



Публичное акционерное общество энергетики  
и электрификации «Мосэнерго»  
(ПАО «Мосэнерго»)

Проспект Вернадского, д. 101, корп. 3, г. Москва,  
Российская Федерация, 119526

тел.: +7 (495) 957-19-57, факс +7 (495) 957-32-00

e-mail: mosenergo@mosenergo.ru, www.mosenergo.ru

ОКПО 00102798, ОГРН 1027700302420, ИНН 7705035012, КПП 997650001

№ 20.09.2024 2 № Б/н

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## УТВЕРЖДАЮ

Заместитель управляющего дирек-  
тора – главный инженер

Публичное акционерное общество  
энергетики и электрификации

«Мосэнерго», г. Москва,

Сергей Николаевич Ленёв 

« 19 » сентября 2024 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации

публичного акционерного общества энергетики и электрификации

«Мосэнерго», г. Москва

на диссертационную работу **Барочкина Алексея Евгеньевича**

**«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 (технические  
науки)

### **Актуальность темы диссертационной работы.**

Нерациональное использование энергоресурсов, особенно газа, угля, ма-  
зута, оценивается в 500 миллионов тонн условного топлива. Это порядка 2/5  
всего объема потребления первичных энергетических ресурсов. Сложные теп-  
лоэнергетические комплексы во многом определяют эффективность и надеж-  
ность энергетических, металлургических и химических производств. Модели-  
рование и анализ этих комплексов как на стадиях проектирования, так и при  
эксплуатации приобретает с точки зрения энергосбережения особую актуаль-  
ность в условиях роста мировых цен на энергоносители. Эффективная эксплу-  
атация оборудования, работающего при постоянных и переменных нагрузках,  
определяет, в частности, конкурентоспособность энергетических компаний на  
рынке тепловой и электрической энергии. Именно это является причиной  
обостренного внимания руководителей компаний к методикам и компьютер-  
ным программам выбора оптимальных схем включения и оптимальных режи-  
мов работы оборудования. Таким образом, актуальность темы диссертации,  
направленной на разработку математических моделей, расчет и оптимизацию

сложных систем теплообменных аппаратов с целью повышения их эффективности, не вызывает сомнения.

### **Структура и основное содержание диссертационной работы.**

Диссертация изложена на 313 страницах и состоит из введения, шести глав, перечня основных результатов работы, списка литературы (352 наименования) и двух приложений.

*Во введении* обоснована актуальность выбранной темы, приведены сведения о степени разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследований, степень достоверности результатов диссертации, приведены положения, выносимые на защиту, информация о реализации и апробации результатов работы, количестве публикаций автора по теме диссертации, личном вкладе автора и структуре работы.

*Первая глава* диссертационной работы посвящена обзору современного состояния математического моделирования тепломассообменного оборудования и схем его объединения, а также эмпирического обеспечения этих моделей. В результате анализа подходов к математическому моделированию схем со сложной конфигурацией потоков теплоносителей автор предложил новую систему классификации и кодификации моделей многоступенчатых многопоточных и многокомпонентных систем и совершенно справедливо констатировал отсутствие универсального подхода, позволяющего на единой методологической базе ставить и решать разнообразные задачи, возникающие при исследовании таких систем. Обращение автора к матричным ячеечным моделям сложных систем, в которых в качестве ячейки используется отдельная ступень установки, является обоснованным и позволяет частично уменьшить упомянутые выше недостатки отсутствия единой методологии моделирования многоступенчатых и многопоточных энергетических комплексов.

*Вторая глава* является ключевой главой диссертации как по содержанию представленных результатов исследований, так и по их значимости. Очевидная новизна представленных результатов заключается в разработке модели сложных энергетических комплексов, в каждую ступень которых может подаваться произвольное число входных и выходных потоков (рисунок 2.8). Дальнейшее моделирование системы сводится к объединению моделей ступени в соответствии со структурой потоков теплоносителей между ячейками. Для этого предложена матричная формализация процедуры объединения и универсальный алгоритм построения матрицы системы по единому правилу, что позволяет легко автоматизировать эту процедуру при компьютерной поддержке

вычислений. Протекание процессов в отдельных ступенях описывается решением соответствующих дифференциальных уравнений, которые автор подробно анализирует для трехпоточной четырехступенчатой системы при противоточном и прямоточном характере движения теплоносителей. Далее автор рассматривает ряд демонстрационных примеров работоспособности модели и алгоритма, в частности, для случая построения энергетических характеристик турбины ПТ-65/75-130/13 для различных нагрузок производственного и теплофикационного отборов. Достоверность же расчетных прогнозов подтверждается хорошим совпадением с реальными энергетическими характеристиками. Особого внимания заслуживает предложенный автором матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в двухпоточных и трехпоточных теплообменных аппаратах, который может с успехом использоваться при решении задач проектирования и диагностики оборудования. Следует отметить, что предложенный алгоритм и расчетная схема справедливы только для установившегося состояния системы.

*В третьей главе* рассматривается моделирование процессов в теплообменных аппаратах с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях. Здесь также используются ячеечные матричные модели, ассоциируемые автором со схемой интегрирования дифференциальных уравнений движения и энергии. В расчетных примерах делается попытка анализа процесса при противоточном движении теплоносителей при скользящей границе фазового перехода. Представлен матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах с фазовым переходом в системе одноступенчатых и многоступенчатых теплообменных аппаратов, проведен анализ полученных результатов. Приведенные расчетные примеры носят скорее демонстрационный характер, хотя, это направление заслуживает более глубокой проработки. Общим недостатком полученных в этой главе результатов является игнорирование в моделях теплоемкости самого оборудования, масса которого в реальных технологических линиях весьма велика. Вместе с тем, нельзя не признать, что использование матричных моделей сохраняет единство подхода к моделированию.

*В четвертой главе* приведены постановки и решения задач матричного моделирования теплообмена для многокомпонентных потоков смесей фракций разнородных сыпучих материалов в технологических системах измельчения и матричного моделирования разделения смеси компонентов (фракций) с разной температурой кипения для определения качества готового продукта. Следует отметить, что твердое топливо в настоящее время используется

на тепловых электрических станциях крайне редко и актуальность данного материала для энергетики вызывает сомнение. Однако нужно заметить, что применение методологии матричной формализации позволило в данном случае автору в рамках единого подхода проводить расчетный анализ многопоточных многоступенчатых и многокомпонентных систем с целью определения условий их эффективного функционирования. Также 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 системы ректификационных колонн, проведен анализ полученных результатов. Представленный подход позволяет исследовать и оптимизировать многопоточные многоступенчатые установки, варьируя число ступеней и распределение значений температур по ступеням.

*В пятой главе* представлены результаты экспериментальных исследований конденсационных котлов GEFEN MB 3.1-1000 и MB 3.1-530, необходимые для идентификации модели и решения задачи выделения влаги и тепловой энергии из дымовых газов энергетических и теплофикационных котлов. Проведены испытания и выполнена первичная обработка результатов измерений для идентификации модели и построения реальных энергетических характеристик паровых турбин ПТ-12-35/10М и Тп-115/125-130-1ТП. В ходе обработки результатов испытаний получена зависимость удельного расхода тепловой энергии брутто на выработку электроэнергии от электрической мощности. Также получены экспериментальные результаты классификации смеси разнородных компонентов на лабораторной установке, на основе которых проведена идентификация и проверка адекватности моделей.

*В шестой главе* приведены результаты практического использования разработанных методов и моделей. Сначала описан взгляд на модели с точки зрения инженерного расчета сложных тепломассообменных систем и детализации компьютерных алгоритмов расчета применительно к различным типам оборудования. Расчеты ориентированы на широкий спектр оборудования, реально функционирующего в энергетических и химических производствах, и доведены до определения отчетных характеристик процессов. На базе предложенных методологии и методов расчета систем многокомпонентных тепломассообменных аппаратов решены многочисленные практические задачи, результаты решения которых внедрены на Сызранской ТЭЦ (филиал «Самарской» ПАО «Т Плюс»), на Петрозаводской ТЭЦ, ООО «Реиннольц» (г. Екатеринбург, Россия), на Самарской ТЭЦ, ПГУ-ТЭС «Международная» ООО «Сити-энерго» (г. Москва),

что подтверждается соответствующими документами, приведенными в приложении к работе.

**В заключении** сформулированы основные итоги диссертационной работы в соответствии с поставленными задачами, продемонстрированы перспективные направления развития исследований.

**В приложении** приведены акты внедрения результатов исследования и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.**

Проведенные автором исследования базируются на применении классических законов теплообмена, апробированных численных методов и сертифицированного программного обеспечения. Обоснованность и достоверность научных положений, результатов исследований и выводов подтверждается удовлетворительной согласованностью полученных теоретических, численных и экспериментальных показателей между собой.

Научные положения, выносимые на защиту, раскрыты в тексте диссертации и в опубликованных соискателем работах.

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 73 научных работах, в том числе в 20 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК; 9 статьях в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, а также доложены на международных и всероссийских научно-технических конференциях. Получено 3 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

#### **Научная новизна.**

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; 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.

4. Разработано математическое описание многопоточных теплообменных аппаратов с учетом 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.

5. Предложена новая формулировка обратной задачи теплопередачи и получено ее решение для случая скользящей границы начала фазового перехода при противоточном характере движения теплоносителей. 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.

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.

**Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки.**

Наибольшее научное значение имеет методология и разработанный подход к автоматизации составления матричных математических моделей тепломассообменных систем со сложной конфигурацией потоков теплоносителей, позволяющий проводить компьютерный анализ их характеристик и синтез систем с требуемыми характеристиками. Среди задач, решенных на основе этого подхода, наибольший интерес представляет задача моделирования системы,

включающей ступени с произвольным числом входных и выходных потоков, которая может инициировать постановку и решение смежных задач для других производств.

Значимость для практики состоит в том, что практически все разработанные модели доведены до компьютерных методов расчета, то есть имеют выход на непосредственное практическое использование в действующих и проектируемых производствах. Часть разработанных методов уже успешно используется на промышленных предприятиях, в проектных подразделениях и организациях, а также в исследовательских лабораториях.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.**

Разработанные в диссертации математические модели сложных тепло-массообменных систем, компьютерные средства их анализа и синтеза, а также результаты анализа рекомендуются к использованию в исследовательских и проектных организациях, занимающихся разработкой и эксплуатацией тепло-массообменного оборудования (ВТИ, НПО ЦКТИ, ТЭП, ТЭС, тепловые сети и т.д.). Методика и модуль расчета на ЭВМ процессов тепло- и массообмена рекомендуется использовать в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

**Соответствие диссертации научной специальности.**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» 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 ... 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».

**По содержанию диссертации имеются следующие вопросы и замечания:**

1. Автор не оговаривает предельную сложность схемы, при которой моделирование и численные эксперименты могут быть выполнены за разумное расчетное время. В диссертации не приводятся сведения о затратах машинного времени на решение задач анализа и синтеза и о масштабах систем, для которых это время становится неприемлемым.

2. Включение в диссертацию раздела, посвященного моделированию процессов измельчения и классификации сыпучих материалов, с учетом ограниченного использования твердого топлива в энергетике носит, на наш взгляд, весьма искусственный характер.

3. В работе практически не уделено внимания исследованию чувствительности выходных параметров систем к параметрам, входящим в модели подсистем. Без этого упоминаемая в работе задача диагностики оборудования (в частности, поверхностей теплообмена) на основе разработанных моделей и алгоритмов вряд ли может решаться.

4. На рис. 2.1 диссертации показана принципиальная тепловая схема системы регенерации турбоустановки типа ПТ, которая имеет весьма упрощенную структуру, включающую только один смешивающий подогреватель. Очевидно, что для моделирования реального оборудования нужно использовать более сложные схемы, структура которых приближена к реальным установкам.

5. Проблема извлечения воды из дымовых газов хорошо известна и достаточно подробно исследована другими авторами, работы которых представлены в обзоре диссертации весьма скудно. В чем состоит новизна проведенных исследований в части постановки задачи по охлаждению дымовых газов и конденсации, содержащихся в них водяных паров?

Замечания не меняют общей положительной оценки работы.

Теоретические и практические результаты диссертационной работы отвечают требованиям, которые предъявляются к докторским диссертациям.

#### **Заключение по работе.**

Диссертация Барочкина Алексея Евгеньевича «Моделирование, расчет и оптимизация многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические разработки по созданию новых подходов к автоматизированному построению математических моделей и методов расчета тепломассообменных многопоточных многокомпонентных многоступенчатых систем со сложной конфигурацией потоков теплоносителей и их реализации в промышленности, имеющих существенное значение для экономики энергетической и других от-



раслей промышленности страны. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Диссертация удовлетворяет установленным требованиями п.п. 9-14 «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)».

Диссертация, автореферат, а также отзыв ведущей организации обсуждены на заседании научно-технического совета публичного акционерного общества энергетики и электрификации «Мосэнерго» от 09.09.2024 протокол №2.

Главный специалист, сопредседатель  
НТС, доктор технических наук  
Заместитель управляющего директор  
– главный инженер ПАО «Мос-  
энерго», заместитель председателя  
НТС, кандидат технических наук

Радин Юрий Анатольевич  
19.09.2024

*[Handwritten signature]*  
19.09.2024

Ленёв Сергей Николаевич

Сведения о ведущей организации:

Публичное акционерное общество энергетики и электрификации «Мосэнерго»  
Адрес: Российская Федерация, 119526, г. Москва, проспект Вернадского, д.101, корп.3  
Телефон: +7 495 957-19-57  
Факс: +7 495 957-32-00  
e-mail: mosenergo@mosenergo.ru

Подписи Радина Юрия Анатольевича и Ленёва Сергея Николаевича заверяю:

Начальник управления  
технического перевооружения,  
научный секретарь НТС

подпись печать

Охлопков  
Андрей Владимирович  
19.09.2024