

ОТЗЫВ

официального оппонента Дмитриева Андрея Владимировича
на диссертационную работу Барочкина Алексея Евгеньевича
на тему «Моделирование, расчет и оптимизация многокомпонентных
многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.4.5– Энергетические системы и комплексы

Актуальность темы диссертационного исследования

Развитие и совершенствование энергосберегающих технологий в системах теплообмена затруднено из-за недостаточного количества методов расчёта и специализированных компьютерных программ. Традиционно задачи теплопередачи решаются для систем с двумя потоками, но в реальности часто встречаются системы с тремя и более потоками. Каждый поток энергоносителя может состоять из нескольких компонентов с разными физическими свойствами или фазовыми состояниями.

Существуют решения для многопоточных теплообменников с однокомпонентными теплоносителями, но в энергетике и промышленности широко используются многокомпонентные теплоносители с различными теплофизическими свойствами. Модели многопоточных теплообменников учитывают фазовые переходы, но границы начала этих переходов могут быть неизвестны. Тепловая схема ТЭС рассматривается как многопоточная система с обменом потоками разных видов энергии.

Для энергетики и смежных отраслей промышленности актуально развитие моделирования многопоточных теплообменных аппаратов, разработка единых подходов и методов расчёта для эффективного разделения компонентов.

Научная новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

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.

Новизна каждого из указанных пунктов, а также полученных результатов и выводов является обоснованной.

Кроме того, стоит отметить соответствие диссертационной работы пунктам паспорта научной специальности 2.4.5 Энергетические системы и комплексы, а именно: 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».

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

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 сходимостью численных и аналитических решений.

Значимость для производства полученных автором результатов

Практическая значимость работы состоит в разработке программного комплекса (ПК) «Решение обратной задачи для многопоточных многоступенчатых систем», применение которого позволяет осуществлять выбор конструкции аппаратов и параметров теплоносителей для эффективной работы системы, ПК «Расчет энергетических характеристик теплофикационной паровой турбины с учетом характеристик экономичности отсеков ее проточной части», обеспечивающего актуализацию энергетических характеристик на основе массива данных по измеряемым параметрам, ПК «Расчет процесса теплообмена в башенных градирнях с учетом фазового перехода в теплоносителях», предназначенный для расчёта технологических параметров процессов тепломассобмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях.

Кроме того, практическая значимость заключается в 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, а также 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.

Структура 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.

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулирована научная новизна, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации изучаются многокомпонентные, многопоточные и многоступенчатые теплообменные системы, их классификация, конструктивные и режимные особенности, их роль в энергетике и смежных отраслях. Анализируются существующие модели и методы расчёта, преимущества и области применения, критерии эффективности, оптимизационные задачи и методы их решения. Рассматриваются подходы к моделированию многокомпонентных систем на примерах фракционирования порошков и разделения смесей жидкостей с разными свойствами. Формулируются задачи исследования на основе анализа литературных данных.

Во второй главе представлены научные основы и методология матричного моделирования многоступенчатых и многопоточных тепломассообменных систем на основе решения различных задач. В качестве примера использована паротурбинная установка, где показана методология матричного моделирования и построения энергетических характеристик с учётом модели конденсатора турбины. Описана матричная математическая модель многопоточных многоступенчатых теплообменных систем с произвольным количеством входных и выходных потоков в каждой ступени. Рассмотрены примеры решения задач контактного охлаждения уходящих дымовых газов, проведён расчётный анализ четырёхступенчатой трёхпоточной системы теплообменных аппаратов, представлено решение обратной задачи теплопередачи для двухпоточных и трёхпоточных теплообменных аппаратов, а также проанализирована эффективность структуры потоков в четырёхпоточных теплообменных аппаратах.

Третья глава диссертации посвящена изучению математических моделей многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов с учётом фазового перехода теплоносителей. Рассмотрена схема трехпоточного прямоточного теплообменного аппарата. Составлена модель процесса с учетом фазового перехода в первом теплоносителе. Получены зависимости температур и степени сухости теплоносителя от площади теплообмена с учетом фазового перехода. Для противоточного движения теплоносителей была поставлена и решена задача снижения температуры уходящих дымовых газов с учётом конденсации водяного пара в контактных устройствах. Предложен алгоритм для решения обратной задачи для двухступенчатой системы.

В четвертой главе решаются задачи матричного математического

моделирования для анализа тепломассообмена в сложных системах, где присутствуют многокомпонентные потоки смесей фракций различных сыпучих материалов. Также рассматриваются задачи матричного моделирования процесса разделения смеси компонентов с различной температурой кипения для оценки качества конечного продукта. Кроме того, в этой главе сформулирована задача оптимизации процессов тепломассообмена в многоступенчатых аппаратах.

В **пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований тепломассообменных систем, проведенных с целью идентификации, проверки адекватности и создания эмпирической базы для предложенных моделей. Эти исследования были выполнены на конденсационных водогрейных котлах, паротурбинных установках и лабораторных классификаторах для разделения многокомпонентных смесей. Подробно описана экспериментальная установка для исследования процесса фракционирования с использованием двухступенчатого классификатора.

В **шестой главе** представлены направления практического использования результатов работы. Разработаны методы расчёта многокомпонентных многопоточных многоступенчатых систем и их программная реализация. Также были предложены мероприятия по повышению эффективности эксплуатации конденсационных котлов ООО «Нижегородтеплогаз». Кроме того, были проведены технико-экономические обоснования оптимизации оборудования и режимов работы Сызранской и Сакмарской ТЭЦ. Описано протекание процесса тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения Петрозаводской ТЭЦ и в многоступенчатых испарительных установках ООО «Реиннольц». Разработаны оптимальные энергетические характеристики ТЭЦ с учётом распределения охлаждающей воды между конденсаторами турбоагрегатов. Проведены научно-технические исследования ПГУ ТЭС «Международная».

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы на Сакмарской ТЭЦ (г. Оренбург), Петрозаводской ТЭЦ (г. Петрозаводск), Орской ТЭЦ (г. Орск). Кроме того, результаты могут быть использованы в учебном процессе при изучении дисциплин «Математическое моделирование» и «Математические модели современного естествознания».

Замечания и вопросы по диссертации

1. Каким образом определялся коэффициент теплопередачи?
2. Почему в ходе численного расчёта использовались значения температур с точностью до двух знаков после запятой (стр. 90)?
3. На странице 98 указаны значения температур, которые намного ниже нуля. Хотелось бы узнать, позволяют ли разработанные методы расчётов учитывать процессы, в которых вещества могут переходить из жидкого состояния в твёрдое?
4. На странице 109 сказано, что теплота конденсации значительно больше теплоёмкости воды. Как проводилось это сравнение?
5. На рисунке 3.5 значение температуры t_2 изменяется менее чем на 0,05 градуса Цельсия. Возможно, его можно было бы считать постоянным?
6. На схеме ректификационной установки отсутствует теплообменник для конденсации паров. При моделировании разделения смеси компонентов учитывались ли процессы теплообмена, протекающие в этом теплообменнике?
7. Что подразумевается под выражением «кривые разделения ректификации»?
8. Как связаны предложенные варианты развития, описанные в технико-экономическом обосновании оптимизации оборудования и режимов работы Сызранской ТЭЦ, с разработанными математическими моделями?

В работе встречаются неточности в формулировках, которые не влияют на суть изложения, а также на основные результаты и положения диссертации.

Заключение по работе

Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и содержит новые научные результаты в области математического моделирования энергетических систем и установок.

Результаты работы прошли апробацию на конференциях различного уровня и были опубликованы в журналах из перечня ВАК и в изданиях, индексируемых в базе Scopus.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Барочкина Алексея Евгеньевича «Моделирование, расчет и оптимизация многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.5

«Энергетические системы и комплексы», является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработан комплекс новых научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны за счет экономии материальных ресурсов, органического топлива и охраны окружающей среды.

Диссертационная работа «Моделирование, расчет и оптимизация многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок» соответствует критериям, установленным требованиями пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), а ее автор Барочкин Алексей Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» института теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», д.т.н., доцент

Андрей Владимирович
Дмитриев

«11» 09 2024 г.

Докторская диссертация Дмитриева А.В. защищена по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (2012 г.).

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51;
тел.: 8 (843) 519-42-02, 562-43-25
e-mail: ieremiada@gmail.com

Подпись заведующего кафедрой автоматизация технологических процессов и производств ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» доктора технических наук, доцента Дмитриева Андрея Владимировича заверяю:



Лаб. Брахманова В.А.

