

Барочкин Алексей Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММНЫХ
КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ
МНОГОПОТОЧНЫХ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ СИСТЕМ ТЭС**

Специальности: 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ
05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2012

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика» ФГБОУ ВПО
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор

Жуков Владимир Павлович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор

Бобков Сергей Петрович

доктор технических наук, профессор

Шувалов Сергей Ильич

Ведущая организация:

**Ярославский государственный
технический университет,
г. Ярославль**

Защита состоится **2 марта 2012 г.** в 11 часов на расширенном заседании диссертационного совета Д 212.064.03 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат разослан _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.А. Шульпин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вопросы энергосбережения при генерации, передаче и использовании тепловой и электрической энергий приобрели особую актуальность в связи с сокращением запасов органического топлива и изменением климата на планете. Подтверждением актуальности указанных проблем является принятие в 2009 году федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Развитие и совершенствование энергосберегающих технологий в современных теплообменных системах, включающих большое число подсистем и связей между ними, во многом сдерживается отсутствием методов расчета и современных компьютерных комплексов, позволяющих адекватно прогнозировать состояние таких систем во всем диапазоне нагрузок оборудования.

Традиционно задачи теплопередачи решаются применительно к двухпоточным системам, в которых теплообмен осуществляется между горячим и холодным теплоносителями. Однако наряду с двухпоточными системами нередко встречаются многопоточные системы, в которых число потоков теплоносителей составляет три и более. Примером многопоточных теплообменных систем являются пластинчатые теплообменные аппараты, у которых число параллельно включенных каналов достигает нескольких десятков, а в каждом внутреннем канале теплоноситель обменивается теплом с двумя соседними потоками. Другим примером многопоточных теплообменных систем являются паровой энергетический котел и многоконтурные котлы-утилизаторы, в которых процессы теплопередачи осуществляются между потоками горячих газов, воздуха, питательной воды, пара, сетевой воды (при наличии встроенного в котел-утилизатор газодводяного теплообменника). В качестве еще одного примера многопоточной теплообменной системы можно привести конденсатор паровой турбины, в котором процессы тепломассообмена осуществляются между потоками охлаждающей воды, пара турбины, конденсата этого пара, неконденсируемых газов в паровой и газовой фазах, сетевой воды (при наличии в конденсаторе встроенных теплофикационных пучков). Наиболее эффективный теплообмен между двумя теплоносителями реализуется при противоточной схеме их движения. Если число теплоносителей больше двух, то для выбора оптимальной структуры потоков требуется дополнительный анализ системы. В большинстве существующих методов расчета многопоточные системы представляются совокупностью двухпоточных подсистем. Например, котельный агрегат, согласно нормативной методике, рассчитывается как совокупность пакетов теплообмена между двумя потоками теплоносителей. Однако такая возможность представляется далеко не всегда. В частности, пластинчатые и спиральные теплообменные системы не могут быть тождественно представлены двухпоточными подсистемами, так как в них внутренние потоки теплоносителей участвуют одновременно в теплообмене с двумя соседними потоками. Совершенствование методов расчета и оптимизации многопоточных многоступенчатых тепломассообменных систем, позволяющих более детально и точно прогнозировать их поведение, представляет несомненный интерес для различных отраслей промышленности.

Актуальность работы подтверждается также ее выполнением в рамках Федеральной целевой программы «Интеграция» (2.1-А118 Математическое моделирование ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий) и договоров о междуна-

родном научно-техническом сотрудничестве с Ченстоховским политехническим университетом (Польша).

Целью работы является разработка математических моделей и программных комплексов для расчета и оптимизации многопоточных теплообменных систем ТЭС.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. разработка научных основ и применение математического моделирования для описания процесса теплопередачи в многопоточных системах при различном характере движения теплоносителей. Получение аналитического решения для трехпоточной одноступенчатой системы при четырех возможных вариантах относительного движения теплоносителей;

2. разработка численного метода решения задачи теплопередачи в многоступенчатых многопоточных многофазных системах;

3. разработка системы кодификации структуры потоков, метода автоматизированного расчета системы по коду и генетического алгоритма структурной оптимизации многопоточных многоступенчатых теплообменных установок;

4. разработка алгоритма решения задачи теплообмена и массообмена в многофазных средах и программных комплексов для его компьютерной реализации, обеспечивающих расчет показателей работы систем при изменении значений конструктивных и режимных параметров;

5. практическая реализация результатов работы путем разработки математического описания и совершенствования процессов теплообмена в технологических системах тепловых электростанций.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности 05.13.18* – «разработка фундаментальных основ и применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем физических и технических объектов»; *в части области исследования специальности 05.13.18* – пункту 4: «Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных методов с применением ЭВМ»; пункту 5: «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов программно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов»; пункту 6: «Комплексное исследование научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента»; *в части области исследования специальности 05.14.14* – пункту 1: «Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов ...»; пункту 2: «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах тепловых электростанций».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны научные основы математического описания процесса теплопередачи в многопоточной ступени теплообменных установок в виде системы линейных дифференциальных уравнений в матричной форме. Для трехпоточной ступени получены аналитические решения системы при четырех возможных вариантах относительного движения теплоносителей и проведен анализ влияния характера относительного движения теплоносителей на процесс теплопередачи.

2. Разработан обобщенный численный метод решения задачи теплопередачи в многопоточной многоступенчатой теплообменной системе.

3. Предложены система кодификации структуры потоков многопоточных многоступенчатых теплообменных систем и алгоритм построения расчетной модели по коду, на основе которых разработан генетический алгоритм оптимизации структуры потоков.

4. Предложены основанный на ячеечной методологии численный метод и вычислительный алгоритм решения задачи тепломассообмена в выбранном фазовом пространстве в конденсаторе паровой турбины, обеспечивающие расчет параметров потоков теплоносителей, включая концентрации растворенных в конденсате газов – кислорода и диоксида углерода.

Практическая ценность результатов заключается в следующем:

1. Разработан программный комплекс, защищенный свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (№2010610878), по расчету многопоточных многоступенчатых аппаратов, реализующий разработанный численный метод и вычислительный алгоритм решения задачи тепломассообмена в выбранном фазовом пространстве многофазной среды.

2. Разработан защищенный свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ программный комплекс по расчету и построению энергетических характеристик поверхностных водоохлаждаемых конденсаторов паровых турбин, предусматривающий верификацию математической модели по результатам натурных испытаний (заявка №2011619437).

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования; совпадением результатов расчета и фактических показателей работы оборудования; сопоставлением полученных результатов с опубликованными результатами исследований других авторов; проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации с использованием стандартизованных методов и средств измерения параметров.

Автор защищает:

– математическое описание процесса теплопередачи в многопоточной ступени теплообменных установок в виде системы линейных дифференциальных уравнений и ее аналитические решения при четырех возможных вариантах относительного движения трех теплоносителей, найденные эффективные структуры потоков теплоносителей;

– обобщенный численный метод решения задачи теплопередачи для многопоточной многоступенчатой теплообменной системы применительно к пластинчатым аппаратам;

– генетический алгоритм оптимизации структуры потоков многопоточных многоступенчатых теплообменных систем, разработанный на основе предложенных системы кодификации структуры потоков и алгоритма построения расчетной модели по коду;

– разработанные численный метод и вычислительный алгоритм решения задачи тепломассообмена в выбранном фазовом пространстве многофазной среды в конденсаторе паровой турбины;

– программные комплексы, реализующие предложенные расчетные алгоритмы и методы, защищенные свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ;

– результаты практического использования разработанных программных комплексов при обработке экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний конденсационной установки паровой турбины ТЭЦ ОАО «Северсталь».

Реализация результатов работы. Результаты промышленных испытаний конденсатора паровой турбины, программные модули, разработанные на основе идентифицированной математической модели, данные о влиянии режимных и конструктивных факторов на характеристики процессов деаэрации турбинного конденсата по растворенному кислороду и диоксиду углерода переданы в ОАО «Северсталь» (г. Череповец Вологодской обл.). Разработанные на основе этих результатов рекомендации по ведению эксплуатационных режимов охлаждения конденсатора турбоагрегата ПТ-12-35/10М КТЗ обеспечивают получение расчетной дополнительной годовой выработки электроэнергии в размере 337,4 тыс. кВт.ч при сохранении затрат тепловой энергии на турбоагрегат и нагрузок регулируемых отборов пара за счет уменьшения переохлаждения турбинного конденсата в конденсаторе. Результаты работы внедрены также в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета в рамках курса «Тепломеханическое и вспомогательное оборудование ТЭС» в виде программного комплекса для проведения лабораторных и исследовательских работ. Реализация результатов работы подтверждена двумя актами внедрения.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке математического описания теплопередачи в многопоточной ступени теплообменной установки, получении аналитического решения для случая трехпоточной ступени; проведении численных экспериментов по разработанной математической модели; разработке алгоритмов и программных модулей по расчету процессов теплопередачи и деаэрации турбинного конденсата в конденсаторе паровой турбины; проведении численных исследований и разработке рекомендаций по повышению эффективности работы конденсационной установки, получении экспериментальных данных и обработке результатов испытаний конденсатора паровой турбины.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 11-ти конференциях, в том числе, семи международных: Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XIV, XVI Бенардосовские чтения (г. Иваново, 2007, 2011 г.); Международных конференциях «Математические методы в технике и технологиях ММТТ 22, 23, 24» (г. Псков, 2009 г.; г. Саратов, 2010 г.; г. Киев, 2011 г.); IX Международной научной конференции «Теоретические основы энерго-ресурсосберегающих процессов, оборудования и экологически безопасных производств» (г. Иваново, 2010 г.); Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2009 г.); V Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (г. Иваново, 2010 г.); IV, V, VI Региональных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Энергетика» (г. Иваново, 2009, 2010, 2011 г.).

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 23 опубликованных работах, в том числе в 7 статьях в ведущих рецензируемых журналах и изданиях (по списку ВАК), 1 свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 152 наименований.

Текст диссертации изложен на 156 стр. машинописного текста, содержит 50 рисунков, 19 таблиц и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и дана общая характеристика структуры работы.

В первой главе выполнен анализ опубликованных данных о процессах тепло- и массообмена в многофазных многопоточных средах. Анализ литературных источников показал, что вопросам моделирования и анализа многопоточных и многоступенчатых теплообменных систем в той или иной мере посвящено большое число исследований, среди которых можно выделить работы С.С. Кутателадзе, А. В. Лыкова, М.И. Щепетильникова, Ю.М. Бродова и др. При этом остались нерешенными или частично решенными вопросы описания процессов теплопередачи и массопередачи в многопоточных многофазных системах, определения для них оптимальной структуры потоков теплоносителей. С учетом результатов проведенного анализа опубликованных данных сформулированы задачи работы, решение которых необходимо для достижения поставленной цели диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах. Под многопоточными теплообменными аппаратами понимаются установки с числом теплоносителей три и более. Наиболее эффективный теплообмен между двумя теплоносителями наблюдается при противоточной схеме их движения. Для выбора оптимальной структуры многопоточных систем в работе проводится дополнительный анализ.

Предложенный подход справедлив для многопоточных пластинчатых, кожухотрубных и спиральных теплообменных аппаратов с известными поверхностями нагрева между теплоносителями. Дальнейший анализ без снижения общности описания проводится применительно к многопоточным пластинчатым теплообменным аппаратам.

Рассматривался процесс теплопередачи для трех теплоносителей в ступени пластинчатого теплообменника. Анализ показал, что для трех теплоносителей возможны четыре схемы их относительного движения, структуры которых приведены в табл.1: прямоток-прямоток ($kod = 00$), прямоток-противоток ($kod = 01$), противоток-прямоток ($kod = 10$) и противоток-противоток ($kod = 11$). Первая цифра кода соответствует направлению относительного движения первого и второго теплоносителей, а вторая цифра – второго и третьего теплоносителей, цифра «0» кода соответствует прямотоку, а цифра «1» – противотоку. В качестве определяющей координаты процесса выбирается площадь поверхности теплообмена между теплоносителями F . Уравнения теплового баланса, составленные для трех теплоносителей на отрезке $[F, F + dF]$, позволяют записать систему трех дифференциальных уравнений относительно трех искомых температур теплоносителей t . В частности, для схемы движения потоков прямоток-прямоток ($kod = 00$) система дифференциальных уравнений принимает вид:

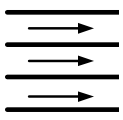
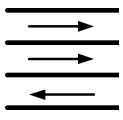
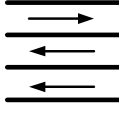
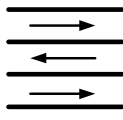
$$\begin{cases} dt_1/dF = -a_1 t_1 + a_1 t_2 \\ dt_2/dF = a_2 t_1 - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ dt_3/dF = a_4 \cdot t_2 - a_4 \cdot t_3 \end{cases} \quad (1)$$

где $a_1 = k_{12} / (c_1 G_1)$, $a_2 = k_{12} / (c_2 G_2)$, $a_3 = k_{23} / (c_2 G_2)$, $a_4 = k_{23} / (c_3 G_3)$, c – удельная теплоемкость; k – коэффициент теплопередачи; G – расход теплоносителя; одинарный индекс показывает номер теплоносителя, двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует номерам теплоносителей, между которыми происходит теплообмен.

Система (1) записана для случая совпадения направления движения каждого теплоносителя с направлением оси F . Для описания теплопередачи для других схем движения теплоносителей система уравнений (1) может быть переписана следующим образом. Если теплоноситель с номером i движется в противоположном направлении по отношению направления оси F , то правая часть i -го уравнения системы (1) умножается на минус единицу.

Для системы линейных однородных дифференциальных уравнений (1) найдены аналитические решения. Для четырех рассмотренных ранее схем движения теплоносителей в табл. 1 приводятся аналитические решения для случая $a_1 = a_2 = a_3 = a_4$. При этом постоянные интегрирования c_1, c_2, c_3 определяются из начальных условий.

Таблица 1. Схемы движения потоков трех теплоносителей, коды схем и аналитические решения для них системы дифференциальных уравнений (1)

Вариант движения теплоносителей	Схема движения теплоносителей	Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений
прямоток-прямоток (kod = 00)		$\begin{cases} t_1 = c_1 \cdot e^{-F} + c_2 + c_3 \cdot e^{-3F} \\ t_2 = c_2 \cdot 1 - 2 \cdot c_3 \cdot e^{-3F} \\ t_3 = -c_1 \cdot e^{-F} + c_2 + c_3 \cdot e^{-3F} \end{cases}$
прямоток-противоток (kod = 01)		$\begin{cases} t_1 = c_1 + c_2 \cdot e^{(-1+\sqrt{2})F} + c_3 \cdot e^{(-1-\sqrt{2})F} \\ t_2 = c_1 + c_2 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{(-1+\sqrt{2})F} - c_3 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{(-1-\sqrt{2})F} \\ t_3 = c_1 + c_2 \cdot (\sqrt{2} + 1) \cdot e^{(-1+\sqrt{2})F} + c_3 \cdot (-\sqrt{2} + 1) \cdot e^{(-1-\sqrt{2})F} \end{cases}$
противоток-прямоток (kod = 10)		$\begin{cases} t_1 = c_1 + c_2 \cdot (-1) \cdot e^{(1+\sqrt{2})F} + c_3 \cdot (1 + \sqrt{2}) \cdot e^{(1-\sqrt{2})F} \\ t_2 = c_1 + c_2 \cdot (-\sqrt{2} - 2) \cdot e^{(1+\sqrt{2})F} + c_3 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{(1-\sqrt{2})F} \\ t_3 = c_1 + c_2 \cdot (1 + \sqrt{2}) \cdot e^{(1+\sqrt{2})F} + c_3 \cdot e^{(1-\sqrt{2})F} \end{cases}$
противоток-противоток (kod = 11)		$\begin{cases} t_1 = c_1 \cdot e^{-F} + c_2 + c_3 \cdot e^F \\ t_2 = c_2 + 2 \cdot c_3 \cdot e^F \\ t_3 = -c_1 \cdot e^{-F} + c_2 + c_3 \cdot e^F \end{cases}$

Вид аналитических зависимостей температуры теплоносителя от определяющей координаты для заданных начальных условий: $t_{10} = 100$ °С, $t_{20} = 0$ °С, $t_{30} = 0$ °С; проиллюстрирован на рис. 1.

Наиболее эффективная схема движения потоков, обеспечивающая минимальную температуру горячего теплоносителя на выходе ступени, соответствует коду 10 из табл. 1, то есть варианту, при котором первый и второй теплоносители движутся в противоположных направлениях (противоток), а второй и третий в одном направлении (прямоток).

Математическая модель (1) описывает эволюцию температур для трех теплоносителей. Обобщенное матричное описание процесса теплопередачи получено для установок с произвольным (n) числом теплоносителей. В этом случае изменение темпера-

туры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена F описывается системой из n однородных дифференциальных уравнений первого порядка, которые в матричном виде записываются следующим образом:

$$\frac{d}{dF} \mathbf{T} = \mathbf{A} \mathbf{T}, \quad (2)$$

где $\mathbf{T}=[t_1 \ t_2 \ \dots \ t_n]^T$ – вектор искомых температур теплоносителей; \mathbf{A} – трехдиагональная квадратная матрица известных коэффициентов.

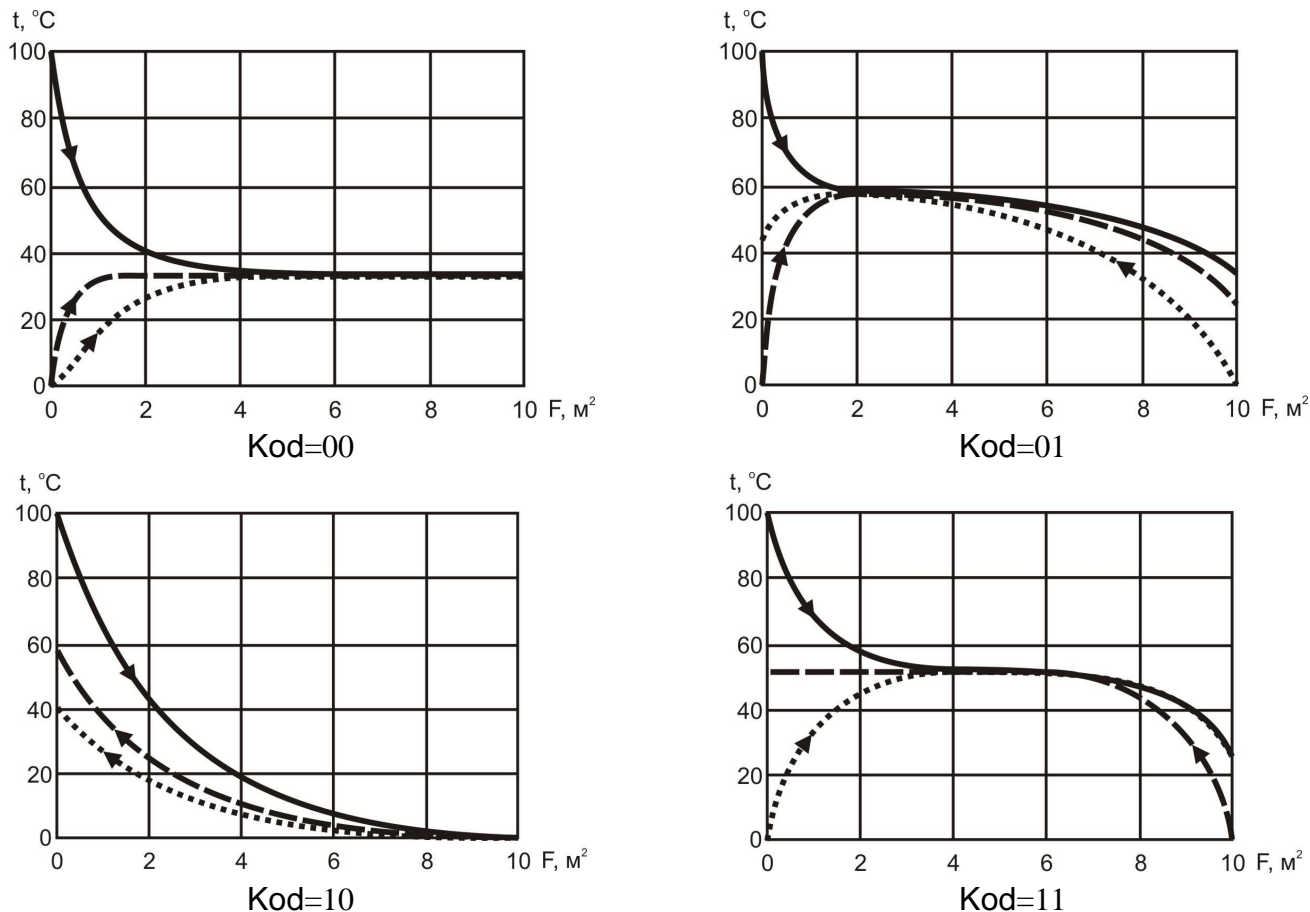


Рис. 1. Зависимости температуры теплоносителей от площади поверхности теплообмена (F) для различных схем движения потоков, приведенных в табл.1. Сплошная, штриховая и пунктирная линии показывают изменение температуры соответственно горячего, промежуточного и холодного теплоносителей

Для n теплоносителей трехдиагональная матрица \mathbf{A} записывается в виде:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{k_{12}}{c_1 G_1} & \frac{k_{12}}{c_1 G_1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{k_{12}}{c_2 G_2} & -\frac{k_{12}}{c_2 G_2} - \frac{k_{23}}{c_2 G_2} & \frac{k_{23}}{c_2 G_2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{k_{23}}{c_3 G_3} & -\frac{k_{23}}{c_3 G_3} - \frac{k_{34}}{c_3 G_3} & \frac{k_{34}}{c_3 G_3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\frac{k_{n-1n}}{c_n G_n} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Аналитическое решение наряду с очевидными преимуществами обладает рядом ограничений: получение аналитического решения для ряда схем движения теплоносителей в многоступенчатых и многопоточных аппаратах не всегда возможно, а полученное решение часто имеет весьма громоздкий и неудобный для вычислений вид. С учетом сделанных замечаний для расчета сложных многопоточных систем целесообразно обратиться к методу матричной формализации для численного расчета сложных теплообменных аппаратов с произвольной конфигурацией потоков. Метод матричной формализации предполагает представление каждой ступени или аппарата четырехполюсником с двумя входными и двумя выходными потоками для холодного и горячего теплоносителей соответственно.

В рассматриваемом пластинчатом теплообменнике, представленном на рис. 2, крайние потоки участвуют в теплообмене только через одну стенку, а средние потоки – через две (рис. 2,а), поэтому известный метод матричной формализации для пластинчатых аппаратов нуждается в корректировке. Для адаптации метода принимается следующее допущение: каждая ступень вдоль направления движения теплоносителя условно разбивается на два теплоизолированные между собой канала, в каждом из которых теплоноситель контактирует только с одним из соседних теплоносителей. Данный расчетный прием позволяет представить ступень в виде двух четырехполюсников. Для оценки погрешности, которую вносит сделанное допущение, при численном решении выполнено специальное расчетное исследование. Для схемы движения теплоносителей прямоток-прямоток ($kod = 00$ в табл. 1) ступень при численном решении задачи теплопередачи представляется одним (рис. 2,б), двумя (рис. 2,в) или, в общем случае, k элементами. Точность численного решения оценивалась по величине S средней относительной погрешности значений температур теплоносителей на выходе из установки. Зависимость погрешности S от числа шагов разбиения поверхности теплообмена представлена на рис. 3. Приведенные результаты показывают, что численное решение уже при четырех шагах разбиения поверхности нагрева дает погрешность порядка одного процента. Анализ зависимости позволяет выбрать число шагов разбиений для получения необходимой точности расчета.

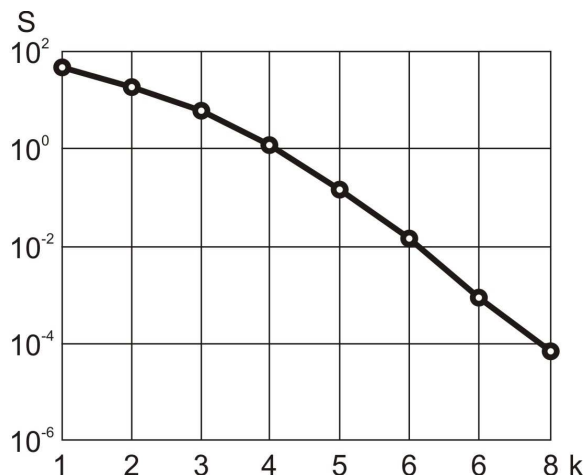
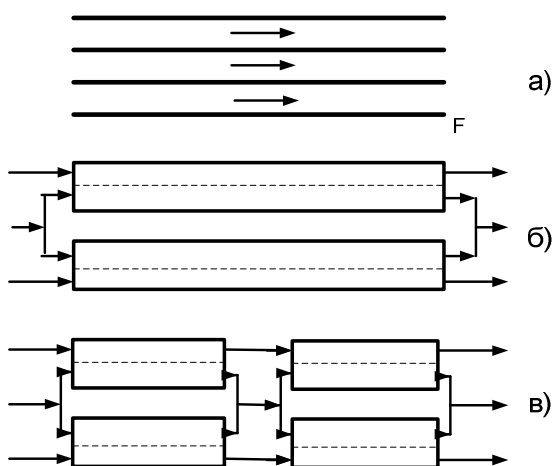


Рис. 2. Схема движения потоков в ступени пластинчатого теплообменника (а) и расчетные схемы при разбиении ступени на один (б) и два (в) элемента

Рис. 3. Зависимости средней погрешности численного решения (в процентах) от числа шагов разбиения поверхности теплообмена

В третьей главе предложена система кодификации многопоточных теплообменных аппаратов, разработан метод расчета системы по коду и генетический алгоритм оптимизации структуры потоков теплоносителей в теплообменнике.

Для решения оптимизационной задачи в работе используется метод генетических алгоритмов, в котором эффективно сочетаются преимущества методов случайного и направленного поисков.

Для применения генетических алгоритмов при оптимизации теплообменных систем решаются следующие задачи:

1. разработать код системы, который однозначно определяет структуру системы, а известная структура однозначно соответствует коду;
2. разработать метод расчета, позволяющий по известному коду составлять модель системы и определять значения искомым параметров;
3. разработать вычислительный алгоритм и программный модуль для поиска оптимальной структуры потоков теплоносителей, обеспечивающей экстремальное значение критерия оптимизации.

Не снижая общности подхода, дальнейший анализ проводится применительно к многопоточным пластинчатым теплообменным аппаратам, которые наряду с высокой эффективностью и компактностью позволяют относительно просто реализовывать на практике найденные оптимальные решения.

При разработке кода структуры системы каждой ступени присваивается номер $i=1, 2, \dots, n$, где n – число ступеней. Через N обозначается число внешних потоков теплоносителей, каждый из которых подается в разные точки системы. В работе проанализировано несколько возможных вариантов кода. В качестве первого варианта предлагается использовать матрицу, число строк которой соответствует числу теплоносителей (N), а число столбцов – максимальному числу ступеней, через которые проходит теплоноситель. Каждый элемент матрицы кода K_{ij} показывает номер ступени, которую проходит i -й теплоноситель на j -м шаге. На рис. 4,а представлен пример схемы потоков трех теплоносителей в десятиступенчатом пластинчатом теплообменнике ($n=10$, $N=3$), а на рис. 4,б – соответствующий ей матричный код.

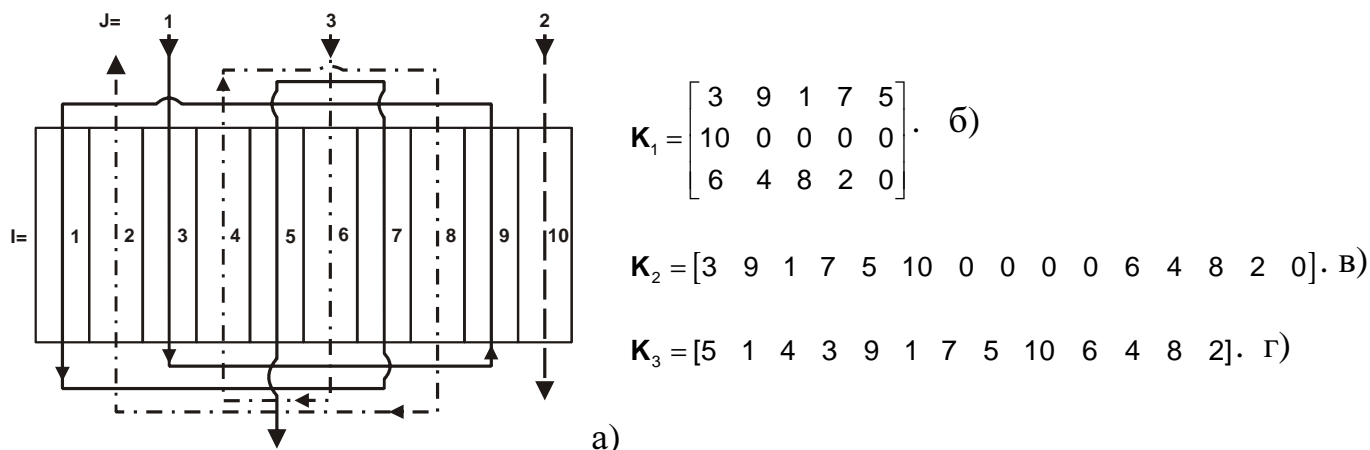


Рис. 4. Пример схемы потоков трех теплоносителей в пластинчатом теплообменнике (а) и варианты ее кода (б-г)

Матричный код может быть преобразован в более удобный линейный или векторный код поочередным переписыванием в одну строку всех строк матрицы кода. Пример такого векторного кода для пластинчатого теплообменника (рис. 4,а) проиллюстрирован на рис. 4,в.

Для создания более экономичного варианта кода предлагается исключить нулевые элементы из кода и ввести в код позиции, указывающие число ненулевых элементов каждого потока. Для n ступенчатого теплообменника при подаче в него N теплоносителей такой код составляется из $N+n$ элементов (рис. 4,г). Первые N элементов

кода содержат указатели числа ненулевых элементов для каждого теплоносителя. Соответственно первое число показывает число ступеней для первого теплоносителя, второе – для второго и так далее. Затем, начиная с $N+1$ позиции, размещаются поочередно ненулевые элементы строк матрицы кода рис. 4,б. Третий вариант кода как наиболее экономичный и удобный для расчета будет далее использоваться при разработке и реализации генетического алгоритма.

Третий вариант кода позволяет также достаточно просто определить число возможных вариантов структурных схем теплообменных установок. В работе получено выражение для определения общего числа вариантов соединения n ступеней для N теплоносителей: $n! / (n-1)! / (n-N-1)!$. Для приведенного на рис. 4 примера пластинчатого теплообменника из 10 ступеней, в который подаются три теплоносителя ($n=10, N=3$), число вариантов кода или число вариантов схем равно $10! * 9! / 6! = 1,83 * 10^9$. Анализ такого большого числа вариантов для выбора наилучшего выполняется далее с использованием генетического алгоритма.

Второй задачей при разработке генетического алгоритма является создание метода автоматизированного расчета системы по заданному коду. Известный матричный метод расчета теплообменных аппаратов со сложной конфигурацией потоков предполагает представление каждой ступени или аппарата четырехполюсником с двумя входными и двумя выходными потоками для холодного и горячего теплоносителей соответственно. Адаптация матричного метода для расчета пластинчатого теплообменного аппарата подробно рассмотрена во второй главе. Для пластинчатого теплообменника из n ступеней расчетная схема включает $(n-1)$ четырехполюсник. Для каждого расчетного четырехполюсника потоки теплоносителя будем называть каналами, общее число которых составляет $2*(n-1)$. Расчетная схема составляется именно для каналов, число и нумерация которых отличается от числа и нумерации ступеней пластинчатого теплообменника. Следует отметить, что каждая внутренняя (B) ступень представляется в расчетной схеме двумя каналами, а первая (H) и последняя (K) ступени – одним каналом (см. рис. 2).

Математическая модель для системы из $(n-1)$ -го четырехполюсника представляется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} -I & K_{12}B_2 & \dots & K_{1n}B_n \\ K_{21}B_1 & -I & \dots & K_{2n}B_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n-11}B_1 & K_{n-12}B_2 & \dots & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -X_{01} \\ -X_{02} \\ \dots \\ -X_{0n-1} \end{pmatrix} \text{ или } \mathbf{TX} = \mathbf{X}_0, \quad (4)$$

где \mathbf{T} – матрица процесса в аппарате, \mathbf{B} – матрица процесса в ступени, \mathbf{K}_{ij} – матрица коммутации, элементы которой показывают доли потока из j ступени в i -ю, \mathbf{X} – вектор аддитивных параметров теплоносителей на входе в ступень, \mathbf{I} – единичная матрица, индекс $i=1, \dots, n-1$ указывает на номер ступени, индекс 0 соответствует внешнему потоку, подаваемому в систему.

Основное внимание при разработке генетического алгоритма уделяется вопросам автоматизации расчета системы по известному коду. В частности, для автоматизации расчета предложен алгоритм составления матрицы коммутации \mathbf{K} по известному коду. Для этого сначала все элементы матрицы коммутации обнуляются. Затем в соответствии с кодом заполняются ненулевые элементы матрицы \mathbf{K} . Начиная с $N+1$ позиции кода, для каждой пары элементов кода левый элемент показывает из какой ступени, а

правый – в какую ступень направляется поток. Каждой внутренней ступени (В) соответствуют два расчетных канала, а первой (Н) и последней (К) ступеням – по одному каналу (рис. 4). Для элемента матрицы **K** номер строки соответствует каналу, в который подается поток, а номер столбца – каналу, из которого поступает этот поток. Из каждого расчетного канала поток может направляться в два другие канала, а, соответственно, в каждый канал могут поступать потоки из двух других каналов. Анализ показал, что в пластинчатом теплообменнике возможны семь вариантов взаимного расположения двух соседних ступеней в коде: В-В, Н-В, В-Н, В-К, К-В, К-Н, Н-К, для каждого из которых разработан свой вариант элемента матрицы коммутации, вид которых представлен в табл.2. Здесь использованы следующие обозначения: j_1 – номер первого канала, откуда поступает теплоноситель в рассматриваемый канал; j_2 – номер второго канала, откуда поступает теплоноситель в рассматриваемый канал; i_1 – номер первого канала, куда поступает теплоноситель; i_2 – номер второй канала, куда поступает теплоноситель; $\mathbf{K}(i_1:i_2, j_1:j_2)$ – блок матрицы с номерами строк от i_1 до i_2 и номерами столбцов от j_1 до j_2 . Предложенный алгоритм построения матрицы коммутации по известному коду позволяет согласно правилам матричной формализации рассчитать искомые параметры системы и приступить собственно к разработке генетического алгоритма.

Основным оператором генетического алгоритма является скрещивание или кроссинговер. При выполнении этого оператора выбираются два кода родителей, между которыми организуется обмен фрагментами кода. Полученные после этого коды (схемы) будем называть потомками. Место деления кода на фрагменты при скрещивании выбирается между элементами кода с номерами **N** и **N+1**. В этом случае от одного родителя наследуется число ступеней для каждого теплоносителя, а от второго – порядок соединения ступеней. Такая организация кроссинговера позволяет получать коды потомков, не содержащие грубых ошибок.

Таблица 2. Варианты связей между ступенями и соответствующие им фрагменты коммутационной матрицы

N	Вариант связей ступеней	Элементы коммутационной матрицы
1	Н-В	$\mathbf{K}(i_1:i_2, j_1)=0.5$;
2	Н-К	$\mathbf{K}(i_1, j_1)=1$
3	В-Н	$\mathbf{K}(i_1, j_1:j_2)=1$;
4	В-В	$\mathbf{K}(i_1:i_2, j_1:j_2)=0.5$;
5	В-К,	$\mathbf{K}(i_1, j_1:j_2)=1$;
6	К-Н,	$\mathbf{K}(i_1, j_1)=1$;
7	К-В	$\mathbf{K}(i_1:i_2, j_1)=0.5$

Предлагаемый генетический алгоритм состоит из следующих блоков:

- 1) задаются исходные для расчета данные: число ступеней (n), число теплоносителей (N), размер популяции ($NPOP$), число поколений ($NPOK$);
- 2) случайным образом формируется начальная популяция размером $NPOP$. Для этого выполняется формирование кода и расчет по этому коду критерия оптимизации;
- 3) выполняется ранжирование кодов в популяции по критерию оптимизации;
- 4) выполняется $NPOP$ скрещиваний: один из родителей случайно выбирается из лучшей половины популяции, а второй - из всех элементов популяции.
- 5) пункты 3, 4 повторяются до достижения заданного числа поколений ($NPOK$) или заданного значения критерия оптимизации.

Пример решения оптимизационной задачи приводится для системы из 10 ступеней при подаче в нее 3 теплоносителей. Размер популяции и число поколений выбра-

ны соответственно 500 и 20. Считается, что горячий теплоноситель на выходе из установки сбрасывается в окружающую среду, поэтому при оптимизации минимизируется его температура. Таким образом, в качестве целевой функции оптимизации выбирается минимальная температура горячего теплоносителя на выходе системы.

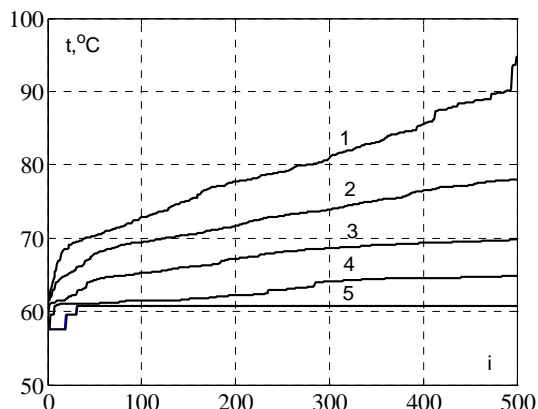


Рис. 5. Зависимость значений целевой функции от номера элементов в популяции после их ранжирования для разных поколений: 1 – первое, 2 – третье; 3 – пятое; 4 – седьмое; 5 – пятнадцатое поколение

На рис. 5 приведены результаты численного решения оптимизационной задачи для следующих исходных данных: расходы теплоносителей на входе составляют $G_{10}=10$ кг/с, $G_{20}=20$ кг/с, $G_{30}=30$ кг/с; их температуры – $t_{10}=100$ °С, $t_{20}=20$ °С, $t_{30}=2$ °С; теплоемкость всех теплоносителей выбрана одинаковой – $c_1=4200$ Дж/(кг К); коэффициент теплопередачи для всех ступеней – 3000 Вт/(м²·К).

Графики, приведенные на рис. 5, показывают зависимость целевой функции от номера ранжированных элементов популяции для разных поколений. С увеличением номера поколения значение целевой функции соответственно уменьшается. Найденная в ходе решения задачи оптимальная структура и ее код приведены на рис. 4, минимальное значение целевой функции составило $56,96$ °С.

В четвертой главе рассматриваются вопросы практического использования результатов работы.

В качестве направления практической реализации выбрана задача повышения эффективности работы конденсационной установки теплофикационной паровой турбины ПТ-12-35/10М КТЗ ОАО «Северсталь» с построением реальных энергетических характеристик конденсатора с проведением промышленных испытаний*.

Для решения поставленной задачи выполнены следующие работы:

1. разработана техническая программа и метрологическое обеспечение тепловых балансовых испытаний турбоагрегата при его работе в конденсационном режиме и режимах с регулируемым отбором пара при изменении тепловой и электрической нагрузок в регулировочном диапазоне нагрузок;

2. проведены испытания, выполнена первичная обработка результатов измерения контролируемых параметров, включая проверку сходимости материальных балансов по установке в целом и отдельным технологическим подсистемам в условиях каждого опыта.

Для построения энергетических характеристик конденсатора использован специально разработанный программный комплекс по расчету поверхностных водоохлаждаемых конденсаторов паровых турбин с верификацией математической модели по экспериментальным данным статистическими методами. Алгоритм программного комплекса обеспечивает возможность выбора одной из следующих исходных математических моделей – методик поверочного теплового расчета конденсаторов: Всероссийского теплотехнического института (ВТИ), Уральского политехнического института (УГТУ-УПИ), Уральского турбомоторного завода (ТМЗ), Калужского турбинного завода (КТЗ), Института теплообмена США (ИТО США).

*- техническое и метрологическое обеспечение экспериментальных исследований и разработка вычислительного комплекса для их обработки выполнялось при консультативной помощи и участии к.т.н., доцента каф. ТЭС ИГЭУ Ледуховского Г.В.

В процессе обработки результатов испытаний в ряде режимов выявлено наличие существенного (до 6 °С) переохлаждения турбинного конденсата относительно температуры насыщения при давлении в паровом пространстве конденсатора, а также неудовлетворительная деаэрация конденсата по диоксиду углерода при обеспечении нормативного содержания в конденсате растворенного кислорода во всем диапазоне нагрузок. Методики расчета, использованные в программном комплексе по расчету и построению энергетических характеристик конденсаторов паровых турбин, не позволяют выявить причины указанных эффектов. Устранение выявленных проблем необходимо для повышения эффективности работы конденсационной установки: наличие диоксида углерода в турбинном конденсате способствует коррозионным разрушениям металла элементов тракта основного конденсата турбоагрегата, а переохлаждение конденсата в конденсаторе обуславливает появление соответствующей недовыработки электрической мощности. Последнее актуально для рассматриваемого турбоагрегата ПТ-12-35/10М КТЗ ОАО “Северсталь”, поскольку он эксплуатируется преимущественно в режиме “П” (при наличии производственного и отсутствии теплофикационного отбора пара), т.е. при относительно больших расходах теплоносителя через проточную часть низкого давления турбины и, соответственно, через систему регенерации низкого давления. Это характерно и для других теплофикационных турбоагрегатов, работающих по электрическому графику нагрузок.

Для учета наряду с процессами теплообмена процессов массообмена, в том числе газообмена, возникла необходимость разработки программного комплекса для анализа совмещенных процессов тепломассопереноса в многофазных средах.

В программном комплексе реализован метод расчета процессов тепломассообмена, базирующийся на ячеечной методологии. В качестве искомой функции выбрано распределение массы по ячейкам в многомерном фазовом пространстве. При выполнении расчета сначала рабочий объем аппарата разбивается на ячейки в выбранном фазовом пространстве. Полученный многомерный массив ячеек фазового пространства сворачивается в одномерную матрицу (вектор-строку) из этих же ячеек. Распределение массы по ячейкам представляется вектором $\mathbf{S} = \{S_i\}$, где индекс «i» соответствует номеру ячейки. Алгоритм расчета искомого распределения \mathbf{S} в произвольные моменты времени включает следующие этапы. Сначала для каждой ячейки фазового пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения балансов для определения потоков энергии или массы между этими ячейками. Известные потоки энергии и массы позволяют определить потоки вероятностей соответствующих переходов. Для описания эволюции плотности распределения выполняется суммирование потоков вероятностей из всех ячеек в i-ю ячейку системы:

$$\mathbf{s}_i^{k+1} = \sum_{j=1,n} \mathbf{s}_j^k p_{ij}, \quad (5)$$

где p_{ij} – вероятность перехода из j-й в i-ю ячейку; индекс «k» соответствует номеру шага по времени.

Предложенный метод решения рассматриваемой задачи (5) по сравнению с традиционными матричными методами позволяет существенно экономить машинные ресурсы за счет исключения операций с нулевыми элементами.

На программный комплекс, реализующий предложенный алгоритм, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

С использованием этого программного комплекса проведены дополнительные

численные исследования работы рассматриваемого конденсатора турбоагрегата ПТ-12-35/10М КТЗ. Моделировались процессы в многофазной многопоточной среде конденсатора, которая определялась совокупностью потоков циркуляционной воды; пара; конденсата пара; газов в паровой фазе и газов в жидкой фазе.

Эскиз конденсатора с указанием основных потоков приведен на рис. 6, а. Циркуляционная вода 1 подается в водяную камеру снизу, проходит по трубам первого хода, в поворотной водяной камере разворачивается на 180 градусов и после прохождения трубной системы второго хода покидает аппарат. Отработавший в турбине пар 3 поступает в межтрубное пространство конденсатора сверху. Образовавшийся конденсат пара 2 собирается в конденсатосборник и отводится из конденсатора. Воздухоохладитель отделен от зоны массовой конденсации парового пространства кожухом, показанным на рисунке жирной линией. Неконденсируемые газы удаляются из зоны воздухоохладителя через патрубок отсоса паровоздушной смеси 4 основным эжектором. Расчетное фазовое пространство показано на рис. 6, б; схемы движения фазовых потоков и использованная нумерация ячеек одномерной матрицы S – на рис. 6, в–ж.

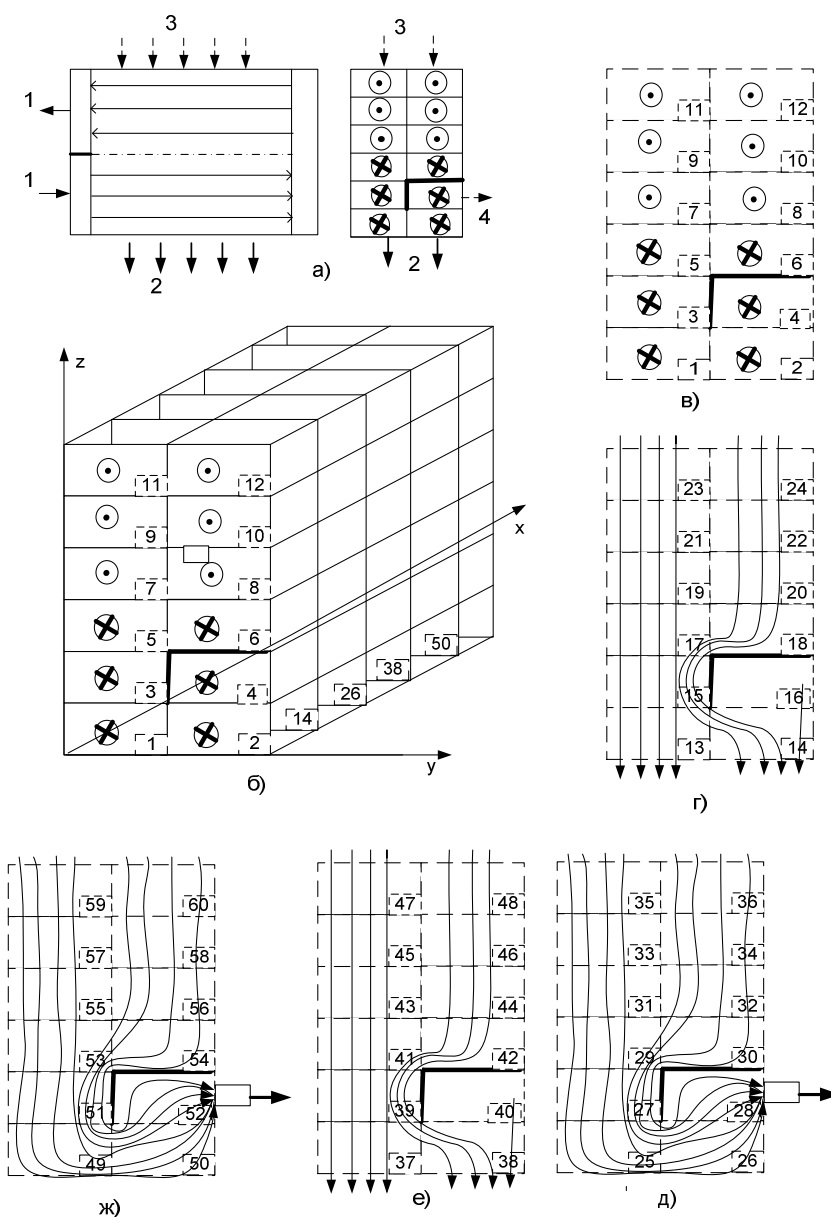


Рис. 6. Эскиз конденсатора (а), расчетное фазовое пространство (б) и схемы движения фазовых потоков: циркуляционной воды (в), конденсата (г), пара (д), газа в конденсате (е) и газа в паре (ж); цифрами показаны потоки: 1 – циркуляционной воды; 2 – конденсата; 3 – пара; 4 – паровоздушной смеси; цифры в прямоугольных рамках соответствуют номерам ячеек

На рис. 7 приведены результаты идентификации модели (5) на примере одного из опытов. В качестве параметра идентификации выбран коэффициент теплоотдачи с паровой стороны при конденсации чистого пара α_p , который принимался условно равным для всех ячеек фазового пространства. Учет влияния наличия в паре неконденсируемых газов на коэффициент теплоотдачи с паровой стороны осуществлялся с использованием зависимости, предложенной С.С. Кутателадзе и адаптированной под выбранный метод расчета:

$$\frac{\alpha_{см}}{\alpha_p} = 1 - 4,716 \cdot \left(\frac{S_r}{S_p} \right)^{0,477}, \quad (6)$$

где $\alpha_{см}$, α_p – коэффициент теплоотдачи соответственно для паровоздушной смеси и чистого пара при его конденсации, содержащего газы примеси; S_r и S_p – элементы матрицы состояния фазового пространства, соответствующие потокам газа и пара соответственно.

Для примера на рис. 7 показаны три пары расчетных распределений массы пара и конденсата в ячейках по высоте их расположения для различных значений параметра идентификации модели. Зависимость для пара, приведенная под номером 1, показывает, что при данном значении параметра идентификации конденсатор не обеспечивает полной конденсации поступающего в него пара, что не соответствует действительности. Кривые 2 соответствуют полной конденсации пара, однако расчетная температура насыщения в паровом пространстве при этом отличается от опытных данных. Наиболее адекватны опытным данным кривые 3 – расчетная температура насыщения в паровом пространстве (61°C) близка в опытному значению (63°C). При этом подтверждается и наличие переохлаждения конденсата (расчетная температура $53,1^\circ\text{C}$) до опытной температуры на выходе из конденсатора $56,3^\circ\text{C}$: из рис. 7 видно, что при значении координаты $z \approx 1,5$ пар конденсируется полностью, а дальнейший теплообмен между стекающим конденсатом и охлаждающей водой приводит к переохлаждению конденсата.

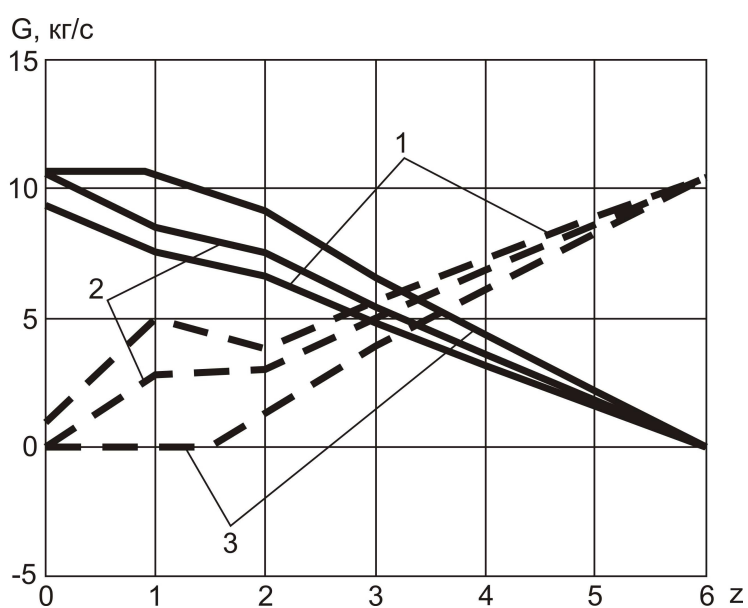


Рис.7. Зависимость содержания пара (штриховая линия) и конденсата (сплошная линия) от номера ячейки по высоте фазового пространства

Проведенные исследования позволили выявить наличие и причины возникновения переохлаждения конденсата пара относительно температуры насыщения, предложить ряд эксплуатационных мероприятий по уменьшению этого переохлаждения, а также сформулировать рекомендации по совершенствованию режимов охлаждения конденсатора за счет управления распределением потоков циркуляционной воды с точки зрения обеспечения работы установки с экономическим вакуумом. Сформулированные и переданные ОАО «Северсталь» рекомендации по ведению эксплуатационных режимов в конденсаторе обеспечивают повышение эффективности выработки те-

пловой и электрической энергии. Реализация предложенных в отношении конденсационной установки мероприятий обеспечивает получение расчетной дополнительной годовой выработки электроэнергии турбоагрегатом ПТ-12-35/10М КТЗ в размере 337,4 тыс. кВт.ч при сохранении затрат тепловой энергии на турбоагрегат и нагрузок регулируемых отборов пара.

Результаты работы внедрены также в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработаны научные основы математического описания процесса теплопередачи в многопоточной ступени теплообменных установок ТЭС в виде системы линейных дифференциальных уравнений в матричной форме. Для трехпоточной ступени получены аналитические решения системы при четырех возможных вариантах относительного движения теплоносителей и проведен анализ влияния характера относительного движения теплоносителей на процесс теплопередачи. Наиболее эффективная схема относительного движения теплоносителей, обеспечивающая минимальную температуру горячего теплоносителя на выходе ступени, соответствует варианту, при котором первый и второй теплоносители двигаются в противоположных направлениях (противоток), а второй и третий в одном направлении (прямоток).

2. Разработан обобщенный численный метод решения задачи теплопередачи в многопоточной многоступенчатой теплообменной системе. Анализ показал, что численное решение уже при четырех шагах разбиения поверхности нагрева дает погрешность порядка одного процента. Приведенная зависимость позволяет выбрать число шагов разбиений (ячеек), которое обеспечивает необходимую точность расчета.

3. Предложена система кодификации структуры потоков многопоточных многоступенчатых теплообменных систем и алгоритм построения расчетной модели по коду, на основе которых разработан генетический алгоритм оптимизации структуры потоков.

4. Предложен основанный на ячейной методологии численный метод и вычислительный алгоритм решения задачи тепломассообмена в выбранном фазовом пространстве многофазной среды в конденсаторе паровой турбины, обеспечивающий расчет параметров потоков теплоносителей, включая концентрации растворенных в конденсате газов (кислорода и диоксида углерода), и учет этих концентраций при расчете процесса теплообмена.

5. Разработаны программные комплексы по расчету тепломассообмена в выбранном фазовом пространстве многофазной среды многопоточных многоступенчатых аппаратов, а также по расчету и построению энергетических характеристик поверхностных водоохлаждаемых конденсаторов паровых турбин.

6. Сформулированы и переданы ОАО «Северсталь» рекомендации по ведению эксплуатационных режимов в конденсаторе, обеспечивающие повышение эффективности выработки тепловой и электрической энергии. Реализация предложенных в отношении конденсационной установки мероприятий обеспечивает получение расчетной дополнительной годовой выработки электроэнергии турбоагрегатом ПТ-12-35/10М КТЗ в размере 337,4 тыс. кВт.ч при сохранении затрат тепловой энергии на турбоагрегат и нагрузок регулируемых отборов пара. Результаты работы внедрены в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Барочкин, А.Е.** Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах [Текст] / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков // Изв. вузов. Химия и химическая технология. –2011.- Т. 54.- Вып.11.- С.116-119.
2. **Барочкин, А.Е.** Структурная оптимизация многопоточных пластинчатых теплообменных аппаратов на основе генетического алгоритма [Текст] / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков, А.К. Лапшин // Изв. вузов. Химия и химическая технология. -2011.- Т. 54.- Вып.6.- С.101-105.
3. **Барочкин, А.Е.** Оптимизация позиционирования подачи и структуры потоков теплоносителей в многоступенчатых теплообменниках. [Текст] / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков, А.К. Лапшин // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2010. – Вып. 3. – С. 68-70.
4. Мошкарин, А.В. Экспериментальные исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды [Текст] / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, А.А. Коротков, **А.Е. Барочкин** // Теплоэнергетика, 2010. – Вып. 8. – С.21-25.
5. Виноградов, В.Н. Деаэрационные испытания конденсатора паровой турбины при повышенном содержании свободной углекислоты в остром паре. [Текст] / В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский, **А.Е. Барочкин** и [др.] // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2009. – Вып. 2. – С. 37-39.
6. Барочкин, Е.В. Система кодификации и структурная оптимизация многоступенчатых теплообменных установок. [Текст] / Е.В. Барочкин, В.П.Жуков, В.А. Трубчани, **А. Е. Барочкин** // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2008. – Вып. 2. – С. 35-38.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Расчет многомерных совмещенных процессов измельчения, классификации в сыпучих средах №2010610878 от 19 апреля 2010 года" Авторы: Беляков А.Н., Жуков В.П., Власюк А.А., **Барочкин А.Е.**

Публикации в других изданиях

8. **Барочкин, А.Е.** Задачи энергосбережения при структурировании потоков в многоступенчатых теплообменниках. [Текст] / А.Е.Барочкин, В.П.Жуков, А.К.Лапшин // Материалы IX Международной научной конференции «Теоретические основы энергоресурсосберегающих процессов, оборудования и экологически безопасных производств», Иваново, 2010, с.265-257.
9. **Барочкин, А.Е.** Использование генетических алгоритмов при оптимизации многопоточных теплообменных аппаратов. [Текст] / А.Е.Барочкин, В.П. Жуков, А.К.Лапшин //Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» Иваново, 2010, с.41-44.
10. **Барочкин, А.Е.** Оптимальная структура потоков теплоносителей в системе пластинчатых теплообменников. [Текст] / А.Е.Барочкин, В. П. Жуков, А.К.Лапшин // Труды XXIII Международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях ММТТ-23", Саратов, 2010, Т. 9, с. 57-58.
11. **Барочкин, А.Е.** Аналитическое решение задачи теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах [Текст]/ А.Е.Барочкин, В.П.Жуков, А.Н.Росляков //Материалы XV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения “Состояние и перспективы развития электротехнологии”. – Иваново. – 2011. – Т.2. – С. 311-314.
12. **Барочкин, А.Е.**, Применение метода неопределенных множителей Лагранжа при оптимизации режимов работы турбоагрегатов ТЭС / А.Е.Барочкин, А.А.Борисов, В.П. Жуков //Материалы XIV Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения “Состояние и перспективы развития электротехнологии”. – Иваново. – 2007. – Т.2. – С. 184.

13. Ледуховский, Г.В. Деаэрационные характеристики конденсаторов паровых турбин при повышенном содержании диоксида углерода в остром паре [Текст] / Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, **А.Е. Барочкин** [и др.] // Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с., С. 116-121.
14. Коротков, А.А. Моделирование технологических процессов струйной деаэрации воды при атмосферном давлении / А.А. Коротков, **А.Е. Барочкин**, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов // Сб. трудов XXII МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-22». – Псков. – 2009. – Т.9. – С. 82 – 83.
15. **Барочкин, А.Е.** Тепловые испытания турбины ПТ-12-35/10М КТЗ [Текст] / А.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский // Материалы Пятнадцатой Междунар. науч. – техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М.: МЭИ, 2009. Т.3. С. 180-182.
16. **Барочкин, А.Е.** Математическое описание процесса теплопередачи в многопоточных аппаратах [Текст] / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков // Сб. трудов XXIV МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ24». – Киев– 2011. – Т.9. – С.82 – 83. ММТТ 24, ШМУ-16-2.
17. **Барочкин, А.Е.** Численное и аналитическое решение задачи теплопередачи в многопоточном кожухотрубном теплообменном аппарате [Текст]/ А.Е.Барочкин, В.В.Незговорова, В.П. Жуков // Материалы региональной науч. техн. конф. –«Энергия 2011», – Иваново. - 2011. – Т.2. - С. 144 – 145.
18. **Барочкин, А.Е.** Оптимальная структура потоков теплоносителей в пластинчатом теплообменном аппарате [Текст]. / А.Е. Барочкин ,В.П. Жуков // Труды пятой регионально научно-технической конф. "Энергия 2010", – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, –2010, Т.2, С.102-103.
19. **Барочкин, А.Е.**, Тепловые испытания паровой турбины с целью разработки энергетических характеристик [Текст] / А.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский // Материалы региональной науч.–техн. конф. студ. и асп. «Энергия – 2009». – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, – 2009, Т.1. – С. 12 – 14.
20. **Барочкин, А.Е.** Структурно-режимная оптимизация теплообменных установок [Текст] / А.Е.Барочкин, В. П. Жуков, // Материалы региональной науч. техн. конф. - «Энергия – 2009». – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, – 2009, Т.2. - С. 70 – 71.
21. Прохорова, Е.А. Деаэрирующая способность конденсаторов турбин при повышенном содержании свободной углекислоты в остром паре [Текст] / Е.А. Прохорова, **А.Е. Барочкин**, Г.В. Ледуховский // Материалы региональной науч.–техн. конф. студ. и асп. «Энергия – 2009». – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, – 2009, Т.1. – С. 18 – 19.
22. **Барочкин, А.Е.** Структурная оптимизация многоступенчатых теплообменных установок [Текст] / А.Е.Барочкин, В. П. Жуков //Материалы региональной науч. техн. конф. – «Энергия 2008». – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, – 2008, – Т.2. - С. 75 – 76.
23. **Барочкин, А.Е.** Результаты тепловых испытаний турбины ПТ-12-35/10М КТЗ с целью разработки энергетических характеристик [Текст] / А.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский // Материалы региональной науч.–техн. конф. студ. и асп. «Энергия – 2008». – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, – 2008, Т.1. – С. 17 – 18.