



БАРОЧКИН Алексей Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МНОГОПОТОЧНЫХ
МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ И УСТАНОВОК**

Специальность: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор, **Жуков Владимир Павлович**

Официальные оппоненты:

Кудинов Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры «Тепловые электрические станции»;

Аронсон Константин Эрленович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», главный научный сотрудник;

Дмитриев Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств».

Ведущая организация:

Публичное акционерное общество энергетики и электрификации «Мосэнерго», г. Москва

Защита состоится «18» октября 2024 г. в 11:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.303.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен:

http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Barochkin_A.E._0.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.303.01



Бушуев
Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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. Кроме этого, каждый поток энергоносителя может состоять из нескольких компонентов. Под компонентами в данном случае понимаются различные фазовые состояния одного вещества (например, вода и пар) или разные компоненты смеси, отличающиеся физическими или химическими свойствами (крупностью зерен для сыпучих материалов или разными температурами кипения смеси жидкостей). Ранее получены решения задачи теплообмена в многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратах с однокомпонентными теплоносителями. Однако в энергетике, в пищевой и нефтехимической отраслях промышленности часто в теплообменных процессах участвуют многокомпонентные теплоносители, теплофизические свойства компонентов, которых существенно различаются. Для проведения теплотехнических расчетов с такими смесями обычно выполняется усреднение значений теплофизических параметров компонентов. Однако в ряде технологий на основе различия теплофизических свойств, в частности, различия температуры кипения компонентов, реализуются процессы по разделению этих компонентов, например, при перегонке или ректификации продуктов в энергетических системах и комплексах пищевой и нефтехимической промышленности. В этом случае именно различия в теплофизических свойствах каждого компонента необходимо учитывать при расчете теплообменных процессов.

Из литературных источников известны модели многопоточных теплообменных аппаратов без учета возможного в них фазового перехода. Однако в ряде случаев, например, в многопоточных теплообменных аппаратах, предназначенных для утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов ТЭС, водяные пары при конденсации меняют фазовое состояние при достижении температуры насыщения. При этом граница начала фазового перехода часто заранее неизвестна.

Вся тепловая схема ТЭС может рассматриваться как многопоточная система с обменом между ее подсистемами потоками разного вида энергии: химической, тепловой, механической, электрической. Представление на единой методологической основе трансформации энергии на ТЭС открывает возможности уточнения энергетических характеристик оборудования. Таким образом, развитие моделирования многопоточных теплообменных аппаратов на случай описания многокомпонентных потоков, разработка единого подхода и методов расчета систем многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов с многокомпонентными теплоносителями для эффективного разделения компонентов является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

Актуальность работы подтверждается также ее выполнением в рамках гранта РФФИ (проект 18-08-00028) и договоров о научно-техническом сотрудничестве с Ченстоховским политехническим университетом (Польша), с Progress, Inc. (West Bloomfield, Michigan, US), с ООО «Реиннольц» (г. Екатеринбург, Россия).

Степень разработанности темы диссертации. Наиболее значимые результаты в области технологических процессов тепломассообмена в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых системах обобщены в работах В.П. Исаченко, А.В. Лавыгина, Ю.М. Бродова, Л.С. Стермана, А.С. Седлова, А.В. Мошкарина, И.З. Аронова, В.В. Беспалова, А.А. Кудинова, К.Э. Аронсона, С.Е. Андреева, С.Ф. Шишкина, М.И. Щепетильникова, В.Я. Рыжкина, Н.Д. Рогалева, А.И. Андрющенко, А.В. Дмитриева и др. Исследованиям матричного моделирования процессов тепломассообмена посвящен ряд научных работ и диссертаций, подготовленных в ИГЭУ, в том числе при участии автора (Г.В. Ледуховский, А.Н. Беляков). Тем не менее, к настоящему времени остаются неизученными важные аспекты моделирования и оптимизации рассматриваемых технологических процессов тепломассообмена. В частности, процессы тепломассообмена в технологических системах сложной структуры с несколькими элементами: многоступенчатые теплообменные системы со ступенями, которые имеют произвольное число входных и выходных потоков. Не сформулирована обратная задача теплопередачи для ступеней многопоточных теплообменных аппаратов, особенно с фазовым переходом и при противоточном движении теплоносителей, отсутствуют обладающие приемлемой точностью модели процессов разделения при многоступенчатой классификации многокомпонентных смесей разнопрочных компонентов. Не представлены задачи матричного моделирования тепломассообменных процессов разделения смесей жидкостей с разными физическими свойствами компонентов.

Для преодоления указанных проблем необходимо выработать единые принципы моделирования процессов тепломассообмена в различных объектах. Ранее в ИГЭУ при участии автора разработаны научные основы метода матричной формализации моделирования и расчета процессов многопоточного тепломассообмена, в том числе и с фазовым переходом в теплоносителях. Для применения данного подхода при решении практических задач необходимо дальнейшее развитие данного метода, разработка эмпирического обеспечения формализованных матричных моделей и методов расчета параметров идентификации для различных практически значимых случаев. Для этого требуется получить и проанализировать соответствующие экспериментальные данные.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности функционирования многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок путем их моделирования, расчета и оптимизации.

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

1. Разработать научные основы и методологию математического описания процессов формирования энерго- и массопотоков в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических установках и комплексах.

2. Разработать в рамках предложенной методологии модель паротурбинной установки и единый подход к описанию ТЭС как многокомпонентной многопоточной многоступенчатой энергетической системы.

3. Разработать модели процессов тепломассообмена в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических системах и комплексах.

4. Разработать алгоритмы и программные комплексы для компьютерной реализации полученных моделей, обеспечивающие расчет показателей работы энергетических систем для выбранных значений конструктивных и режимных параметров.

5. Реализовать на практике результаты работы путем разработки математического описания, методов расчета и совершенствования процессов теплообмена в технологических системах ТЭС, энергетических системах и комплексах.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности *в части направлений исследований* – пункту 1: «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах ... в целом и их основного и вспомогательного оборудования.»; – пункту 2: «Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах ... их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии»; – пункту 5: «Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, ... в энергетических системах и комплексах».

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны научные основы и методология математического описания процессов формирования энерго- и массопотоков в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических системах и установках, базирующиеся на матричной формализации уравнений баланса энергии и массы теплоносителей.

2. В рамках предложенной методологии разработаны математическая модель паротурбинной установки и единый подход к математическому описанию ТЭС как многокомпонентной многопоточной многоступенчатой энергетической системы; получены и проанализированы результаты моделирования с целью построения энергетических характеристик теплофикационного турбоагрегата, выполнено сравнение результатов расчета с энергетическими характеристиками действующего турбоагрегата, показана достоверность и обоснованность предложенного подхода.

3. Разработана математическая модель многопоточных многоступенчатых теплообменных систем, каждая ступень которых может иметь произвольное число входных и выходных потоков. Порядок использования и возможности предложенного подхода продемонстрированы на примере четырехступенчатой трехпоточной системы теплообменных аппаратов, получены и проанализированы результаты моделирования.

4. Разработано математическое описание многопоточных теплообменных аппаратов с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях. Найдены и проанализированы аналитические и численные решения для контактного теплообменного аппарата, используемого для утилизации влаги и тепловой энергии из дымовых газов котельных установок, показаны возможности предложенной модели при проведении проектных расчетов. Определены конструктивные характеристики теплообменного аппарата для получения заданных значений количества конденсата или снижения температуры уходящих газов.

5. Для проведения проектных расчетов предложен новый матричный метод решения обратных задач по выбору конструктивных и режимных параметров теплообменных аппаратов, которые обеспечивают эффективную работу системы при выбранных комбинациях известных параметров теплоносителей. Предложена новая формулировка обратной задачи теплопередачи и получено ее решение для случая скользящей границы начала фазового перехода при противоточном характере движения теплоносителей.

6. Разработана модель фракционирования многокомпонентной смеси сыпучих материалов в двухступенчатой классифицирующей установке. На основании полученных экспериментальных данных по исследованию разделения смеси разнородных сыпучих компонентов в классифицирующей системе выполнена структурная и параметрическая идентификация модели и показана ее адекватность.

7. В рамках предложенного подхода для случая использования в качестве теплоносителей смеси компонентов с разной температурой кипения получена математическая модель процесса тепломассообмена, позволяющая определить степень разделения компонентов и качество готового продукта по содержанию в нем нецелевых примесей при различных способах организации процесса, предложены и проанализированы возможные направления совершенствования процесса.

8. В рамках проведенных исследований сформулирована задача оптимизации процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью; получено ее решение для двухступенчатой системы, проведен анализ полученных результатов.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

1. В разработке и совершенствовании универсальной методологии моделирования, расчета и оптимизации многоступенчатых, многопоточных тепло- и массообменных систем с использованием матричной формализации уравнений баланса теплоты и массы теплоносителей.

2. Получении теоретического подтверждения целесообразности применения разработанной методологии к математическому описанию ТЭС с целью построения и актуализации энергетических характеристик (на примере теплофикационного турбоагрегата).

3. Разработке математической модели многопоточных многоступенчатых теплообменных систем произвольной структуры, каждая ступень которых может иметь произвольное число входных и выходных потоков.

4. Разработке математического описания многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях.

5. Получении теоретического подтверждения целесообразности применения разработанной методологии к описанию механических процессов в дисперсных средах и к разделению смеси компонентов с разной температурой кипения.

6. Постановке и решению в рамках разработанной методологии обратных задач проектирования многопоточных многоступенчатых тепломассообменных систем.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. В разработке программного комплекса «Решение обратной задачи для многопоточных многоступенчатых систем», защищенного свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2022615259), обеспечивающего выбор конструкции аппаратов и параметров теплоносителей для эффективной работы системы.

2. Разработке программного комплекса «Расчет энергетических характеристик теплофикационной паровой турбины с учетом характеристик экономичности отсеков ее про-

точной части», защищенного свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2022615258), позволяющего актуализировать энергетические характеристики на основе массива данных по измеряемым параметрам.

3. Разработке программного комплекса «Расчет процесса теплообмена в башенных градирнях с учетом фазового перехода в теплоносителях», защищенного свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2022682290), позволяющего актуализировать энергетические характеристики на основе массива данных по измеряемым параметрам.

4. Разработке метода использования программного комплекса по расчету энергетических характеристик, позволяющего при ограниченном объеме экспериментальных данных провести актуализацию энергетических характеристик на основе массива данных по измеряемым параметрам и определить ряд не измеряемых параметров работы оборудования.

5. Получении решений обратных задач теплопередачи, позволяющих при выбранных комбинациях известных параметров теплоносителей осуществлять выбор конструктивных и режимных параметров теплообменных аппаратов, обеспечивающих эффективную работу и диагностику состояния функционирования энергетической системы.

Методология и методы исследований. Для получения результатов работы использованы метод теплового и материального балансов системы, методы расчета тепло- и массообмена, методы экспериментальных исследований, метод математического моделирования, методы технико-экономических расчетов теплоэнергетического оборудования и технологических схем энергоустановок, методология математического описания многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность результатов диссертационного исследования обоснована использованием общепринятых математических моделей, основанных на уравнениях баланса массы и энергии; согласованием в пределах погрешности расчетных и экспериментальных данных; согласованностью для предельных случаев результатов работы с опубликованными в литературных источниках данными других авторов; публикацией результатов исследований в ведущих рецензируемых научно-технических журналах; удовлетворительной сходимость численных и аналитических решений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая обобщенная методология моделирования, расчета и оптимизации многокомпонентных многопоточных многоступенчатых тепло- и массообменных систем с использованием матричной формализации уравнений баланса теплоты и массы теплоносителей, система классификации и кодификации задач тепломассообмена в многоступенчатых многопоточных многофазных энергетических установках.

2. Результаты применения разработанной методологии к моделированию и расчету тепло- и массообменных систем и энергетических характеристик турбоагрегатов ТЭС с учетом модели конденсационной установки.

3. Результаты применения разработанной методологии к моделированию многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем с учетом фазовых переходов в теплоносителях и результаты исследования влияния фазовых переходов на характеристики тепло- массообменных процессов.

4. Результаты применения разработанной методологии к моделированию и расчету процессов в дисперсных средах и разделения смесей компонентов с разной температурой кипения.

5. Результаты постановки в рамках разработанной методологии и решения обратных задач проектирования тепло- массообменных процессов в многопоточных многоступенчатых энергетических системах.

6. Результаты использования разработанной методологии моделирования и расчета к решению актуальных исследовательских и производственных задач.

Реализация результатов работы. Программный комплекс «Расчет энергетических характеристик теплофикационной паровой турбины с учетом характеристик экономичности отсеков ее проточной части» внедрен в практику планирования режимов работы оборудования Сакмарской ТЭЦ и использован при оптимизации обеспечения перспективных тепловых нагрузок в городе Оренбург. Программный комплекс «Решение обратной задачи для многопоточных многоступенчатых систем» использован для повышения эффективности работы теплообменного оборудования ПГУ-ТЭС «Международная» ООО «Ситиэнерго» (г. Москва). Программные комплексы по расчету энергетических характеристик и решению обратных задач тепломассообмена для многоступенчатых систем внедрены в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета. Результаты исследований процессов тепломассообмена в многоступенчатых многопоточных системах используются в промышленных и научно-исследовательских проектах, реализуемых Ченстоховским технологическим университетом (Польша, Ченстохов). Программный комплекс «Решение обратной задачи для многопоточных многоступенчатых систем» использован для реализации комплекса мероприятий, направленных на повышение технико-экономической эффективности работы теплофикационного оборудования Сызранской ТЭЦ. Программный комплекс «Расчет энергетических характеристик теплофикационной паровой турбины с учетом характеристик экономичности отсеков ее проточной части» использован при составлении нормативных энергетических характеристик Сызранской ТЭЦ. Суммарный эффект от внедрения предложенных технических решений на энергообъектах России, подтвержденный актами внедрения, составляет 38 794 т у.т. в год, что в ценах 2024 года эквивалентно экономическому эффекту в размере 232,261 млн. руб. с НДС в год при сжигании природного газа.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке и развитии обобщенной **методологии** математического описания процессов формирования энерго- и массопотоков в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических системах и установках, основанной на матричной формализации; в разработке **модели** паротурбинной установки как многокомпонентной многопоточной многоступенчатой энергетической системы; в получении и анализе энергетических характеристик турбоагрегата; в разработке математической модели многопоточных, многоступенчатых теплообменных систем, каждая **ступень** которых может иметь **произвольное число входных и выходных потоков**; в разработке математического описания многопоточного контактного теплообменного аппарата с учетом возможного **фазового перехода** в теплоносителях; в постановке и решении матричным методом обратных задач теплопередачи; в предложении новой формулировки обратной задачи теплопередачи для случая скользящей границы начала фазового перехода при противоточном ха-

рактуре движения теплоносителей; в разработке модели фракционирования многокомпонентной смеси сыпучих материалов в многоступенчатой классифицирующей установке; в получении и анализе **экспериментальных** данных по **разделению смеси** разнородных сыпучих **компонентов** в классифицирующей системе; в выполнении структурной и параметрической идентификации предложенных моделей; в формулировке и решении **оптимизационной** задачи по извлечению целевого компонента из смеси разнородных компонентов; в разработке модели процесса тепломассообмена для определения степени разделения компонентов и качества готового продукта; в **оптимизации** процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов; в совершенствовании расчетных алгоритмов для прикладных программных комплексов; в непосредственном участии и руководстве работами по всем направлениям практической реализации результатов диссертации; в подготовке публикаций по тематике исследования.

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 27 конференциях, в том числе: XVII, XVIII, XIX, XX, XXI, XXII Международных научно-технических конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2013, 2015, 2017, 2019, 2021, 2023 гг.); XXIX, XXXII, XXXV Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (2016, 2019, 2022 гг.); VII Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2017г.); Международном научно-техническом симпозиуме «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» (Москва, 2019 г.); First Conference on Sustainable Development: Industrial Future of Territories (IFT 2020) (Екатеринбург, 2020); XIX, XXI Международных Плесских научных конференциях по нанодисперсным магнитным жидкостям (г. Плес, 2020, 2022 г.); Седьмой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2020» (г. Москва, 2020 г.); 6th International Conference «Renewable Energy Sources» (ICORES19) (Krynica, 2019).

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 73 опубликованных работах, в том числе в 20 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК; 9 статьях в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus; 5 статьях в других изданиях; 28 тезисах и полных текстах докладов конференций; 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ; 1 монографии, 7 учебных пособиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, списка использованных источников из 352 наименований. Текст диссертации изложен на 313 стр. машинописного текста, содержит 94 рисунка, 51 таблицу и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ 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 многопоточных многоступенчатых установках. Анализ литературных источников показал, что вопросам моделирования и анализа многопоточных и многоступенчатых тепломассообменных систем в той или иной мере посвящено большое число исследований, среди которых можно выделить работы М.И. Щепетильникова,

Ю.М. Бродова, А.М. Кутепова, А.В. Лыкова и др. В качестве одного из основных направлений повышения эффективности работы энергетических систем и установок ТЭС многими авторами, занимавшихся данной проблемой, определено снижение потерь тепла с уходящими газами. Продукты сгорания природного газа содержат большое количество водяных паров и обладают значительным потенциалом для утилизации тепла. Полученный из уходящих газов конденсат водяных паров дополнительно может быть использован в тепловой схеме ТЭС как высококачественный теплоноситель, компенсирующий утечки рабочего тела в цикле паротурбинной установки. В разное время данными исследованиями занимались А.К. Сильницкий, Б.Н. Лобаева, И.З. Аронов, А.А. Кудинов, В.В. Беспалов.

Несмотря на большое количество научных публикаций по утилизации тепла дымовых газов и положительному опыту применения разработанных конструкций конденсационных теплоутилизаторов в промышленности, в энергетике основная масса газовых котельных и тепловых электрических станций в настоящее время продолжают работать без внедрения установок глубокой утилизации тепла. Этому есть ряд причин, вызванных отсутствием универсальных методик расчета и проектирования теплоутилизаторов конденсационного типа.

Для систематизации существующих моделей и подходов к моделированию теплообменных процессов проведен анализ опубликованных данных, в результате которого разработана система классификации и кодификации задач теплообмена в многофазных многопоточных средах, структура которой представлена на рисунке 1.

Классификация задач выполнена по четырем признакам: число компонентов (n), число потоков (k), число ступеней в анализируемой системе (m), наличие возможного перехода между компонентами (p). По числу компонентов выделяются однокомпонентные и многокомпонентные системы. По числу потоков теплоносителей системы подразделяются на однопоточные, двухпоточные и многопоточные. По признаку числа ступеней системы классифицируются на одноступенчатые и многоступенчатые. Кроме этого, при классификации задач рассматривается признак возможного перехода одного компонента в другой, что на практике может быть реализовано при фазовых переходах или при переходе крупных фракций в мелкие при измельчении сыпучего материала. На рисунке 1 наряду с классификацией задач приведены их коды. Система кодификации построена следующим образом: код состоит из чисел, разделенных точками: первое слева число кода показывает количество компонентов, второе – количество потоков, третье – количество ступеней, а четвертое – наличие (1) или отсутствие (0) перехода между компонентами. Предложенная система классификации и кодификации позволяет более четко ориентироваться в новизне постановки представленных автором задач.

Проведенный анализ опубликованных данных показал, что остались нерешенными или частично решенными вопросы описания и оптимизации процессов теплообмена в многопоточных многокомпонентных системах, определения оптимальной структуры потоков энергии и массы теплоносителей. С учетом результатов анализа сформулированы задачи работы, решение которых необходимо для достижения поставленной цели диссертации.

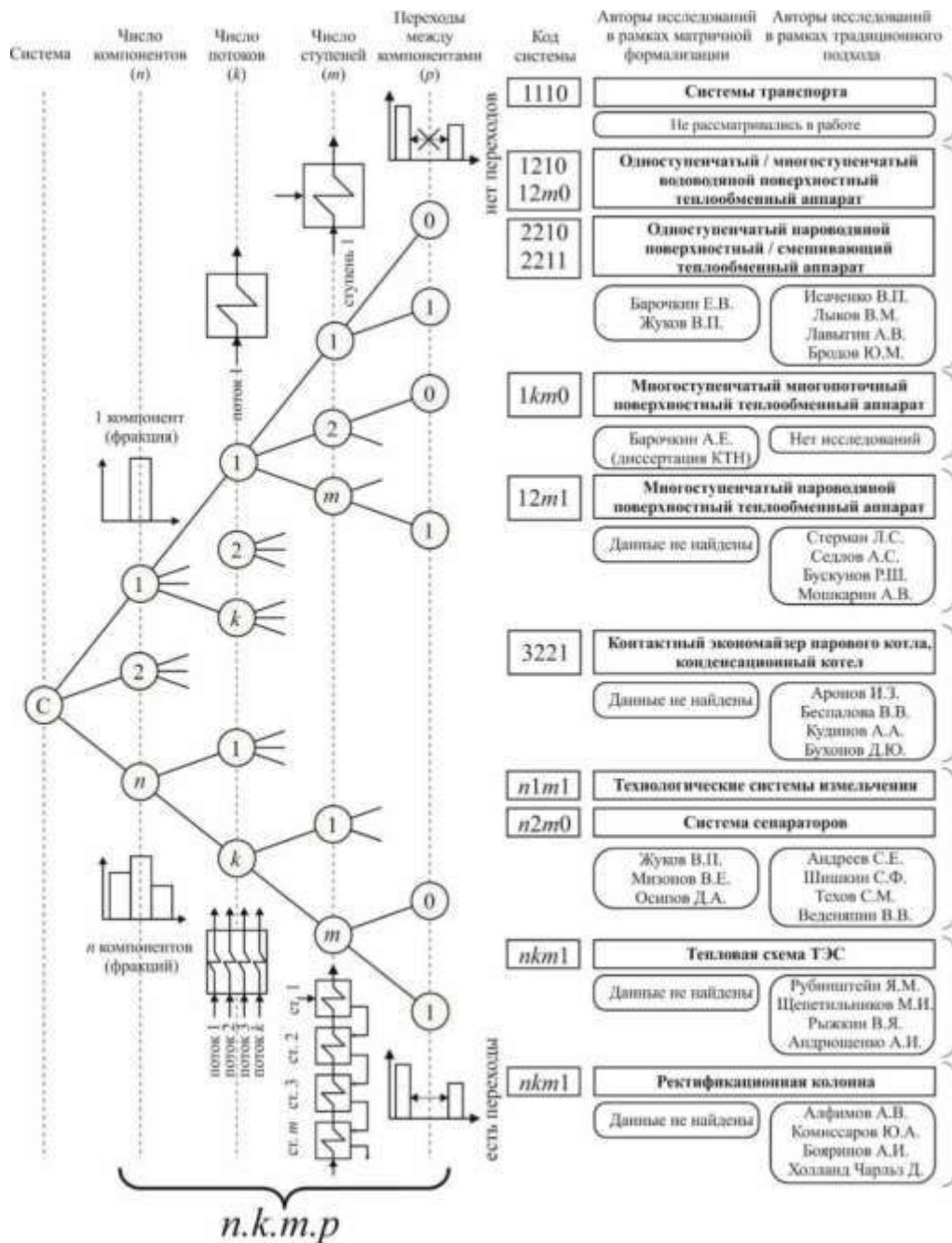


Рисунок 1. Классификация и кодификация систем теплообмена по числу компонентов (n), числу потоков (k), числу ступеней (m) и возможности перехода между компонентами (фракциями) теплоносителей (p)

Вторая глава посвящена разработке и развитию методологии матричного моделирования, и ее применению к математическому описанию многопоточных энергетических систем и установок ТЭС. Традиционно котел, турбина, система регенеративного подогрева питательной воды, деаэрационная установка, схемы теплофикации и циркуляционного водоснабжения рассматриваются отдельно. Объединение указанных подсистем при моделировании в одну многопоточную систему связано с необходимостью учета взаимного влияния этих подсистем на эффективность производства тепловой и электрической энергии на ТЭС.

Разработка математического описания многопоточной энергетической системы рассматривается на примере турбоустановки с конденсацией пара и двумя регулируемым отборами – производственным и теплофикационным (далее – турбоустановки типа ПТ). Принципиальная тепловая схема исследуемого объекта изображена на рисунке 2, а. Для

разработки модели на основании принципиальной тепловой схемы строится расчетная схема с выделением подсистем основных потоков, представленная на рисунке 2, б.

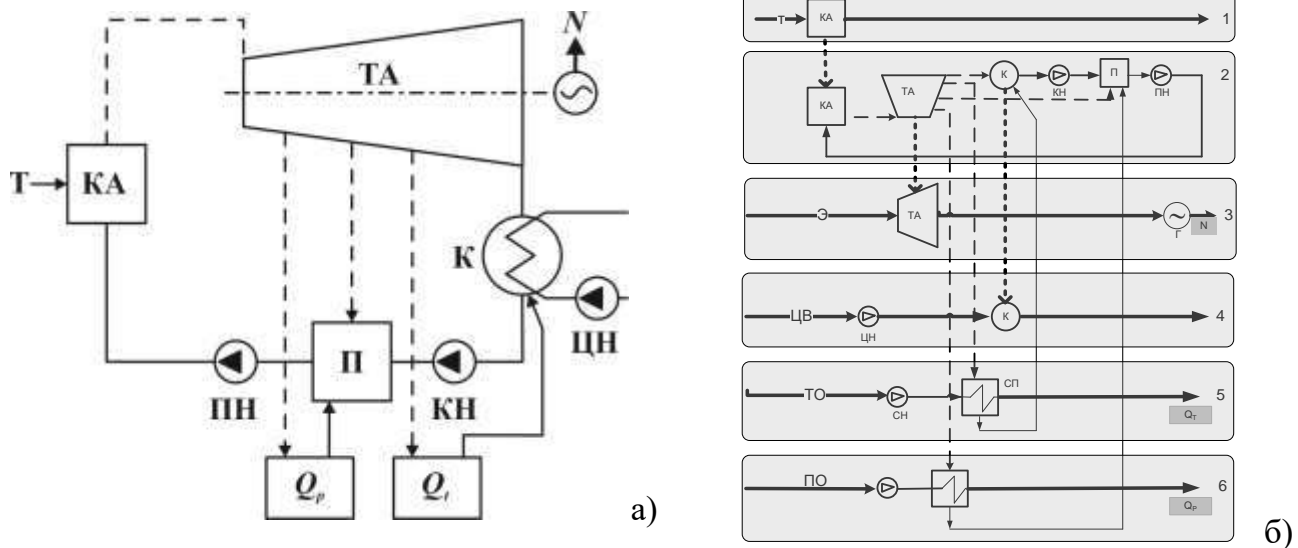


Рисунок 2. Принципиальная тепловая схема (а) и расчетная схема (б) для системы турбоустановки типа ПТ с выделением основных подсистем: 1 – топливо; 2 – вода и пар; 3 – электрическая энергия; 4 – циркуляционная вода; 5 – теплофикационный отбор; 6 – производственный отбор; Т – топливо; КА – котел; ТА – турбина; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; П – регенеративный подогреватель; ПН – питательный насос; Q_p , Q_t – производственная и теплофикационная нагрузки. Между подсистемами связи по воде показаны сплошными, по пару – штриховыми, по энергии – пунктирными линиями

Согласно расчетной схеме, записываются следующие балансовые уравнения: баланс энергии для котла; баланс энергии для турбины; баланс массы для турбины; баланс энергии для регенеративного подогревателя; баланс энергии для конденсатора; баланс энергии для производственного отбора пара; баланс энергии для теплофикационного отбора пара. Перечисленные выше семь балансовых соотношений в рамках предлагаемой методологии моделирования записываются в матричном виде

$$A \cdot X = X_v, \quad (1)$$

где $X = [B \ D \ D_p \ D_r \ D_t \ D_k \ D_{пв}]'$ – матрица-столбец размера 7×1 искомым параметров;

$X_v = [0 \ N \ 0 \ 0 \ 0 \ Q_p \ Q_t]'$ – матрица-столбец размера 7×1 заданных нагрузок;

верхний индекс «'» означает транспонирование матрицы; $A = \{a_{ij}\}$ ($i = \overline{1,7}$; $j = \overline{1,7}$) – матрица размера 7×7 известных коэффициентов:

$$a_{11} = Q_n^p \cdot \eta_k; a_{12} = i_o - i_{пв}; a_{22} = (i_o - i_p) \cdot \eta_{t1} + (i_p - i_r) \cdot \eta_{t2} + (i_r - i_t) \cdot \eta_{t3}; a_{23} = -(i_p - i_r) \cdot \eta_{t2} - (i_r - i_t) \cdot \eta_{t3};$$

$$a_{24} = -(i_r - i_t) \cdot \eta_{t3}; a_{25} = (i_t - i_k) \cdot \eta_{t4}; a_{32} = i_{пв}; a_{33} = -i_{ps}; a_{34} = -i_r; a_{35} = -i_{ks}; a_{36} = -i_{ks};$$

$$a_{42} = 1; a_{43} = -1; a_{44} = -1; a_{45} = -1; a_{46} = -1; a_{55} = i_k - i_{ks}; a_{56} = -\Delta t \cdot c; a_{63} = i_p - i_{ps}; a_{73} = i_t - i_{ks},$$

где D – расход пара; i – энтальпия; N – электрическая мощность; B – расход топлива; Q_n^p – удельная теплота сгорания топлива; Q_p , Q_t – производственная и теплофикационная нагрузки; Δt – нагрев охлаждающей воды в конденсаторе; c – удельная теплоемкость воды; η_{ti} – произведение внутреннего относительного КПД i -го отсека проточной части турбины на электромеханический КПД турбоустановки; η_k – произведение КПД брутто котла на КПД теплового потока (учитывает потери теплоты при транспорте пара от

котла до турбоустановки и питательной воды от турбоустановки до котла), индекс «о» относится к острому пару, «р» – производственному отбору, «т» – теплофикационному отбору, «г» – регенеративному отбору, «цв» – циркуляционному водоснабжению; «к» – конденсатору, «s» – состоянию насыщения; «пв» – питательной воде. Значения всех коэффициентов матрицы A , которые не перечислены выше, равны нулю.

Решение системы (1), выполненное методом обращения матриц, позволяет определить вектор искомых параметров согласно выражению

$$X = A^{(-1)} \cdot X_v, \quad (2)$$

где верхний индекс (-1) означает обращение матрицы.

Для построения энергетических характеристик оборудования ТЭС по известным приведенным в диссертации формулам определяется удельный расход тепловой энергии брутто на выработку электроэнергии, который является величиной обратной абсолютному электрическому КПД турбоустановки.

Для демонстрации прогностических возможностей модели приводятся результаты расчета энергетических характеристик турбины ПТ-65/75-130/13. Зависимость коэффициента полезного действия от расхода пара через турбину выбирается согласно выражению:

$$\eta_t = 0,825 \cdot (1 - b \cdot \exp(-a \cdot \bar{d})), \quad (3)$$

где a , b – эмпирические коэффициенты, значения которых определяются типом турбины и состоянием ее проточной части; \bar{d} – относительный расход пара через проточную часть турбины.

Для проведения расчетных исследований по модели (1)–(3) разработаны алгоритм и компьютерная программа для его реализации в среде MATLAB. Результаты расчетного анализа представлены на рисунке 3 в виде энергетических характеристик турбоустановки для разных значений производственной и теплофикационной нагрузок и вырабатываемой электрической мощности. На этом же рисунке точками представлены значения расхода тепла брутто на выработку электроэнергии (Q), принятые согласно данным нормативно-технической документации по топливоиспользованию.

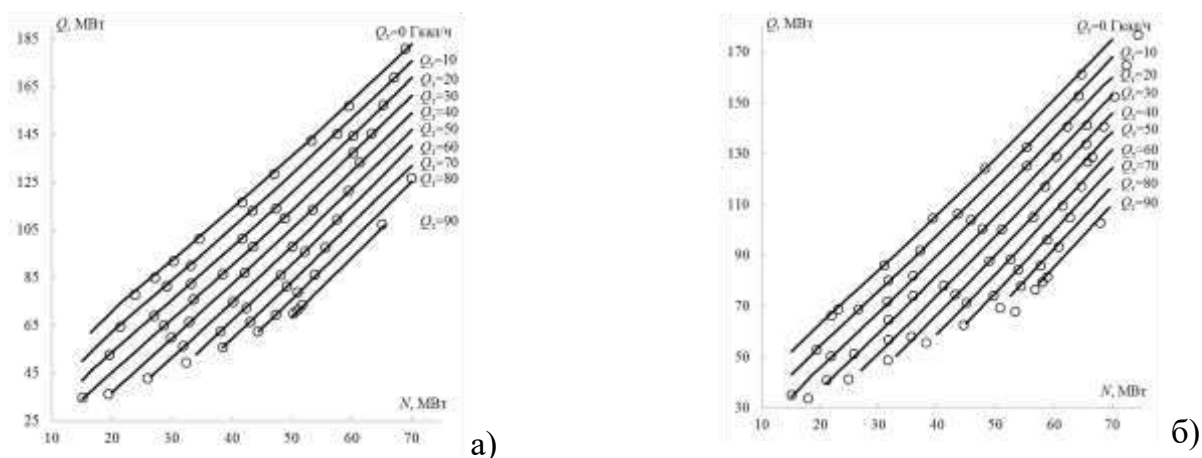


Рисунок 3. Энергетические характеристики турбины ПТ-65/75-130/13 для различных нагрузок производственного отбора: $Q_p = 0$ (а) и $Q_p = 20$ Гкал/ч (б)

Анализ приведенных данных показывает, что при нулевой нагрузке производственного отбора результаты расчета практически полностью совпадают с принятыми для действую-

ющей турбины (рисунок 3,а): среднее относительное отклонение не превышает 0,4%. Однако при увеличении нагрузки производственного отбора до 20 Гкал/ч (рисунок 3,б) наблюдается увеличение расхождения до 2,3%. Очевидно, такое расхождение связано с использованием одинакового для всех отсеков проточной части турбины значения коэффициента полезного действия η_i , а также принятыми при разработке модели упрощениями по системе регенеративного подогрева питательной воды. Дальнейшее совершенствование модели с учетом разных характеристик экономичности отдельных отсеков турбины и реальной тепловой схемы турбоустановки приводятся в диссертации.

Выполненный расчетный анализ показал, что найденное решение системы (2) позволяет при ограниченном объеме используемых экспериментальных данных определять энергетические характеристики турбины.

В рамках матричной методологии моделирования сформулирована и решена задача моделирования многопоточных многоступенчатых теплообменных систем с произвольным числом входных и выходных потоков в каждой ступени. Известно решение задачи матричного описания многоступенчатых двухпоточных систем теплообменных аппаратов, каждая ступень которых представлена в виде четырехполюсника с двумя входными и двумя выходными потоками. На практике в теплообменные аппараты помимо двух основных потоков холодного и горячего теплоносителей часто направляются дополнительные потоки, обусловленные дренированием, продувкой или аварийными режимами работы системы.

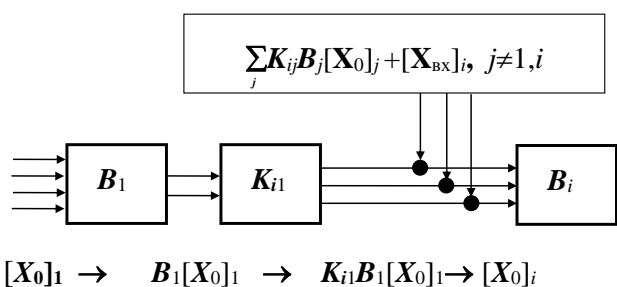


Рисунок 4. Расчетная схема формирования потока на входе в i -й элемент многопоточной многоступенчатой теплообменной установки

потока на входе в i -й элемент (ступень) установки. Более подробно на рисунке представлена связь между первой и i -ой ступенью. Так на вход в первый элемент подаются потоки теплоносителей, которые характеризуются набором аддитивных признаков $[X_0]_1$, в качестве которых рассматриваются потоки массы или энергии. Индекс «0» внутри квадратных скобок указывает на входные параметры, индекс «1» за квадратными скобками относится к номеру ступени. Процесс теплообмена, массообмена или их совместное протекание описывается матрицей процесса B , которая при линейной постановке задачи позволяет определить выходные параметры ступени в виде: $[X]_1 = B_1[X_0]_1$. Для указания направления движения потоков после ступени формируется матрица коммутации K_{i1} , элементы которой показывают доли потоков теплоносителей, подаваемых из первой ступени в i -ю. При этом матричное произведение $K_{i1} B_1[X_0]_1$ определяет параметры потоков, подаваемых из первого элемента в i -й. Очевидно, что на вход в i -ю ступень могут подаваться потоки не только из первой ступени, но также из остальных ступеней системы и внешние для системы потоки. Перечисленные потоки условно показаны в верхней части расчетной схемы на рисунке 4. Входной вектор признаков для

Для построения математического описания таких систем составлена ее расчетная схема, представленная на рисунке 4. На схеме показана наиболее общая структура соединения n ступеней системы, при которой возможна коммутация любых выходных и входных потоков при произвольном их числе для каждой ступени. На рисунке схематично показано формирование

i -го элемента определится суммой значений аддитивных параметров, смешиваемых на его входе потоков в узлах смешения, отмеченных на рисунке точками:

$$[X_0]_i = K_{i1} \cdot B_1 \cdot [X_0]_1 + K_{i2} \cdot B_2 \cdot [X_0]_2 + \dots + K_{in} \cdot B_n \cdot [X_0]_n + [X_{\text{вх}}]_i, \quad (4)$$

где индекс «вх» указывает на внешний поток, подаваемый на вход ступени.

Уравнения, аналогичные (4), записываются для каждой из n ступеней установки и представляются в матричном виде

$$\begin{pmatrix} -I & K_{12} \cdot B_2 & \dots & K_{1n} \cdot B_n \\ K_{21} \cdot B_1 & -I & \dots & K_{2n} \cdot B_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} \cdot B_1 & K_{n2} \cdot B_2 & \dots & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [X_0]_1 \\ [X_0]_2 \\ \dots \\ [X_0]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[X_{\text{вх}}]_1 \\ -[X_{\text{вх}}]_2 \\ \dots \\ -[X_{\text{вх}}]_n \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где I – единичная матрица.

При известных матрицах B и K решение системы (5) позволяет определить значения параметров теплоносителей в любой точке системы.

Структура потоков в многоступенчатой установке задается матрицей коммутации $K_{ij} = \{\alpha_{ij}\}$, размер которой определяется числом входных и выходных потоков ступеней. Матрица коммутации для четырехполюсника с двумя входными и двумя выходными потоками состоит из четырех элементов: $K_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix}$, каждый из которых показывает долю потока из j -го в i -й элемент: α_{11} – горячего теплоносителя в горячий, α_{12} – холодного в горячий, α_{21} – горячего в холодный, α_{22} – холодного в холодный.

Матрица коммутации для трехпоточной ступени с тремя входными и тремя выходными потоками состоит уже из девяти элементов, каждый из которых показывает долю потока из j -го в i -й элемент для трех потоков теплоносителей: горячего, промежуточного и холодного, которые будем также называть первым, вторым и третьим теплоносителем. Примеры матриц коммутации для трехпоточных аппаратов с тремя входными и тремя выходными потоками приведены в таблице 1.

Таблица 1. Примеры матриц коммутации для ступеней трехпоточного теплообменника

Вид матрицы коммутации K_{ij} при подаче из j -го в i -й элемент			
только первого теплоносителя	первого и третьего теплоносителей	трех теплоносителей	теплоносители не подаются
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Для известных температур теплоносителей на входе в ступень матрица B позволяет определить параметры теплоносителей на выходе ступени согласно выражению

$$T = B \cdot T_0, \quad (6)$$

где T , T_0 – матрицы искомых и исходных температур; $B = \{b_{ij}\}$ – матрица процесса. Вид матрицы B для двухпоточной ступени размера 2×2 элемента и для трехпоточной ступени размера 3×3 элемента для теплообмена без фазового перехода в теплоносителях приводится в диссертации.

Пример расчетного анализа с использованием предложенного подхода проведен для двух систем трехпоточных четырехступенчатых аппаратов, структурные схемы которых приведены на рисунке 5. На рисунке 5,а показана схема многоступенчатой установки, у которой движение всех трех теплоносителей организовано по прямоточной схеме, все три теплоносителя двигаются в одном направлении. На схеме рисунка 5,б показана более сложная структура потоков теплоносителей, в которой третий теплоноситель подается сначала в четвертую ступень, потом в третью, вторую и в первую. Такая структура схемы соответствует противоточному движению третьего теплоносителя относительно первых двух.

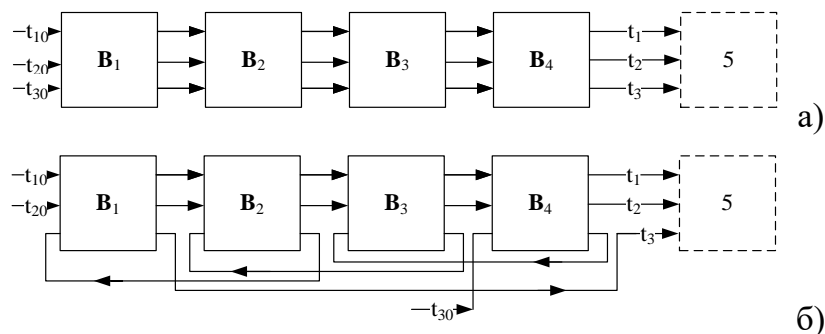


Рисунок 5. Исследуемые структуры потоков для трехпоточной четырехступенчатой схемы

Для удобства представления результатов расчета схема дополняет пятой фиктивной ступенью, параметры теплоносителей на входе в которую соответствуют параметрам теплоносителей на выходе из системы. Матрицы коммутации размера 5×5 блоков или 15×15 элементов и матрицы процесса \mathbf{B} для расчета обеих схем рисунка 5, определяется согласно приведенным в диссертации формулам. При выполнении численного расчета были использованы следующие исходные данные: $t_{10} = 67,62$ °C, $t_{20} = 67,62$ °C, $t_{30} = 40$ °C, $G_1 = 20,55$ кг/с, $G_2 = 657,22$ кг/с, $G_3 = 2143,33$ кг/с, где индекс «0» показывает значение температуры на входе в систему. Результаты расчетного анализа представлены на рисунке 6 в виде зависимости температуры теплоносителей на выходе системы от площади поверхности теплообмена ступени. Анализ приведенных на рисунке 6 данных показывает, что полученные результаты достоверно описывают поведение температурных зависимостей для прямоточных и противоточных схем движения теплоносителей.

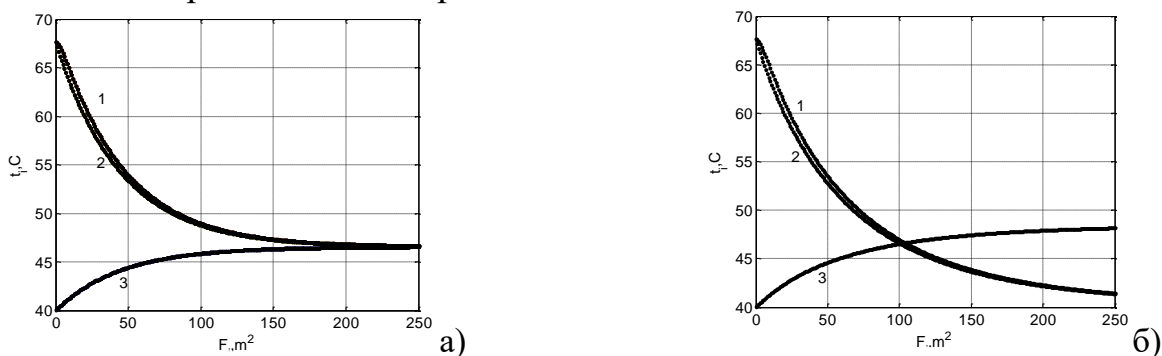


Рисунок 6. Зависимости температуры теплоносителей от площади поверхности теплообмена ступени для структур потоков, приведенных на рисунке 5,а (а) и рисунке 5,б (б). Цифрами 1, 2, 3 показан номер теплоносителя

Для проведения проектных расчетов по выбору конструкции аппаратов и параметров теплоносителей, которые обеспечивают эффективную работу системы, предложен новый матричный метод формулировки и решения **обратных задач теплопередачи**.

На первом этапе исследований обратная задача решается для проточного одноступенчатого двухпоточного теплообменного аппарата, конструкция которого с указанием схемы движения теплоносителей приведена на рисунке 7, а. При выполнении поверочного расчета аппарата обычно задаются температуры горячего t_{10} и холодного t_{20} теплоносителей на входе в аппарат, а рассчитываются температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе теплообменника: t_1, t_2 .

Математическая модель для решения обратной задачи теплопередачи записывается в виде системы двух дифференциальных уравнений относительно температур горячего t_1 и холодного t_2 теплоносителей, а ее решение в матричном виде

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_{10} \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

или

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{T}_0, \quad (8)$$

где $b_{11} = a_2 / a_1 + e^{-(a_1+a_2) \cdot F}$, $b_{12} = 1 - e^{-(a_1+a_2) \cdot F}$, $b_{13} = -(1 + a_2 / a_1)$, $b_{21} = a_2 / a_1 \cdot (1 - e^{-(a_1+a_2) \cdot F})$, $b_{22} = 1 + a_2 / a_1 \cdot e^{-(a_1+a_2) \cdot F}$, $b_{24} = -(1 + a_2 / a_1)$, $a_1 = k / (c_1 \cdot G_1)$, $a_2 = k / (c_2 \cdot G_2)$, k – коэффициент теплопередачи; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя; F – площадь поверхности теплообмена, индекс «1» относится к горячему, а «2» – к холодному теплоносителю, $\tilde{t}_{10}, \tilde{t}_{20}$ – численные значения задаваемых параметров.

Система уравнений (7), записанная относительно четырех температур, позволяет, произвольно задавая две температуры из начальных условий, определять две другие из решения системы. Число вариантов задания известных переменных равно числу сочетаний двух параметров из четырех, которое для нашего случая равно шести: а) $t_{10}t_{20}$; б) $t_{10}t_1$; в) $t_{10}t_2$; г) $t_{20}t_1$; д) $t_{20}t_2$; е) t_1t_2 . Каждое из представленных сочетаний определяет вариант комбинации известных параметров или вариант постановки обратной задачи. Шесть указанных комбинаций представлены в таблице 2, там же приведены в матричном виде формулировки обратных задач.

Результаты решения обратной задачи представлены на рисунке 8 для варианта (в), результаты решения остальных вариантов приведены в диссертации. Задаваемые значения температур на рисунке отмечены кружками, а определяемые параметры выводятся в виде зависимостей температуры от площади поверхности теплообмена.

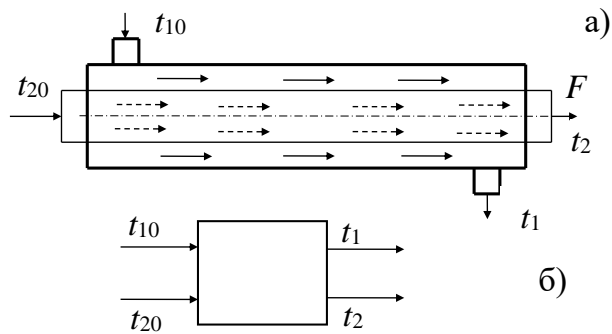


Рисунок 7. Схема движения теплоносителей для проточного теплообменного аппарата (а) и расчетная схема решения обратной задачи в виде четырехполюсника (б)

Таблица 2. Варианты матричных моделей обратных задач теплопередачи

Варианты постановки и задачи		$B \cdot T = T_0$			Варианты постановки и задачи		$B \cdot T = T_0$							
		B, T					T_0	B, T				T_0		
а)	$t_{10}t_{20}$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$				$\begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	б)	$t_{10}t_1$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$				$\begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_{10} \\ \tilde{t}_1 \end{pmatrix}$
		$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$				$\begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$			в)	$t_{10}t_2$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$			
д)	$t_{20}t_2$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$				$\begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	е)	t_1t_2			$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$			

Данное представление решения обратной задачи позволяет при заданном значении известных параметров, определить зависимости искомых параметров от площади поверхности теплообмена, которая и позволяет выбрать эффективную реализацию процесса теплообмена для рассматриваемых условий. Для противоточного характера движения теплоносителей модель теплопередачи записывается аналогично (8), но для теплоносителя, который движется в противоположном направлении оси процесса F , правая часть уравнения умножается на минус единицу. Пример решения обратной задачи для противоточного характера движения теплоносителей представлен на рисунке 9.

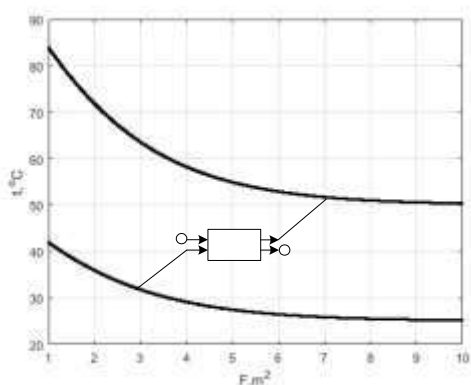


Рисунок 8. Зависимости температуры теплоносителей при прямоточном характере их движения от площади поверхности теплообмена для варианта (в) в таблице 2 постановки обратной задачи теплопередачи: $t_{10} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

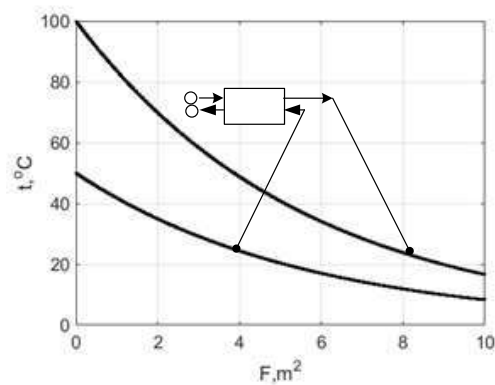
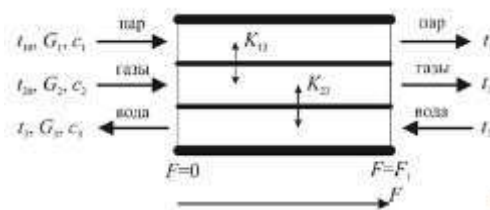


Рисунок 9. Зависимости температуры теплоносителей при противоточном характере их движения от площади поверхности теплообмена при следующем задании известных параметров: $t_{10} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

Постановка и решение **обратной задачи** теплопередачи представлены также для ступени трехпоточных теплообменных аппаратов применительно к контактным многопоточным теплообменникам, используемых для утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов на ТЭС. Задача решается сначала для ступени без учета фазовых переходов

в теплоносителях. Расчетная схема процесса теплопередачи с указанием направления движения потоков теплоносителей приведена на рисунке 10.

Рисунок 10. Расчетная схема трехпоточного противоточного одноступенчатого теплообменного аппарата с указанием направления движения потоков теплоносителей и потоков тепловой энергии за счет теплопередачи



Для решения обратной задачи теплопередачи на первом этапе без учета фазового перехода математическая модель представлена в виде системы трех дифференциальных уравнений относительно температур водяных паров t_1 , дымовых газов t_2 и охлаждающей воды t_3 :

$$\begin{cases} dt_1/dF = -a_1 \cdot t_1 + a_1 \cdot t_2 \\ dt_2/dF = a_2 \cdot t_1 - (a_2 + a_3) \cdot t_2 + a_3 \cdot t_3 \\ dt_3/dF = (-1) \cdot (a_4 \cdot t_2 - a_4 \cdot t_3) \end{cases} \quad (9)$$

где k – коэффициент теплопередачи; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя; $a_1 = k_{12} / (c_1 \cdot G_1)$, $a_2 = k_{12} / (c_2 \cdot G_2)$, $a_3 = k_{23} / (c_2 \cdot G_2)$, $a_4 = k_{23} / (c_3 \cdot G_3)$; одинарный индекс показывает номер теплоносителя, двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует номерам теплоносителей, между которыми происходит теплопередача. Для начальных условий $t_1|_{F=0} = t_{10}$, $t_2|_{F=0} = t_{20}$, $t_3|_{F=F_1} = t_{30}$ (где F_1 – площадь поверхности теплообмена) решение обратной задачи получено по аналогии с (7) в виде:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \bar{t}_{10} \\ \bar{t}_{20} \\ \bar{t}_{30} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где \bar{t}_{10} , \bar{t}_{20} , \bar{t}_{30} – численные значения известных параметров теплоносителей.

Система (10) позволяет, произвольно задавая три температуры, определять оставшиеся три неизвестные температуры из решения системы. Решение обратной задачи для трехпоточной ступени выполняется аналогично решению, приведенному в таблице 2 для двухпоточной ступени, при этом число комбинаций задания исходных данных соответствует числу сочетаний 3 из 6 и равно 20 вариантам. Решение для наиболее интересного варианта постановки обратной задачи трехпоточного теплообмена с учетом возможного фазового перехода в ступени рассматривается в третьей главе.

Матричная методология моделирования многопоточной системы использована в работе для анализа эффективности схемы относительного движения теплоносителей для четырехпоточной одноступенчатой системы без учета фазового перехода. Из литературных источников известно, что для двухпоточных теплообменных аппаратов противоточная схема движения теплоносителей более эффективна по сравнению с прямоточной схемой движения потоков. В рамках разработанной модели многопоточного теплообмена автором ранее выполнен анализ схем движения теплоносителей в трехпо-

точном теплообменном аппарате. Для четырехпоточных теплообменных аппаратов варианты возможных схем движений потоков теплоносителей представлены на рисунке 11 набором стрелок, каждая из которых показывает направление движения одного теплоносителя. Математическое описание теплопередачи для движения всех потоков в одном направлении записывается в виде системы четырех дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} dt_1/dF = -a_1 \cdot t_1 + a_1 \cdot t_2 \\ dt_2/dF = a_2 \cdot t_1 - (a_2 + a_3) \cdot t_2 + a_3 \cdot t_3 \\ dt_3/dF = a_4 \cdot t_2 - t_3 \cdot (a_4 + a_5) + a_5 \cdot t_4 \\ dt_4/dF = a_6 \cdot t_3 - a_6 \cdot t_4 \end{cases} \quad (11)$$

где $a_1 = k_{12} / (c_1 \cdot G_1)$; $a_2 = k_{12} / (c_2 \cdot G_2)$; $a_3 = k_{23} / (c_2 \cdot G_2)$; $a_4 = k_{23} / (c_3 \cdot G_3)$; $a_6 = k_{34} / (c_4 \cdot G_4)$

Для каждой из восьми возможных схем движения потоков теплоносителей, представленных на рисунке 11, составлены системы дифференциальных уравнений аналогичные (11). Решения этих систем, полученные при температурах теплоносителей на входе в систему $t_{10} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{20} = t_{30} = t_{40} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, приведены на рисунке в виде графиков изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева.

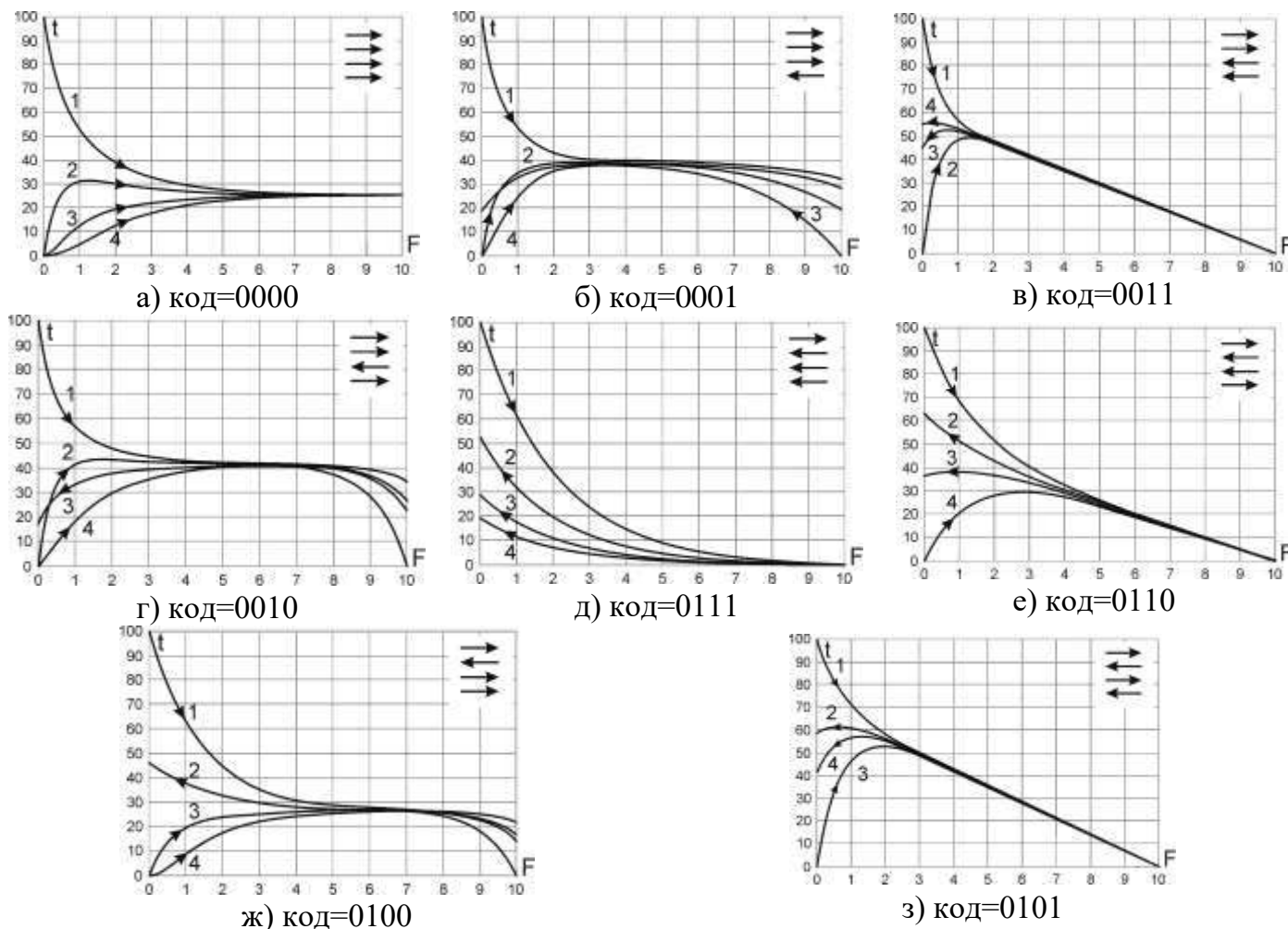


Рисунок 11. Графики изменения температуры четырех теплоносителей вдоль поверхности нагрева для восьми вариантов схем движения потоков теплоносителей, показанных стрелками на поле графика, цифра на поле графика показывает номер теплоносителя. Каждая цифра двоичного кода структуры соответствует направлению движения теплоносителя: 0 – по направлению оси F , m^2 ; 1 – против

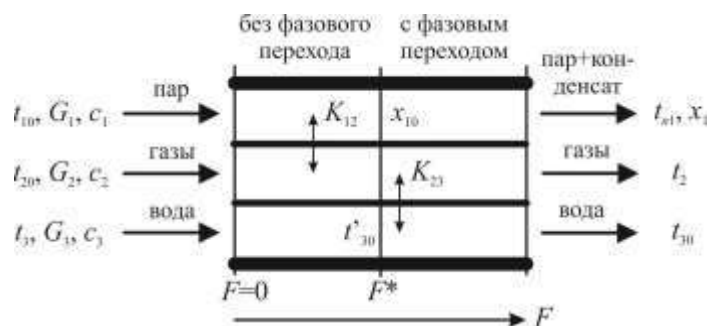
В качестве критерия эффективности теплообмена при сопоставлении схем движения выбрана минимальная температура горячего теплоносителя на выходе, что в случае

сброса данного теплоносителя в окружающую среду определяет ее минимальное тепловое загрязнение. Выполненный расчетный анализ показал, что наиболее эффективная схема организации движения потоков соответствует варианту (д) на рисунке 11, которая позволяет обеспечить минимальное значение температуры горячего теплоносителя на выходе аппарата при минимальном значении площади поверхности теплообмена.

В третьей главе диссертации рассмотрены математические модели многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях. Фазовый переход в многопоточных теплообменных аппаратах реализуется, например, в контактных теплообменниках, предназначенных для утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов ТЭС. Многопоточность теплообменного аппарата в данном случае обуславливается наличием как минимум трех теплоносителей: сухие дымовые газы, водяные пары и охлаждающая вода.

Схема движения потоков прямоточного контактного теплообменного аппарата с указанием направления потоков движения теплоносителей представлена на рисунке 12. В качестве определяющей координаты процесса выбрана площадь поверхности теплообмена F , направление оси которой показано на рисунке. Считается, что каждый теплоноситель двигается по своему каналу, соответственно смещения потоков в ходе процесса теплообмена не происходит, а сразу на выходе из аппарата потоки конденсата и охлаждающей воды смешиваются.

Рисунок 12. Расчетная схема трехпоточного прямоточного теплообменного аппарата с указанием направления движения потоков теплоносителей и потоков тепловой энергии



При построении модели считается, что теплообмен реализуется через поверхность теплообмена F . Система дифференциальных уравнений для описания процесса многопоточной теплопередачи без учета фазового перехода в теплоносителях рассмотрена ранее (9). Охлаждение водяных паров до температуры насыщения приводит к началу их конденсации в точке $F=F^*$ (точка росы). Считается, что в состоянии насыщения температура водяных паров не меняется, а состояние теплоносителя описывается степенью сухости или долей пара в пароводяной смеси x . При этом модель процесса записывается с учетом фазового перехода в первом теплоносителе

$$\begin{cases} x_1/dF = -\tilde{a}_1 \cdot t_{n1} + \tilde{a}_1 \cdot t_2 \\ dt_2/dF = a_2 \cdot t_{n1} - (a_2 + a_3) \cdot t_2 + a_3 \cdot t_3, \\ dt_3/dF = a_4 \cdot t_2 - a_4 \cdot t_3 \end{cases} \quad (12)$$

где $\tilde{a}_1 = k_{12} / (r \cdot G_1)$; r – удельная теплота парообразования; t_{n1} – температура насыщения воды и водяного пара; x_1 – степень сухости пара, которая показывает массовую долю несконденсированного пара от исходной массы водяных паров в дымовых газах.

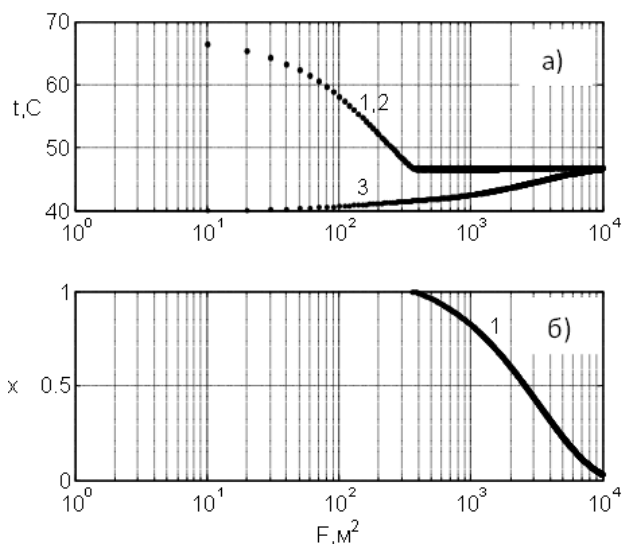


Рисунок 13. Зависимости температур (а) и степени сухости (б) теплоносителя от площади теплообмена с учетом фазового перехода: 1 – пар и конденсат; 2 – дымовые газы; 3 – охлаждающая вода

температура насыщения водяных паров составила $t_n = 46,9$ С. Результаты расчетного анализа в рамках предложенных моделей (9), (12), представлены на рисунке 13.

Решения систем (9), (12) получены численно и не позволяют использовать методологию матричной формализации для описания многоступенчатых систем со сложной структурой потоков. Для получения матричных решений задачи для ступени и определения значений коэффициентов матрицы \mathbf{B} в уравнении (6) найдены аналитические решения этих уравнений для прямоточного характера движения теплоносителей. Общее решение системы однородных дифференциальных уравнений (9), (12) первого порядка ищется в виде:

$$\mathbf{T} = \sum_{j=1}^n C_j \cdot \alpha^j \cdot e^{\lambda_j F}, \quad (13)$$

где \mathbf{T} – вектор столбец искомых функций; λ – собственные числа; α – собственные вектора матрицы \mathbf{A} , составленной из известных коэффициентов правых частей системы (9),

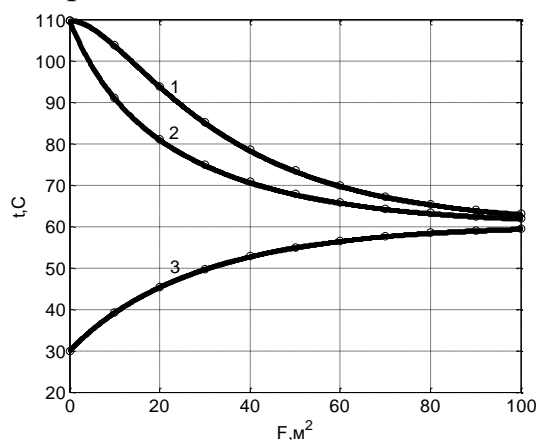


Рисунок 14. Аналитические (точки) и численные (линии) зависимости температуры теплоносителя от площади теплообмена без учета фазового перехода в теплоносителях: 1 – пар, 2 – дымовые газы, 3 – охлаждающая вода

Следует отметить, что модели (9) и (12) описывают изменение параметров теплоносителей в разных диапазонах значений температуры теплоносителя: до и после достижения состояния температуры насыщения. При проведении компьютерных расчетов переход с одной модели на другую реализуется на уровне алгоритма при достижении паром состояния насыщения. Для демонстрации прогностических возможностей модели рассматривается практический пример расчета получения из дымовых газов подпиточной воды для тракта питательной воды применительно к блоку 800 МВт при сжигании природного газа. Значения расходов теплоносителей, которые были использованы при расчете, приведены в диссертации, температура насыщения водяных паров составила $t_n = 46,9$ С. Результаты расчетного анализа в рамках предложенных моделей (9), (12), представлены на рисунке 13.

(12); C – постоянные интегрирования, значения которых определяются из начальных условий.

Результаты аналитического решения системы (9) для тестового примера при начальных условиях $F_0 = 0$; $t_{10} = 110$ °С; $t_{20} = 110$ °С; $t_{30} = 30$ °С приведены на рисунке 14 в виде графиков зависимости температуры теплоносителей от площади теплообмена. На этом же рисунке показаны результаты численного решения данной системы методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Сопоставление результатов численного и

аналитического решений системы (9) показывает их практическое совпадение, что подтверждает правильность полученных решений, с одной стороны, и позволяет использовать в дальнейшем любой из использованных методов для решения уравнений, с другой стороны.

Аналитическое решение задачи для отдельной трехпоточной ступени теплообмена как с учетом так и без учета фазового перехода в теплоносителях найдены в виде коэффициентов матриц \mathbf{B} уравнения (6), выражения для которых приведены в диссертации. Для **противоточного** характера движения теплоносителей сформулирована и решена задача охлаждения уходящих дымовых газов с учетом конденсации водяных паров в уходящих дымовых в контактных аппаратах. Сложность моделирования охлаждения влажных дымовых газов в контактных экономайзерах заключается в необходимости отслеживания параметров трех потоков теплоносителей: дымовых газов, водяных паров и воды. Моделирование усложняется и тем, что при снижении температуры смеси уходящих газов и водяных паров до точки росы начинается конденсация водяных паров. Возможное изменение положения границы начала фазового перехода при изменении нагрузки или режима работы установки существенно усложняет решение задачи. На рисунке 15 приведен эскиз и расчетная схема анализируемой установки. Согласно приведенной схеме, вода струями или в виде пленки стекает сверху вниз, а смесь дымовых газов и водяных паров подается снизу и движется навстречу охлаждающей воде.

Математическая модель трехпоточной ступени теплообмена без учета фазового перехода записывается аналогично (9) с учетом противоточного характера движения воды. Начало фазового перехода определяется снижением температуры водяного пара до температуры точки росы. После этого температура водяных паров фиксируется, а изменение состояния теплоносителя описывается степенью сухости или долей несконденсированного пара. Для этого случая модель ступени записывается в виде (12) с учетом противоточного характера движения охлаждающей воды. Для определения точки начала фазового перехода используется численный метод решения системы ДУ с проверкой на каждом шаге интегрирования температуры водяных паров. При условии достижения водяными парами температуры насыщения $t_1(F) = t_{n1}$, фиксируется координата начала фазового перехода $F = F^*$. Найденное значение координаты при проведении расчетов определяет условие перехода с модели (9) на модель (12). Результаты решения задачи двухступенчатого трехпоточного противоточного теплообмена при скользящей границе начала фазового перехода приведены на рисунках 16, 17 (код задачи на рисунке 1: 1.3.2.1) в виде зависимости температуры и степени сухости теплоносителей от площади теплообмена в противоточном теплообменнике.

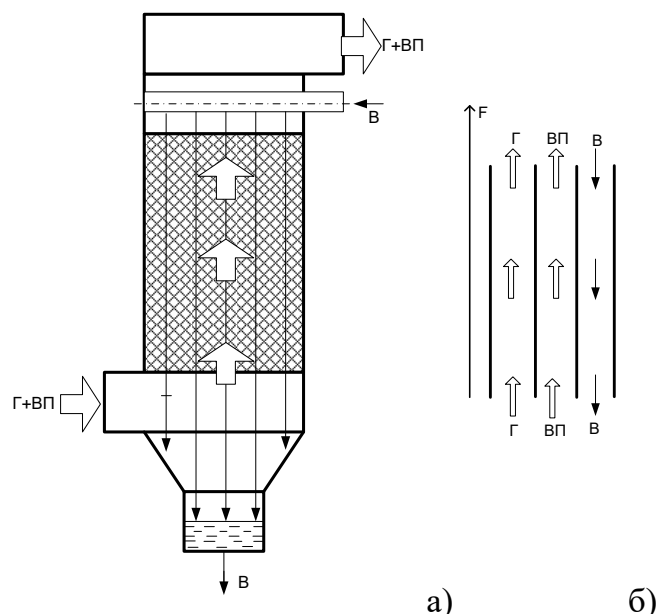


Рисунок 15. Эскиз (а) и расчетная схема (б) контактного экономайзера: Г – дымовые газы; ВП – водяные пары; В – вода

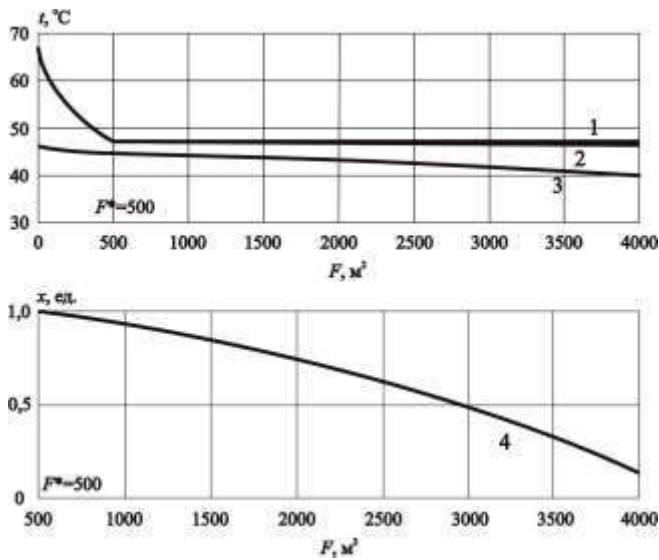


Рисунок 16. Изменение температуры и степени сухости теплоносителей в контактном противоточном теплообменнике от площади теплообмена, цифры на поле графика относятся к номеру теплоносителя: 1 – водяной пар; 2 – уходящие газы; 3 – охлаждающая вода; 4 – степень сухости водяных паров

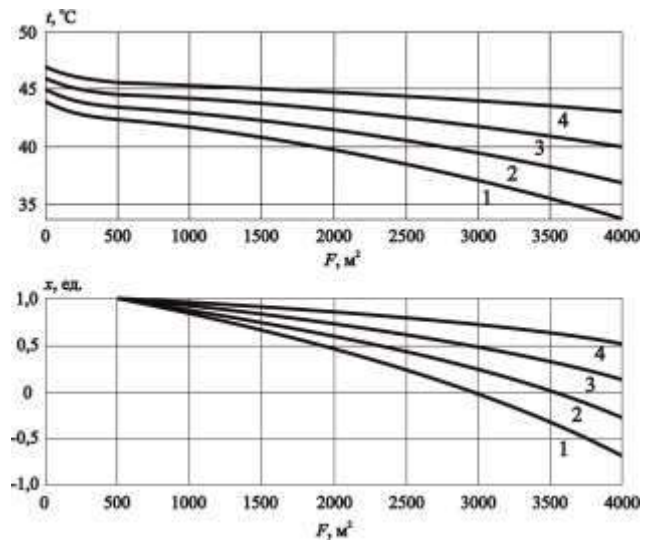


Рисунок 17. Изменение температуры охлаждающей воды и степени сухости пара вдоль поверхности теплообмена в контактном противоточном теплообменнике при различных выходных температурах охлаждающей воды: 1 - 44 °С; 2 - 45 °С; 3 - 46 °С; 4 - 47 °С

Постановка **обратной задачи** в многоступенчатых системах при наличии фазового перехода в одном или нескольких теплоносителях представляется наиболее интересным и сложным случаем. Как и при решении прямой задачи при проведении проектных расчетов часто неизвестно, в какой точке аппарата начинается фазовый переход. Для моделирования процессов со скользящей границей фазовых переходов следует использовать две модели, которые соответственно учитывают и не учитывают фазовый переход в теплоносителях.

Математическая модель ступени теплопередачи для решения обратной задачи, описывающая фазовый переход в первом теплоносителе, для рассматриваемой на рисунке 15 расчетной трехпоточной схемы теплообменного аппарата записывается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ x_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ -d_3 \\ \bar{x}_{10} \\ \bar{t}_{20} \\ \bar{t}_{30} \end{pmatrix} \quad (14)$$

где \bar{x}_{10} , \bar{t}_{20} , \bar{t}_{30} – численные значения известных параметров теплоносителей.

Для решения обратной задачи для двухступенчатой системы предлагается следующий алгоритм:

1. На первом этапе решается задача для одноступенчатой установки, в ходе решения которой определяется возможность достижения одним из теплоносителей температуры начала фазового перехода.

2. При выполнении условия наличия фазового перехода система условно делится на две ступени по границе начала фазового перехода. После этого формируется матрица

для расчета двухступенчатого аппарата: одна ступень описывается моделью без учета, а вторая ступень – с учетом фазового перехода в теплоносителе.

3. Расчет по п. 2 повторяется при варьировании границы между зонами до выполнения условия заданного расхождения значений температуры теплоносителя на границе между ступенями и температурой начала фазового перехода.

Разработанный метод решения обратной задачи теплопередачи для многоступенчатых теплообменных аппаратов со скользящей границей фазовых переходов теплоносителей служит основой для организации более эффективных процессов теплопередачи и диагностики состояния оборудования в технологических установках различного назначения при наличии фазового перехода с произвольным числом теплоносителей.

В четвертой главе диссертации продемонстрирована возможность использования методологии матричного моделирования для разделения **многокомпонентных** смесей сыпучих материалов в сложных технологических системах измельчения и для разделения смесей компонентов с различными физическими свойствами, сформулирована задача оптимизации процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых аппаратов.

Методология матричного моделирования используется для решения задачи моделирования многокомпонентных потоков в технологических системах измельчения (ТСИ), предназначенных для разделения смеси разнопрочных компонентов. В качестве модели гранулометрической характеристики компонентов использовано распределение частиц по их размерам. Матричная модель распределения массовых долей частиц по крупности представлена в виде матрицы-столбца или вектора-столбца $f = [f_j]$. Матричная модель для отдельных компонентов и ступеней ТСИ, связывающая вход и выход ступени, в обобщенном виде представлена следующим образом

$$f' = P \cdot f, \quad (15)$$

где P – квадратная матрица размера $m \times m$, ее вид для процессов измельчения и классификации представлен в диссертации; m – число наблюдаемых фракций.

Математическое описание произвольной ТСИ, состоящей из n элементов, для смеси разнородных компонентов получено на основе материальных фракционных балансов в виде

$$K \cdot F = -F_0, \quad (16)$$

где K является блочной матрицей размера $n \times n$ блоков или $mn \times mn$ элементов; F – блочная матрица-столбец размера $n \times 1$ блоков-столбцов или $mn \times 1$ элементов, описывающая гранулометрические составы материалов на входе во все элементы схемы; F_0 – блочная матрица такого же размера, описывающая гранулометрические составы внешних потоков материала, подаваемых в ТСИ. Матрица K может быть построена на основе универсального алгоритма для всех возможных вариантов схем, содержащих мельницы, классификаторы, узлы подвода сырья и вывода компонентов готового продукта. Этот алгоритм подробно представлен в диссертации.

В рамках диссертационной работы решается задача разделения смеси разнородных компонентов в многоступенчатой классифицирующей установке. Для идентификации разработанной модели на лабораторной установке проведены специальные экспериментальные исследования. По результатам опытных данных выполнена идентификация и проверка адекватности матричной модели (16), которая показала, что модель при достаточной простоте вычислений позволяет достоверно описывать фракционирование и

формирование массопотоков в многоступенчатой системе классификации для различных компонентов. Анализ полученных результатов показал, что среднее рассогласование экспериментальных и расчетных значений составило 4,6 относительных процентов, что следует признать удовлетворительным результатом, так как находится в диапазоне погрешности экспериментального определения гранулометрии порошков смеси и массопотоков в установке. Таким образом, модель (15)–(16) достоверно описывает экспериментальные результаты.

Следующий пример использования методологии матричной моделирования сложных теплообменных систем демонстрируется для многокомпонентных теплоносителей, компоненты которых различаются теплофизическими свойствами. В ряде промышленных технологий на основе различия теплофизических свойств, в частности, различия температуры кипения компонентов, реализуются процессы по их разделению путем перегонки или ректификации. В этом случае при расчете теплообменных процессов для получения чистых компонентов с допустимым содержанием примесей необходимо учитывать именно различия в их теплофизических свойствах.

Для решения задачи теплообмена с многокомпонентными теплоносителями при описании ректификации нефти предлагается использовать матричный подход к решению задачи, код которой согласно классификации на рисунке 1 записывается в виде «*k.m.n.0*». Многокомпонентные теплоносители в данном случае характеризуются массовым содержанием компонентов (фракций) с разными температурами кипения. Фракционный состав нефтепродуктов по истинным температурам кипения (ИТК) является одной из важных и широко используемых характеристик. При проведении ИТК анализа получается интегральная кривая вероятности $F(\theta)$, значение которой показывает массовую долю смеси, у которой температура кипения ниже θ . Дифференциальная плотность распределения фракций по температурам кипения может определяться дифференцированием интегральной функции распределения по температуре кипения фракций: $f(\theta) = dF/d\theta$.

Для разделения многокомпонентных смесей на отдельные фракции используются ректификационные колонны. Принцип действия и схема потоков в таких колоннах проиллюстрированы на рисунке 18.

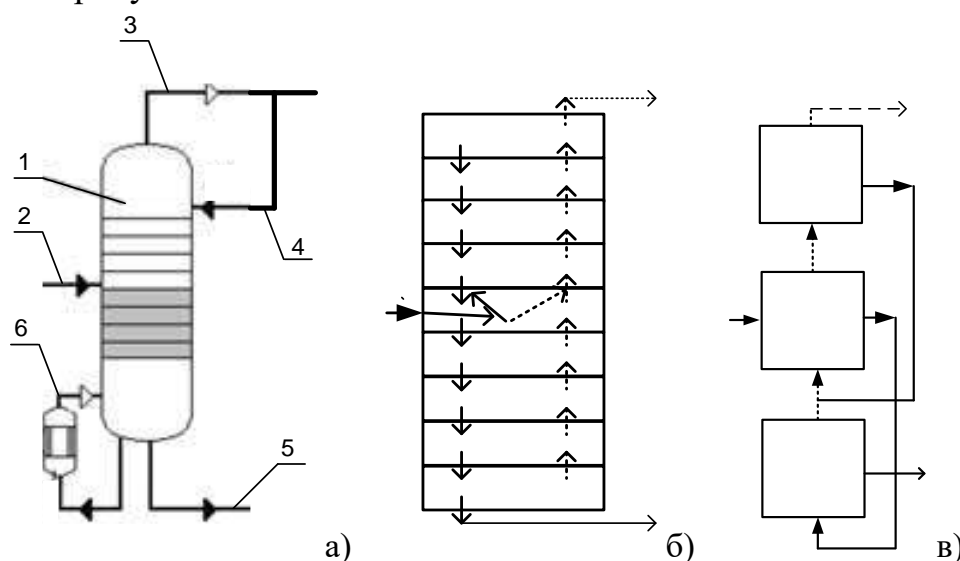


Рисунок 18. Ректификационная колонна (а), схема потоков (б), расчетная схема модели (в):

1 – ректификационная колонна; 2 – исходная смесь (питание); 3 – дистиллят; 4 – флегма; 5 – кубовый остаток; 6 – испаритель кубового остатка

Для моделирования тепломассообмена в системах с многокомпонентным теплоносителем предложен новый вероятностный подход, суть которого заключается в следующем. Для описания процесса ректификации в ступени предлагается использовать вероятностную оценку попадания фракции определенной температуры кипения в дистиллят. Считается, что в стационарном режиме фракционные потоки между ступенями стабилизируются, поэтому из ступени в газообразной форме отводится фиксированная доля каждого компонента. В качестве основной характеристики разделения в ступени предлагается использовать кривую разделения $\varphi(\theta)$, значение которой показывает вероятность перехода в дистиллят фракции с температурой кипения θ . Очевидно, что значение этой доли будет зависеть от той температуры, которая установилась в ступени, с одной стороны, и значения температуры кипения фракции, с другой. Для аппроксимации кривой разделения ректификации $\varphi(\theta)$ используется известная S-образная зависимость, которая удовлетворяет граничным значениям вероятностей: при нулевых значениях температуры вероятность приближается к единице, а при увеличении значений температуры – к нулю:

$$\varphi(\theta) = 1 / \left(1 + (\theta / \theta_0)^{k_s} \right), \quad (17)$$

где θ_0 – граничное или медианное значение температуры, при которой вероятность фракции перейти в дистиллят равна 0,5; k_s – параметр эффективности или острота разделения, которая характеризует качество разделения в ступени.

Основные расчетные формулы процесса ректификации для одной ступени по аналогии с процессом разделения продуктов при классификации записываются в матричном виде следующим образом:

$$f_3 = C \cdot f_1; \quad f_2 = (I - C) \cdot f_1, \quad (18)$$

где f_1, f_2, f_3 – матрицы размера $m \times 1$ фракционного состава питания ступени, кубового остатка и дистиллята соответственно; C – диагональная матрица размера $m \times m$, на главной диагонали которой находятся вероятности попадания соответствующих фракций в дистиллят согласно (17). Для многоступенчатых систем (код задачи $k.m.n.0$) разработаны формальные правила составления матричных расчетных зависимостей. Считается, что для каждой ступени кривые разделения ректификации известны и могут быть аппроксимированы выражением (17). Для системы из n элементов (ступеней), в каждом элементе которой происходит преобразование входного фракционного состава в выходной согласно (19), математическое описание строится на основании материальных фракционных балансов:

$$K \cdot F = -F_0, \quad (19)$$

где матрица $K = \{P_{ik}\}$ является блочной матрицей размера $n \times n$ блоков или $mn \times mn$ элементов; F – блочная матрица-столбец размера $n \times 1$ блоков-столбцов или $mn \times 1$ элементов, описывающая фракционные составы продуктов на входе во все n элементов схемы; F_0 – блочная матрица такого же размера, описывающая фракционные составы внешних продуктов, подаваемых в систему, P_{ik} – квадратная матрица размера $m \times m$, вид которой для перехода в дистиллят и остаток определяется согласно (19), k – номер элемента, i – номер элемента схемы, на вход которого подается материал с выхода k -го элемента. Если из k -го элемента материал не попадает в i -ый, то соответствующая матрица принимает нулевое значение.

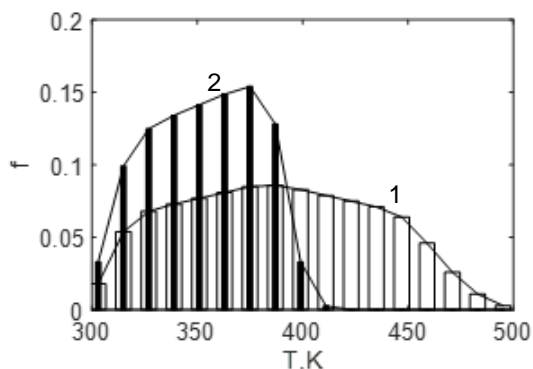


Рисунок 19. Результаты расчетного анализа ректификационной колонны, представленные в виде фракционного состава питания (1) и дистиллята (2)

целевой фракции в дистилляте, выкипающей в интервале температур 303-411 °К, составила 0,998. Анализ показывает, что полученные результаты, представленные на рисунке 19, достоверно описывают процесс ректификации для многоступенчатой установки.

Предложенный подход к моделированию системы ректификации (19) позволил сформулировать и решить задачу по оптимизации процессов теплообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью. В качестве целевой функции использована суммарная экономическая эффективность функционирования системы, которая определяется суммой произведений производительности системы по i -му готовому продукту B_i на его стоимостной показатель c_i :

$$W = \sum_i c_i B_i(\alpha, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \Rightarrow \max_{\mathbf{x}}, \quad (20)$$

где α – вектор известных параметров; \mathbf{x} – искомый вектор решений как совокупность искомого параметров; \mathbf{u} – управление (регулирование) процессом. В ходе решения оптимизационной задачи требуется найти при заданном комплексе условий α такое решение $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$, которое при управлении процессом \mathbf{u} обеспечивает экстремальное значение показателя эффективности W . В качестве искомого вектора решений предлагается набор параметров, который однозначно определяет структуру системы и режим ее работы. Искомый вектор \mathbf{x} представляется как совокупность двух векторов $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2]$, первый из которых \mathbf{x}_1 определяет структуру системы, а второй \mathbf{x}_2 – режим ее работы. В рамках проведенных исследований получено решение оптимизационной задачи для системы из двух многоступенчатых колонн. Подробный анализ полученных результатов приведен в диссертационной работе.

В пятой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований теплообменных систем, полученные с целью проведения идентификации, проверки адекватности и разработки эмпирического обеспечения предложенных моделей. Данные исследования проводились на конденсационных водогрейных котлах, паротурбинных установках и лабораторных классификаторах для разделения многокомпонентных смесей.

Режимно-наладочные испытания конденсационных котлов GEFEN MB 3.1-1000 и MB 3.1-530 проведены на котельной ООО «Нижегородтеплогаз» в городе Дзержинск Нижегородской области. Особенностью данных котлов является использование энергии, выделяющейся при конденсации водяного пара из уходящих газов. Проведённые

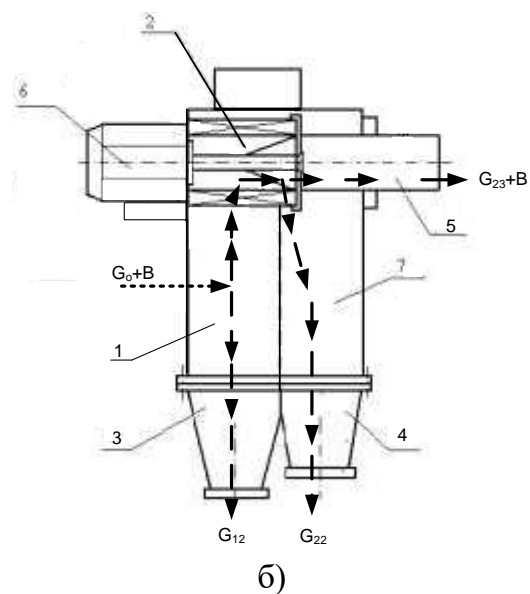
теплотехнические испытания на природном газе дали возможность идентифицировать многопоточную многоступенчатую модель котла и решить задачу по определению оптимальных значений коэффициентов избытка воздуха в топке с целью наилучшего использования теплоты сгорания топлива. В результате исследований были найдены оптимальные режимы работы каждого котла в рабочем диапазоне нагрузок и составлены их режимные карты. На основании расчётных и экспериментальных исследований разработаны и рекомендованы к внедрению мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности, ресурсосбережения и надёжности работы оборудования, обеспечившие увеличение срока их безаварийной эксплуатации.

Экспериментальные исследования турбоустановок Тп-115/125-130-1тп и ПТ-12-35/10М произведены на Йошкар-Олинской ТЭЦ-2 и КТЗ ПАО «Северсталь» соответственно. Испытания проведены по первой категории сложности с учетом требований руководящих документов. По полученным в ходе испытаний данным о теплотехнических характеристиках турбоустановок разработаны комплексы их нормативных энергетических характеристик, которые используются в ОАО «Северсталь» и на Йошкар-Олинской ТЭЦ-2 при оценке фактического уровня тепловой экономичности турбоустановок.

Исследования по разделению многокомпонентных смесей сыпучих материалов проводились в рамках международного договора о сотрудничестве с Ченстоховским политехническим университетом (Польша) на специальной лабораторной установке с двухступенчатым аэродинамическим классификатором. Фотография экспериментальной установки и эскиз двухступенчатого классификатора представлены на рисунке 20. Исходная смесь (G_0) с воздухом (В) подается в гравитационную ступень классификатора 1, после которой мелкий продукт разделения направляется в центробежную ступень 2, а грубый продукт (G_{12}) – в бункер 3. Грубый продукт второй ступени классификации (G_{22}) направляется в бункер 4, а мелкий продукт (G_{23}) выносится воздухом из аппарата через патрубок 5. Для вращения ротора центробежной ступени установлен электрический двигатель 6. Эвакуация крупного продукта из второй ступени осуществляется через патрубок 7.

В ходе проведения серии экспериментов исследовалось влияние содержания целевого компонента в смеси на результаты разделения продуктов.

Рисунок 20. Фотография экспериментальной установки (а) и эскиз двухступенчатого классификатора (б): 1 – гравитационная ступень разделения; 2 – центробежная ступень классификации; 3–бункер возврата гравитационной ступени; 4– бункер возврата центробежной ступени; 5–выход мелкодисперсного материала центробежной ступени, 6 – электрический двигатель; 7 – патрубок возврата второй ступени



В шестой главе представлено практическое использование результатов работы, которое проводилось по следующим направлениям: разработка методов расчета и программных комплексов их компьютерной поддержки; использование разработанных методов расчета при проектировании и совершенствовании энергетических установок и систем, для проведения наладки и разработки мероприятий по повышению эффективности функционирования энергетических систем на тепловых электрических станциях и в учебном процессе.

Предложенная методология матричной формализации была с успехом использована при моделировании и расчете многопоточной многоступенчатой установки мгновенного вскипания (МИУ) и башенной градирни (БГ). Результаты исследования и оптимизации градирни БГ 1600 внедрены на Петрозаводской теплоэлектростанции (ПТЭС).

Для проведения технико-экономической оптимизации Сызранской ТЭС были разработаны расчетные математические модели и средства их компьютерной поддержки для условий эксплуатации паротурбинных и парогазовых установок Сызранской ТЭС. С помощью предложенного метода решения обратных задач при выполнении проектных расчетов определены конструктивные и режимные параметры теплообменных аппаратов, которые обеспечивают наиболее эффективную работу теплофикационной установки ТЭС после реконструкции.

В результате технико-экономической оптимизации Сызранской ТЭС был определен комплекс мероприятий, направленных на повышение технико-экономической эффективности работы оборудования Сызранской ТЭС и системы централизованного теплоснабжения жилищно-коммунального хозяйства и промышленных потребителей в городе Сызрань.

При моделировании, расчете и оптимизации энергетической системы Сакмарской ТЭС на основе полученных моделей разработаны и актуализированы энергетические характеристики турбоагрегатов. С использованием полученного математического описания оборудования Сакмарской ТЭС для покрытия тепловой и электрической нагрузок определен оптимальный состав основного и вспомогательного оборудования, разработаны мероприятия по повышению эффективности производства тепловой и электрической энергии на электростанции и улучшению её технико-экономических показателей. Важным результатом выполненной научно-исследовательской работы и технико-экономической оптимизации теплового узла города Оренбурга является формирование комплекса мероприятий по повышению энергоэффективности функционирования энергетических систем Сакмарской ТЭС и других объектов централизованного теплоснабжения в г. Оренбург, которые реализуются в настоящее время филиалом «Оренбургский» ПАО «Т Плюс».

Матричные математические модели энергетического оборудования и средства их компьютерной поддержки позволили провести актуализацию нормативных энергетических характеристик на основе массива сбалансированных данных по измеряемым параметрам за длительный период эксплуатации и определить ряд не измеряемых параметров работы оборудования на ПГУ ТЭС «Международная» ООО «Ситиэнерго».

Результаты работы внедрены в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны научные основы методологии матричной формализации описания процессов формирования энерго- и массопотоков в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических установках и комплексах. Применение методологии матричной формализации позволило в рамках единого подхода для различных технологий проводить расчетный анализ и оптимизацию многопоточных многоступенчатых и многокомпонентных систем с целью определения условий их эффективного функционирования.

2. В рамках методологии матричной формализации разработана модель паротурбинной установки и единый подход к математическому описанию ТЭС как многопоточной энергетической системы с учетом модели подсистемы конденсационной установки; получены и проанализированы решения модели с целью построения энергетических характеристик теплофикационного турбоагрегата, выполнено сравнение результатов расчета с энергетическими характеристиками действующего турбоагрегата, показана достоверность и обоснованность предложенного подхода. В результате учета в расчетной модели паротурбинной установки подсистемы конденсационной установки удалось уменьшить средние относительные погрешности с 10-15 % до 0,6 % .

3. Разработана математическая модель многопоточных многоступенчатых теплообменных систем, каждая ступень которых может иметь произвольное число входных и выходных потоков. Порядок использования и возможности предложенного подхода продемонстрированы на примере четырехступенчатой трехпоточной системы теплообменных аппаратов, получены и проанализированы решения модели.

4. Получено аналитическое решение для четырехпоточного теплообменника для восьми возможных вариантов схем движения теплоносителей. Найдено оптимальное сочетание направлений движения потоков. 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, третий и четвертый в одном направлении (прямоток).

5. В рамках проведенных исследований сформулирована обратная задача теплопередачи в системе одноступенчатых и многоступенчатых теплообменных аппаратов как с учетом так и без учета фазового перехода в теплоносителе; получено ее решение для системы из двух и трех теплоносителей, проведен анализ полученных результатов.

6. Получены экспериментальные данные по многоступенчатой классификации смеси разнородных компонентов на лабораторной установке, на основе которых проведена идентификация и проверка адекватности моделей. Сопоставление результатов проверки адекватности моделей показало, что модель с определением параметров идентификации для каждого компонента при достаточной простоте вычислений позволяет достоверно описывать фракционирование и формирование массопотоков в многоступенчатой системе классификации для смеси разнородных компонентов. Полученные результаты могут быть также использованы в энергетической, химической и других отраслях промышленности для повышения эффективности ресурсо- и энерго сберегающих технологий при получении продуктов с допустимым содержанием примесей.

7. Сформулирована задача оптимизации процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представ-

лен многокомпонентной смесью; получено ее решение для системы из двух ректификационных колонн, проведен анализ полученных результатов. Представленный подход позволяет исследовать и оптимизировать многопоточные многоступенчатые установки, варьируя число ступеней, распределение температур по ступеням.

8. Программный комплекс «Расчет энергетических характеристик теплофикационной паровой турбины с учетом характеристик экономичности отсеков ее проточной части» внедрен в практику планирования режимов работы оборудования Сакмарской ТЭЦ и использован при оптимизации покрытия перспективных тепловых нагрузок теплового узла города Оренбурга. Программный комплекс «Решение обратной задачи для многопоточных многоступенчатых систем» тепломассообмена внедрен на Сызранской ТЭЦ, Сакмарской ТЭЦ, в производственный процесс ПГУ-ТЭС «Международная» ООО «Ситиэнерго» (г. Москва) для формирования комплекса мероприятий, направленных на повышение технико-экономической эффективности работы оборудования, внедрен. Разработанное матричное описание и метод расчета многопоточного многокомпонентного процесса тепломассообмена в оросительной градирне № 2 Петропавловского ТЭЦ позволил определить и реализовать наиболее эффективные режимы работы установки. Программные комплексы по расчету энергетических характеристик и решению обратных задач тепломассообмена для многоступенчатых систем внедрены в учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета. Результаты исследований процессов тепломассообмена в многоступенчатых многопоточных системах используются в промышленных и научно-исследовательских проектах, реализуемых Ченстоховским технологическим университетом (Польша, Ченстохов). В рамках матричной методологии разработаны и нашли практическое применение метод расчета многопоточной многоступенчатой установки мгновенного вскипания (МИУ) и метод расчета башенной градирни (БГ). Суммарный экономический эффект от внедрения предложенных технических решений на энергообъектах России, подтвержденный актами внедрения, составляет 38 794 т у.т. в год, что в ценах 2024 года эквивалентно экономическому эффекту в размере 232,261 млн. руб. с НДС в год при сжигании природного газа.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Перспективным направлением развития методологии матричной формализации математического моделирования является разработка моделей, методов расчета и компьютерных систем по диагностике состояния оборудования энергетических комплексов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Барочкин, А.Е.** Моделирование тепломассопередачи в многофазной среде конденсатора турбины / **А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков, Г.В. Ледуховский** // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – № 1. – С. 52-56.
2. **Зимин, А.П.** Разработка методики совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета в системе расчета показателей тепловой экономичности оборудования ПГУ-ТЭС / **А.П. Зимин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, С.Д. Горшенин, В.А. Буданов, А.Е. Барочкин** // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 2. – С. 5-12.
3. **Барочкин, А.Е.** Моделирование и расчет многопоточных теплообменных аппаратов / **А.Е. Барочкин, В. П. Жуков** // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 3. – С. 70-75.

4. Касаткин, К.А. Разработка математической модели многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях / К.А. Касаткин, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г. Г. Орлов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 5. – С. 61-67.
5. Барочкин, А.Е. Матричное представление модели тепловой схемы электрической станции / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, Г. В. Ледуховский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 6. – С. 66-72.
6. Жуков, В.П. Моделирование и расчет многопоточных многоступенчатых систем теплообменных аппаратов / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, Н. Otwinowski // Химические волокна. – 2019. – № 4. – С. 84-87.
7. Бубнов, К.Н. Учет эффективности отсеков проточной части турбоустановок при расчетном анализе их энергетических характеристик / К.Н. Бубнов, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. – № 3. – С. 62-68.
8. Барочкин, А.Е. Матричная формализация расчета и анализ многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов со сложной конфигурацией потоков / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, К.А. Касаткин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. – № 1. – С. 70-76.
9. Барочкин, А.Е. Матричный метод расчета сложных тепломассообменных систем с многокомпонентными теплоносителями / А.Е. Барочкин, В. П. Жуков, М. С. Шумилова, Е.В. Барочкин, А.Н. Беляков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – № 1. – С. 59-68.
10. Бубнов, К.Н. Методика расчета энергетических характеристик теплофикационной турбины с учетом экономичности части низкого давления / К. Н. Бубнов, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г. В. Ледуховский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – № 2. – С. 5-13.
11. Барочкин, А.Е. Оптимизация структуры и режима работы сложных тепломассообменных систем с многокомпонентными теплоносителями / А.Е. Барочкин, В. П. Жуков, М.С. Шумилова, Е.В. Барочкин, А.Н. Беляков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – № 4. – С. 55-63.
12. Барочкин, А.Е. Идентификация модели многоступенчатой классификации смеси разнородных компонентов / А.Е. Барочкин, А.Н. Беляков, Х. Отвиновски, Т. Wylecial, Е.В. Барочкин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – № 5. – С. 56-63.
13. Барочкин, А.Е. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в контактных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях / А.Е. Барочкин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2021. – № 5. – С. 68-75.
14. Жуков, В.П. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, М.С. Боброва, А.Н. Беляков, С.И. Шувалов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2021. – № 2. – С. 62-69.
15. Жуков, В.П. Моделирование и расчет процесса теплопередачи в конденсационном котле / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 2(136). – С. 43-48.
16. Жуков, В.П. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин, А.Н. Беляков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 3. – С. 57-63.
17. Жуков, В.П. Анализ и совершенствование методов решения дискретных моделей уравнения Больцмана / В. П. Жуков, А. Е. Барочкин, А. Н. Беляков, О. В. Сизова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2021. – № 6. – С. 62-69.
18. Барочкин А.Е. Моделирование капельного уноса в многоступенчатых испарительных установках мгновенного вскипания / В.П. Жуков, И.А. Кокулин, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин // Теплоэнергетика, 2023. – № 11. – С. 136-143.
19. Барочкин А.Е. Математическое моделирование, оптимизация структуры и режима работы оборудования конденсационных котлов / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, А.Н. Беляков,

Е.В. Барочкин, Е.А. Шуина, А.К. Соколов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2023. – № 6. – С. 82-87.

20. **Барочкин А.Е.** Методология матричного моделирования многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических комплексов/ А.Е. Барочкин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2024. – №. 3. – С. 64-70

Статьи в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus

21. Zhukov, V. P. Simulation and Calculation of Multi-Flow, Multistage Systems of Heat Exchangers / V.P. Zhukov, **A.E. Barochkin**, N. Otwinowski // Fibre Chemistry. – 2019. – Vol. 51. – No 4. – P. 303-307.
22. Urbaniak, D. Application of the laws of physical statistics to modelling of the jet milling process / D. Urbaniak, T., V.P. Zhukov, Wyleciał, H. Otwinowski, **A.E. Barochkin**, R. Wyczółkowski // Acta Physica Polonica A. – 2020. – Vol. 138. – No 2. – P. 156-158.
23. Wyleciał, T. Conserving heat consumption by modeling and optimizing efficiency of complex heat exchanger systems / T. Wyleciał, D. Urbaniak, **A.E. Barochkin**, V.P. Zhukov, N.R. Leznova // E3S Web of Conferences : 6th International Conference - Renewable Energy Sources, ICoRES 2019, Krynica, 12–14 июня 2019 года. – Krynica: EDP Sciences, 2020. – P. 1-7.
24. **Barochkin, A.E.** Matrix Method for Modelling of Multicomponent and Multistream Energy Systems and Installations of Thermal Power Plants / **A.E. Barochkin** // Problems of the Regional Energetics. – 2021. – Vol. 52. – No4. – P. 59–67.
25. Urbaniak, D. Application of modified thermodynamic grinding theory in jet mill / D. Urbaniak, H. Otwinowski, J. Boryca, T. Wyleciał, V.P. Zhukov, **A.Y. Barochkin** // Acta Physica Polonica A. – 2021. – Vol. 139. – No 5. – P. 529-531.
26. Urbaniak, D. Research on the grinding energy density in a jet mill / D.Urbaniak, H.Otwinowski, T. Wyleciał, J. Boryca, V.P. Zhukov, **A.Y. Barochkin** // Materials. – 2021. – Vol. 14. – No 8. – P.1-9.
27. **Barochkin, A.E.** Matrix approach to solve the inverse problems of heat transfer / **A.E. Barochkin**, V. Mizonov, V. Zhukov, E. Barochkin // JP Journal of Heat and Mass Transfer, 2022. – Vol. 25. – p. 127-135.
28. **Barochkin, A.** Solution of the inverse problem of heat exchange with the moving boundary of the phase transformation in countercurrent devices / **A.E. Barochkin**, V.P. Zhukov, A.N. Belyakov, E.A. Shuina, E.V. Barochkin // JP Journal of Heat and Mass Transfer, 2023. – Vol. 34. – p. 127-137.
29. Zhukov, V.P. Simulation of Droplet Entrainment in Multistage Flash Evaporating Units / V. P. Zhukov, I. A. Kokulin, V. N. Vinogradov, **A. E. Barochkin** // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70, No. 11. – P. 957-963.

Монографии и учебные пособия

30. Жуков, В.П. Матричное моделирование технологических систем: Учебное пособие / В.П. Жуков, А.Н. Беляков, **А.Е. Барочкин**. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – 88 с. – ISBN 978-5-00062-398-5.
31. Жуков, В.П. Математические модели современного естествознания: Учебное пособие / В.П. Жуков, А.Н. Беляков, **А.Е. Барочкин**. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. – 124 с. – ISBN 978-5-00062-490-6.
32. Барочкин, Е.В. Технологии производства энергии на ТЭС и АЭС: Учебное пособие / Е.В. Барочкин, С.А. Панков, **А.Е. Барочкин**. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. – 569 с. – ISBN 978-5-00062-486-9.
33. Барочкин, Е.В. Котельные установки: Учебное пособие / Е.В. Барочкин, В.Н. Виноградов, **А.Е. Барочкин**. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 440 с. – ISBN 978-5-9729-0691-8.
34. Барочкин, Е.В. Основы проектирования ТЭС: Учебное пособие / Е.В. Барочкин, **А.Е. Барочкин**. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. – 159 с. – ISBN 978-5-00062-452-4.
35. Барочкин, Е.В. Общая энергетика: Учебное пособие / Е.В. Барочкин, М.Ю. Зорин, **А.Е. Барочкин**. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 316 с. – ISBN 978-5-9729-0759-5.

36. Михеев, Г. Г. Котельные установки и парогенераторы: курс лекций: Учебное пособие / Г. Г. Михеев, **А. Е. Барочкин**, П. Г. Михеев. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – 260 с. – ISBN 978-5-00062-532-3.
37. Жуков, В.П. Анализ многопоточных тепломассообменных систем: Монография / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, **А.Е. Барочкин**. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 160 с. – ISBN 978-5-9729-1870-6

Статьи в других изданиях

38. **Барочкин, А.Е.** Матричное моделирование и оптимизация паротурбинных установок / **А.Е. Барочкин** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 6(140). – С. 52-59.
39. Жуков, В.П. Матричное моделирование сложных систем / В.П. Жуков, А.Н. Беляков, **А.Е. Барочкин** // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2023. – Т. 25-1. – С. 177-192.
40. Жуков, В.П. Об одном подходе к моделированию многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов со сложной конфигурацией потоков / В.П. Жуков, **А.Е. Барочкин**, К. А. Касаткин // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2019. – Т. 12-2. – С. 138-141.
41. **Барочкин, А.Е.** Модифицированный метод решения уравнения Больцмана / **А.Е. Барочкин**, В. П. Жуков, А. Н. Беляков, М. Д. Фомичев // Математические методы в технологиях и технике, 2022. – № 8. – С. 7-11.
42. **Барочкин, А.Е.** Анализ эффективности структуры потоков в многопоточных теплообменных аппаратах / **А. Е. Барочкин**, В. П. Жуков // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2016. – № 8(90). – С. 37-38.

Тезисы и полные тексты докладов конференций

43. Жуков, В.П. Моделирование тепломассопередачи в многофазной среде на основе уравнения Больцмана / В.П. Жуков, **А.Е. Барочкин** // Состояние и перспективы развития электротехнологии. XVII Бенардосовские чтения : Материалы Международной научно-технической конференции, Иваново, 29–31 мая 2013 года / Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2013. – С. 344-345.
44. **Барочкин, А.Е.** Моделирование и анализ эффективности теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах / **А.Е. Барочкин**, В.П. Жуков, Н.Р. Лезнова // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения) : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса, Иваново, 31 мая – 02 2017 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2017. – С. 294-297.
45. Жуков, В.П. Расчет и совершенствование многопоточных теплообменных аппаратов со сложной структурой потоков / В. П. Жуков, **А.Е. Барочкин**, Н. Otwinowski // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): материалы международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции, Иваново, 29–31 мая 2019 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 335-338.
46. Жуков, В.П. Матричная модель многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов со сложной конфигурацией потоков / В.П. Жуков, **А.Е. Барочкин**, Н. Otwinowski // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование : сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук», Москва, 29 октября – 01 ноября 2019 года. – Москва: ФГБОУ ВО "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2019. – С. 28-30.
47. Жуков, В.П. Матричный метод анализа тепломассообменных процессов в гетерогенных системах / В.П. Жуков, **А.Е. Барочкин**, М.С. Шумилова, Н. Otwinowski // 19-я международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям : Сборник научных трудов, Иваново,

- 08–11 сентября 2020 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – С. 144-149.
48. Жуков, В.П. Расчет сложных теплообменных систем с многокомпонентными теплоносителями / В.П. Жуков, **А.Е. Барочкин**, М.С. Шумилова // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ - 2020: Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Академика А.В. Лыкова, Москва, 13–15 октября 2020 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2020. – С. 134-137.
49. **Барочкин, А.Е.** Расчетный анализ многопоточного теплообмена с учетом фазового перехода в теплоносителях на примере контактного экономайзера / **А.Е. Барочкин**, В.П. Жуков, Н. Otwinowski // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения) : Материалы международной научно-технической конференции, Иваново, 02–04 июня 2021 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. – С. 323-326.
50. Беляков, А.Н. Методика определения коэффициентов переноса на основе решения уравнения Больцмана / А. Н. Беляков, В.П. Жуков, **А.Е. Барочкин** // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения) : Материалы международной научно-технической конференции, Иваново, 02–04 июня 2021 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. – С. 332-335.
51. Жуков, В. П. Решение обратной задачи теплообмена в многопоточных системах / В.П. Жуков, **А.Е. Барочкин**, М. Д. Фомичев // XX юбилейная Всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям : Сборник научных трудов , Плес, 01–30 сентября 2022 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – С. 162-165.
52. **Барочкин, А.Е.** Математическое моделирование и расчет конденсационного котла / **А.Е. Барочкин** // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : Материалы VII Национальной научно-практической конференции, Казань, 09–10 декабря 2021 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 278-280.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

53. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615258 РФ. Расчет энергетических характеристик теплофикационной паровой турбины с учетом характеристик экономичности отсеков ее проточной части: № 2022614039: заявл. 21.03.2022: опубл. 30.03.2022 / К. Н. Бубнов, В. П. Жуков, **А. Е. Барочкин** ; заявитель ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
54. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615259 РФ. Решение обратной задачи для многопоточных многоступенчатых систем: № 2022614041: заявл. 21.03.2022: опубл. 30.03.2022 / В. П. Жуков, **А. Е. Барочкин**; заявитель ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
55. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682290 РФ. Расчет процесса теплообмена в башенных градирнях с учетом фазового перехода в теплоносителях: № 2022681677: заявл. 14.11.2022: опубл. 21.11.2022 / М. В. Фомичев, В. П. Жуков, **А. Е. Барочкин**; заявитель ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

БАРОЧКИН Алексей Евгеньевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МНОГОПОТОЧНЫХ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УСТАНОВОК

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

Подписано в печать 03.07.2024 г. Формат 60x84^{1/16}. Печать плоская. Усл. печ. л. 2,09. Тираж 100 экз. Заказ № 121.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ