А. 320
 ДУБОВ И.Е. 3
 ДУДОЛИН А.А. 338

Е

ЕГОРОВ О.С. 9
 ЕЛИСЕЕВ В. В. 27
 ЕМЕЛЬЯНОВ К.О. 127
 ЕРЕМИНА Н.А. 120
 ЕРМАКОВ К.К. 9

Ж

ЖИХАРЕВА В.Р. 225
 ЖОЛОБОВА А.Ю. 102, 105
 ЖУКОВ В.П. 68, 303, 324
 335

З

ЗИНОВЬЕВА А.С. 65, 68
 ЗИНУРОВ В.Э. 179

ЗОРИН М.Ю. 79
 ЗОТОВ Д.С. 264
 ЗОТОВА К.В. 111

И

ИВАНОВ М.Д. 269
 ИЛЬЕНКОВА В.О. 158
 ИЛЬЧЕНКО А.Г. 136

Й

ЙЕ В.А. 200, 203
 ЙЕ Х.К. 200, 203

К

КАДЫРОВ Ч.А. 162
 КАЛЕТИН С.О. 295
 КАЛИНИНА М.В. 397
 КАНАРЕЙКИН В.И. 6
 КАРПЫЧЕВ Е.А. 108
 КИСЕЛЕВ А.И. 97
 КИСЛИЦЫН М.А. 216
 КЛОЧКОВА В.А. 255
 КОЗЛОВА М.В. 384, 388, 391
 КОЗЛОВЦЕВ А.П. 295
 КОКУЛИН И.А. 324
 КОЛБАШОВ И.В. 252
 КОЛЕГАНОВ А.В. 142
 КОЛИБАБА О.Б. 205, 219, 249, 282

КОНОВ Д.С. 313
 КОНОВАЛОВ А.В. 371, 374
 КОРОЛЕВ В.С. 216
 КОРОЧКИНА Е.Е. 252
 КРАЙКОВ М.Д. 364
 КУЗНЕЦОВ Г.В. 272
 КУЗЬМИН А.А. 9
 КУЛЕШОВ О.Ю. 291
 КУРБАНГАЛЕЕВА А.М. 24

Л

ЛАВРЕНОВ В.С. 384
 ЛАПТЕВ А.Г. 255, 258
 ЛАРИН А.Б. 111, 114, 117
 ЛАРИН Б.М. 111, 114
 ЛЕБЕДЕВА С.А. 310
 ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В. 65, 68, 74
 ЛЁТИН К.А. 313
 ЛИТВИНЕНКО А.А. 345
 ЛОБОВ А.Д. 162, 210
 ЛУКИН С.В. 269

М

МАГОМЕДОВА Р. 228
 МАКАРИН Ю.А. 34

МАКАРОВ М.В. 313
 МАЛЕЕВА А.Е. 246
 МАНИН Н.Т. 91
 МЕЧНИК Д.А. 188
 МИНЕЕВ П.А. 82, 87
 МИХАЛИН М.А. 40
 МИХАЛЬЦОВ Д.А. 246
 МОЛЬКОВ Н.С. 282
 МОРОЗОВ Д.С. 378
 МУГИНОВ А.М. 179
 МУРАВЬЕВ И.К. 12, 18, 31
 МФЕГ Ж.В. 210

Н

НАБОЙЩИКОВА Н.А. 299
 НАЧКЕБИЯ Н.С. 275
 НЕКРАСОВ О.В. 37
 НИГМАТЗЯНОВ Д.З. 24
 НИКИШИНА Г.В. 24
 НИКОНОРОВ А.Н. 21, 27
 НОВИКОВА Е.Д. 394
 НЯМБА И.Р. 100

О

ОВЧИННИКОВ А.А. 291
 ОГЛЫ АЛАСГАРЛИ С.У. 258
 ОГУРЦОВ А.В. 310, 313
 ОДИНЦОВ И.О. 155
 ОЧЕРЕТИН В.А. 291

П

ПАЗУШКИНА О.В. 378
 ПАК В.Г. 288
 ПАНКОВ С.А. 71
 ПАРФЕНОВ Г.И. 401
 ПАХОТИНА И.Н. 252
 ПЕРЕСЫПКИН И.А. 15
 ПЕТИН С.Н. 216, 225
 ПИСАРЕВ Д.С. 261
 ПЛОТНИКОВА Л.В. 355, 397
 ПОЖЕНЬКО В.А. 184
 ПОЛИТОВА Т.О. 361
 ПОНОМАРЕВ Р.А. 352
 ПОПОВ С.К. 213, 222
 ПРАНЬКОВ Д.А. 12
 ПРЕЦ М.А. 176, 317
 ПУРДИН М.С. 228

Р

РАКУТИНА Д.В. 246
 РАХИМОВ Р.Ф. 166
 РОДИОНОВА М.В. 151

РОСЛЯКОВ П.В. 145
 РУМЯНЦЕВ А.С. 384

С

САВЧЕНКОВ А.М. 182
 САВЧЕНКОВА Н.М. 158, 182, 231
 САМОЛЛОВ А.В. 391
 САМСОН И.Ф. 234
 СВЕТУШКОВ И.И. 151, 240
 СЕМЯШКИН Р.Д. 388
 СЕННИКОВ В.В. 371
 СЕРГИЕНКОВА А.А. 285
 СЕРОВ Д.Ю. 381
 СИДОРОВ Д.В. 338
 СИНЬБУХОВА М.С. 231
 СМЕРНОВ В.В. 371
 СМЕРНОВ Д.А. 243
 СМЕРНОВ Н.Н. 401
 СМЕРНОВ С.А. 332
 СОЕНКО Д.Г. 130
 СОЗИНОВА Т.Е. 243
 СОКОЛОВ В.Ю. 295
 СОКОЛЬСКИЙ А.И. 285
 СТЕПАНОВ И.А. 210
 СУЛЕЙМАНОВ М.Г. 237
 СУЛЕЙМАНОВ М.Ж. 166
 СЫРОДОЙ С.В. 272

Т

ТАМАШЕВИЧ М.С. 272
 ТИМЕРШИН А.Р. 355
 ТОМАНОВ Е.И. 145
 ТРИФОНОВ А.Ю. 18
 ТУРУЛИНА Ю.О. 279
 ТУРЧЕНКО И.С. 264

У

УГАРОВ М.Ю. 136
 УЛАНОВ В.Д. 37
 УХАЛОВА Е.Г. 117, 123

Ф

ФЕДОРОВ Д.С. 74
 ФЕДОСЕЕВ Л.А. 166
 ФОМИЧЕВ Д.О. 139
 ФОМИЧЕВ М.Д. 303

Х

ХАМИДУЛЛИН Р.Н. 258
 ХАРИТОНОВ Б.М. 130, 133
 ХРИПКОВА Л.Н. 123
 ХУДЯКОВ Н.М. 367
 ХУСНУТДИНОВА К.Р. 358

Ц

ЦУКАНОВ Р.Е. 234

Ч

ЧЕРМАСОВА У.Г. 24

Ш

ШАРАФИЕВ Д.Е. 358
 ШАФИГУЛЛИН И.Д. 24
 ШЕВЯКОВ М.Ю. 216
 ШЕСТАКОВ А.П. 97
 ШИНКЕВИЧ Д.А. 12, 31
 ШИХТА Р.Н. 261
 ШМЕЛЕВ А.С. 310
 ШОМОВ П.А. 282
 ШУВАЛОВ С.И. 93

Ю

ЮЗЮК В.В. 228

Я

ЯКОВЛЕВ И.В. 193
 ЯРУНИН С.Н. 367
 ЯРУНИНА Н.Н. 367

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 4. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ	3
Секция 6. ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ	34
Секция 9. ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ	151
Секция 12. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ	303
Секция 17. ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА	338

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»**
(XXIII Бенардосовские чтения),

*Посвящается 80-летию
Российской атомной промышленности*

Печатаются в авторской редакции

II том
Теплоэнергетика

Электронное издание

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34