

ОТЗЫВ

официального оппонента Кудинова Анатолия Александровича на диссертацию 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)

1. Актуальность темы диссертационного исследования. Вопросы энергосбережения при генерации, передаче и использовании тепловой и электрической энергии приобрели особую актуальность в связи принятием федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...». 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. Разработка единой универсальной методологии, позволяющей моделировать и оптимизировать многопоточные многокомпонентные и многоступенчатые энергетические системы с целью повышения эффективности использования энергетических ресурсов, является **актуальной** проблемой, решению которой посвящена представленная диссертация.

2. Оценка содержания диссертации и степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Представленная на отзыв диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, списка использованной литературы из 352 наименований и двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 313 страниц машинописного текста, содержит 51 таблицу, 94 рисунка.

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

Во введении приведены основные сведения о работе, определена проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе представлен анализ существующих подходов к моделированию и расчету сложных энергетических теплообменных систем: многопоточных пластинчатых и спиральных теплообменных аппаратов, многоступенчатых испарительных установок, встроенных теплофикационных пучков конденсаторов турбин, конденсационных котлов, контактных аппаратов, башенных градирен. На основании проведенного анализа разработана система классификации и кодификации моделей многопоточных многокомпонентных и многоступенчатых энергетических систем, представленная на рис. 1.6 диссертации. Предложенная система классификации и ее анализ позволил автору сделать обоснованный вывод о целесообразности разработки единого подхода, основанного на концепции матричной формализации моделей, для анализа теплообменных систем и подсистем энергетических комплексов со

сложными структурами потоков энергоносителей. В результате проведенного анализа сформулированы и обоснованы задачи исследования.

Во второй главе диссертации представлена модель многопоточных систем, каждая ступень которых может иметь произвольное число входных и выходных потоков. При этом фазовый переход в теплоносителях не рассматривается. Моделирование сложных многоступенчатых систем с произвольным числом потоков в каждой ступени является наиболее значимым результатом исследований, представленных в этой главе. Разработанное описание ступени позволило провести анализ влияния направлений движения потоков теплоносителей на эффективность теплообмена. Если преимущество противоточного движения теплоносителей перед прямоточным в двухпоточных аппаратах является общепризнанным, то определение эффективных систем движения теплоносителей в аппаратах с числом потоков большим двух представляет как научный, так и практический интерес. Выполнен анализ эффективности четырехпоточного одноступенчатого теплообменного аппарата, для которого установлена наиболее рациональная схема движения с обеспечением максимального теплосъема с горячего теплоносителя.

Третья глава работы посвящена моделированию систем тепломассообмена в многопоточных многоступенчатых аппаратах с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях. В частности, рассматривается задача выделения влаги из продуктов сгорания органического топлива энергетического котла тепловой электростанции. В качестве анализируемых потоков системы выделяются охлаждающая вода, сухие дымовые газы и водяные пары, которые содержатся в дымовых газах. Данная задача рассмотрена для случаев прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей. Решение этой задачи с предварительным определением координаты начала фазового перехода имеет теоретическое и практическое значение. Отдельно следует отметить представленную автором постановку и решение обратной задачи теплообмена для ступени двух- и трехпоточного аппарата, которые может использоваться при проектировании и диагностике энергетического оборудования.

В четвертой главе диссертации представлено описание методологии матричного моделирования для случая многокомпонентных систем, в которых в качестве компонентов рассматриваются жидкости с разными температурами кипения или порошки с частицами разного размера. Для жидкостей с разными температурами кипения сформулирована и решена задача выбора оптимальных параметров и структуры системы с использованием модели процесса, построенной в рамках матричной формализации. Следует отметить, что матричная формализация моделирования позволяет использовать генетический алгоритм для оптимизации систем со сложной структурой.

Пятая глава диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям процесса тепломассообмена, результаты которых используются для идентификации, верификации и разработки эмпирического обеспечения представленных моделей.

В шестой главе диссертации рассматриваются вопросы практического использования результатов работы в энергетике и коммунальном хозяйстве. В частности, рассмотрены вопросы разработки мероприятий по повышению эффективности и оптимизации оборудования и режимов работы Сызранской ТЭЦ и Сакмарской ТЭЦ. Предложены варианты реконструкции и развития этих ТЭЦ с расчетом перспективных финансово-

экономических показателей. Результаты практического использования диссертационной работы подтверждены соответствующими документами, приведенными в приложении.

В заключении сформулированы основные результаты работы в соответствии с целью исследования и поставленными задачами, приведены рекомендации по дальнейшему научному и практическому использованию предложенной методологии и полученных автором результатов.

3. Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке научных основ и методологии математического описания формирования энерго- и массопотоков в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических системах и установках, базирующихся на матричной формализации уравнений баланса энергии и массы теплоносителей; в разработке математической модели паротурбинной установки ТЭС с целью построения энергетических характеристик турбоагрегатов и математической модели многопоточной многоступенчатой теплообменной системы, каждая ступень которой может иметь произвольное число входных и выходных потоков; в разработке математического описания многопоточных теплообменных аппаратов с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях; в новой формулировке обратной задачи теплопередачи и ее решении для случая скользящей границы фазового перехода при противоточном характере движения теплоносителей; в получении модели фракционирования многокомпонентной смеси сыпучих материалов и модели разделения смеси компонентов с разной температурой кипения.

4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается использованием 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; удовлетворительной сходимостью численных и аналитических решений.

5. Значимость результатов для науки и практики

Научная значимость результатов работы состоит в разработке универсальной методологии моделирования, расчета и оптимизации многокомпонентных многоступенчатых многопоточных тепло- и массообменных систем с использованием матричной формализации уравнений баланса теплоты и массы теплоносителей.

Практическая значимость результатов 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 проточной 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.

6. Замечания и вопросы по диссертационной работе

1. Существующие классические методы теплотехнического расчета энергетического оборудования строятся на балансовых соотношениях массы и энергии (решении уравнений теплового баланса и теплопередачи и законе сохранения массы теплоносителей). Какие принципиальные преимущества дает применение матричных моделей для расчета тепломассообменных процессов в энергетических системах и установках по сравнению с традиционными классическими методами расчета? При этом, следует учесть, что одним из основных и трудоемких этапов при использовании любого метода теплотехнического расчета теплообменного аппарата является предварительное определение коэффициентов теплоотдачи α и теплопередачи k , от правильного определения которых в основном и зависит конечный результат.

2. В диссертации не приведены числовые значения коэффициентов теплопередачи k для конденсационных теплообменников и котлов, отсутствуют формулы (критериальные уравнения) для расчета k для условий конденсации водяных паров из газов. При выполнении математического моделирования соискатель использовал известные зависимости для k [6, 53, 54, 55, 71] или им были получены новые уравнения? Кроме того, в диссертации не приводятся числовые значения коэффициентов теплоотдачи α от газов к теплообменной поверхности в условиях конденсации водяных паров из продуктов сгорания котельных установок.

3. В диссертации разработка математического описания многопоточной энергетической системы, в частности, рассматривается на примере турбоустановки типа ПТ с выделением основных подсистем (рис. 2.2). Записываются следующие балансовые уравнения: энергии для котла; энергии для турбины; массы для турбины; энергии для регенеративного подогревателя и конденсатора; энергии для производственного и теплофикационного отборов пара, которые представляются в виде системы линейных уравнений в матричном виде (см. стр. 77, 78). При этом отсутствует обоснование принятия равными нулю ряда коэффициентов матрицы A , уравнение энергии для энергокотла представлено без учета непрерывной продувки котловой воды и промежуточного перегрева водяного пара.

4. В п. п. 5.3.3 и 6.4.1 диссертации приведены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования турбоагрегатов Тп-115/125-130-1ТП и Т-110/120-130-5 для построения расчетным путем их энергетических характеристик. Результаты приведены на рис. 5.11–5.14 и 6.16. При этом для конденсационного режима работы турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП данные рис. 5.12 не совпадают с данными рис. 5.13, 5.14 при $Q_T=0$ Гкал/ч. Кроме того, значения $q_T^{бр}$ для турбины Тп-115/125-130-1ТП приведены в кДж/(кВт·ч), а для турбины Т-110/120-130-5 в ккал/(кВт·ч). Причем, например, при мощности турбоустановки $N_T=80$ МВт и отсутствии теплофикационной нагрузки ($Q_T=0$) удельный расход теплоты $q_T^{бр}$ для турбины Тп-115/125-130-1ТП равен ≈ 2300 кДж/(кВт·ч), а для Т-110/120-130-5 – 2300 ккал/(кВт·ч). То есть расхождение результатов расчетов $q_T^{бр}$ для турбин одного класса составляет 4,2 раза. Почему? Однако, результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. В диссертации отсутствует анализ и сравнение полученных результатов.

5. П. 6.3. работы посвящен разработке мероприятий по повышению эффективности эксплуатации конденсационных котлов ООО «Нижегородтеплогаз». На стр. 212 указывается: «Полученное из идентификации произведение $k \cdot F$ позволяет определить величину коэффициента теплопередачи k , который принимается постоянным для проведения дальнейших расчетов». Коэффициент теплопередачи k при конденсации водяных паров из газов является функцией (наряду с известными параметрами для «сухого» теплообмена) степени орошения W конденсатом водяных паров из газов теплообменной поверхности аппарата [54, 55]. При этом W зависит от количества сконденсировавшихся водяных паров из газов, то есть от температуры газов за конденсационным котлом (или на выходе из конденсационного теплообменника). Таким образом k изменяется как по поверхности теплообменника, так и при изменении нагрузки котла. Принятие соискателем в расчетах $k=\text{const}$ является достаточно простым решением, в диссертации не обосновывается.

6. Энергетические характеристики (диаграммы режимов) турбоагрегатов типа К, Т, ПТ, Р разработаны и представлены в справочной и учебной литературе как в графической форме, так и в аналитическом виде. Диаграммы режимов для турбин типа Т и ПТ устанавливают зависимость расхода свежего пара (теплоты) на турбину от электрической мощности турбоустановки и расхода пара (теплоты) в отборах, востребованы в инженерных приложениях. По ним просто определять (или рассчитывать) требуемый параметр, например расход пара на турбину при заданных расходах пара в отборах и электрической мощности турбогенератора, включая переменные режимы работы установки. В диссертации не приведены энергетические характеристики турбоагрегатов ПТ-65/75-130/13, Тп-115/125-130-1ТП, Т-110/120-130-5 в аналитическом виде. Какие преимущества имеют представленные в диссертации энергетические характеристики турбоагрегатов по сравнению с характеристиками, разработанными заводами изготовителями по результатам испытаний турбин, и как ими пользоваться в инженерных расчетах, например, при определении расхода пара на турбину?

7. Имеются замечания по оформлению рукописи диссертации:

а) на стр. 17 приведены наименования XXIX, XXXII, XXXV Международных научных конференций «Математические методы в технике и технологиях» (2016, 2019, 2022 гг.), при этом не указан город, где проводились эти МНК;

б) стр. 30, второй абзац сверху: неправильно указана ссылка на литературный источник [55], нужно было бы указать [53];

в) в системе линейных уравнений (2.1) удельная энтальпия рабочего тела обозначена латинской буквой i , следует обозначать – h ;

г) в режимных картах водогрейных котлов типа GEFEN MB 3/1-1000 (1060) (см. табл. 5.4–5.6) приведены значения КПД «брутто» котла (по низшей теплоте сгорания) при работе на природном газе. Однако в диссертации не представлены состав природного газа и его низшая теплота сгорания;

д) в таблицах 5.4–5.7 потери тепла (следует написать «потери теплоты») котлом с уходящими газами обозначены символами q_2'' и q_2^B . При этом q_2^B значительно превышает q_2'' . Отсутствует детальная расшифровка этих двух параметров;

е) на рис. 5.11–5.14 мощность N_T турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП приведена в кВт, следует обозначить в МВт;

ж) стр. 216, отмечено: «Перерасход тепловой энергии при равномерном распределении нагрузок по сравнению с оптимальным режимом составил 256,67 ГДж/год, что соответствует годовой экономии топлива 5,579 т/год». В этом выражении имеются неточности: 1) перерасход тепловой энергии не может привести к экономии топлива; 2) не указаны вид и теплота сгорания топлива, экономия которого равна 5,579 т/год.

з) стр. 263, первый абзац снизу обозначен цифрой 8, следует обозначить – 5.

Отмеченные выше замечания и недостатки имеют частный характер, не снижают научной и практической значимости диссертации и целостности ее содержания.

7. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати. По теме диссертации соискателем опубликовано 73 печатных работы, в том числе 20 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 9 публикаций в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus; 1 монография, 7 учебных пособий; получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат диссертации выдержан по форме и объему и отражает основные положения диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ


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» (технические науки), является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработан комплекс новых научно обоснованных технических и технологических решений, позволяющих повысить эффектив-

ность работы многокомпонентных многоступенчатых многопоточных энергетических систем путем оптимизации их работы, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны за счет экономии материальных ресурсов, органического топлива и охраны окружающей среды. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Диссертационная работа «Моделирование, расчет и оптимизация многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок» по актуальности, новизне, объему и уровню выполненных исследований и полноте публикаций соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ, установленным в 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).

Официальный оппонент:

профессор кафедры «Тепловые электрические станции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», доктор технических наук (специальность 01.04.14 – Теплофизика и молекулярная физика), профессор.

 Кудинов
Анатолий Александрович
04.09.2024 г.

Почтовый адрес: РФ 443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244
Тел. (846) 332-42-31, (846) 333-65-77
e-mail: tes@samgtu.ru

Подпись доктора технических наук, профессора Кудинова А.А. заверяю:
Ученый секретарь
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»,
доктор технических наук, доцент





Малиновская
Юлия Александровна