

## ОТЗЫВ

официального оппонента Стенникова Валерия Алексеевича  
на диссертацию **Рафальской Татьяны Анатольевны**  
на тему "Разработка и совершенствование методов моделирования  
и расчета переменных режимов работы систем теплоснабжения"  
по специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника  
на соискание учёной степени доктора технических наук

### **Актуальность темы диссертации**

Потребление энергетических ресурсов в современном мире идет нарастающим темпом. По прогнозам энергетической стратегии России производство тепловой энергии возрастет к 2030 году на 22-34%, при этом предусматривается рост реального потребления тепловой энергии в 1,4-1,5 раза за счет сокращения потерь в условиях высокого потенциала энергосбережения во всех секторах энергетики: от производства до транспортировки и рационального потребления тепловой энергии.

Передача тепловой энергии по системе теплоснабжения потребителям связана с различными переменными режимами работы, при реализации которых заложен значительный ресурс энергосбережения. Характер режимов функционирования систем определяется параметрами давления, расхода, температуры, скоростью движения сетевой воды.

Проблемы моделирования и расчета переменных режимов работы систем теплоснабжения в настоящее время представляются очень важными, а их результаты востребованными. Это обусловлено множеством причин, в частности:

1) Существующий способ регулирования тепловой нагрузки – изменением температуры сетевой воды при постоянном ее расходе (качественный способ регулирования), был принят еще в середине прошлого века и обеспечивал стабильный гидравлический режим при применении в тепловых пунктах элеваторных смесительных устройств с постоянным коэффициентом смешения независимо от погодных условий. Этот способ регулирования к настоящему времени претерпел существенную трансформацию. Ослабление роли пиковых источников теплоты, использование срезки температурного графика, повышение температуры излома графика регулирования резко сократили продолжительность времени качественного регулирования тепловой нагрузки, а значительное увеличение доли горячего водоснабжения в общем тепловом балансе привело к существенно переменному расходу сетевой воды, что практически обесценило основное преимущество этого способа, связанное с поддержанием стабильного гидравлического режима.

2) В современных тепловых пунктах систем теплоснабжения применяется связанная подача теплоты в системы отопления и горячего водоснабжения, позволяющая сократить расходы сетевой воды и повысить энергоэффективность теплоснабжения. Однако применение простых элеваторных систем в тепловых пунктах в этом случае представляется невозможным, что также сводит на нет преимущества качественного способа регулирования.

3) Невозможно рассчитать и спрогнозировать вероятные режимы работы системы теплоснабжения при переходе на другие способы регулирования существующими методами, предложенными ещё в середине прошлого века, основанными на ряде допущений и хорошо зарекомендовавшими себя только для одного – качественного способа регулирования тепловых нагрузок.

Таким образом, для повышения энергоэффективности систем теплоснабжения необходимо совершенствование существующих и разработка новых методов, что позволит выбрать наиболее рациональные режимы, обеспечивающие требуемый тепловой баланс помещений, чему и посвящена диссертационная работа Рафальской Т.А.

Исходя из изложенного, тема диссертации, безусловно, является актуальной.

### **Основная идея диссертации**

Система теплоснабжения является сложным энергетическим объектом. Точный расчет и регулирование переменных режимов работы систем теплоснабжения затруднено большим количеством неизвестных входных параметров, что требует разработки методов моделирования и расчета таких систем. Разработанные ещё в 50-60-х годах прошлого века теоретические основы теплоэнергетики позволили создать в нашей стране крупнейшую в мире систему теплофикации. В них успешно применялось центральное качественное регулирование нагрузки теплоснабжения путём изменения температуры теплоносителя при постоянстве его расхода. Однако старение систем централизованного теплоснабжения, невозможность выдерживать заданные температурные графики привели к срезкам температурных графиков, нарушению качественного регулирования отпуска тепла на источниках. Это потребовало перехода на новые способы центрального регулирования тепловой нагрузки и соответствующие теплогидравлические режимы работы систем теплоснабжения, которые стало сложно рассчитывать существующими методами, предполагающими введение целого ряда допущений и упрощений с целью сокращения числа переменных параметров. Стремление использовать численные методы для расчёта переменных режимов работы системы теплоснабжения не дали хороших результатов, поскольку при связанной подаче теплоты потребовалось применять многоэтапные расчеты и разрабатывать соответствующие методы. Кроме того, при комплексном расчете, учитывающем как работу системы теплоснабжения, так и тепловую аккумуляцию зданий, существенно увеличивается время расчета. В результате становится невозможным осуществлять оперативное управление и регулирование тепловых потоков и расходов воды, а в сложных случаях это может привести к аварийным ситуациям.

Это делает актуальной и востребованной настоящую работу, основная идея которой заключается в разработке универсального комплексного метода расчета переменных режимов работы систем теплоснабжения, позволяющего выявить периоды, в течение

которых наблюдаются нерациональные режимы совместной работы систем отопления и горячего водоснабжения, как в условиях нормального функционирования системы теплоснабжения, так и в аварийных режимах ее работы. Следует отметить, что предложенный в диссертации метод может применяться как для расчета существующих открытых систем, так и для анализа и прогнозирования режимов работы систем теплоснабжения с тепловыми пунктами новыми способами центрального и местного регулирования.

### **Наиболее значимые результаты диссертации**

Диссертационная работа Рафальской Татьяны Анатольевны имеет как теоретический, так и прикладной характер. К наиболее значимым результатам работы могут быть отнесены следующие положения:

1. Обеспечение теплового режима помещений при переходе на качественно-количественные и количественные способы регулирования тепловых нагрузок, особенно при низкотемпературном теплоснабжении представляется принципиально важной задачей. Это подчеркивает то, что полученный в работе результат, показывающий, что традиционно применяемый подход качественного регулирования отпуска тепла, успешно применяемый при высокотемпературном теплоснабжении, при снижении расчетной температурой воды, подаваемой в тепловую сеть не сможет обеспечить требуемый температурный режим помещений даже при полной замене оборудования и трубопроводов систем теплоснабжения и тепловых пунктов. Это требует поиска новых решений, чему и посвящена диссертационная работа.

2. Исследование особенностей нарушения теплового режима помещений в окрестности точки излома температурного графика, анализ причин нерационального использования теплового потенциала источника теплоты в этот период. Рекомендации по применению новой схемы регулирования расхода сетевой воды через теплообменник горячего водоснабжения второй ступени, обеспечивающей полное использование тепловой мощности системы теплоснабжения.

3. Предложенные рекомендации по эффективному использованию тепловой мощности при низких наружных температурах и при срезках температурного графика, позволяющие устранить дефицит тепловой энергии в системе отопления.

4. Комплексный подход к определению теплового режима помещений, с учетом не только отопительной нагрузки, но и соотношения нагрузок на горячее водоснабжение и отопление и тепловой аккумуляции помещений. Особую значимость имеют результаты, показывающие снижение внутренней температуры помещений, в аварийном режиме работы теплосети в зависимости от соотношения тепловых нагрузок на горячее водоснабжение и

отопление и тепловой аккумуляции зданий, и предложенные расчетные формулы для определения допустимого времени работы системы отопления в аварийных условиях.

5. Разработанное автором программное обеспечение, реализующее предложенные в диссертационной работе расчетные методы, которое активно применяется как в эксплуатационных, проектных, экспертных организациях, так и в учебном процессе ряда вузов. Особенно важно, что разработанные программы имеют открытую базу данных, позволяющую выполнять расчеты с использованием текущих эксплуатационных данных о работе теплосети и осуществлять оперативное управление.

6. Предложенные автором инженерные методы расчета температурных графиков теплообменников в тепловых пунктах и режимов их работы, что позволяет проводить оценочные расчеты в проектных организациях, не прибегая к сложным математическим вычислениям.

### **Новыми научными результатами, полученными автором, являются**

1. Определение пределов применимости существующих методов расчёта режимов работы теплообменных аппаратов, основанных на использовании числа единиц переноса теплоты и постоянного коэффициента теплопередачи теплообменника, которое показало, что в целом ряде важных ситуаций они приводят к неправильным результатам, причём не только в количественном, но и в качественном отношении.

2. Предложенный метод численного расчёта режимов работы тепловых пунктов со связанной подачей теплоты, особенностью которого является возможность определения всех характеристик группы теплообменников с перераспределением тепловой мощности между теплообменниками в зависимости от режима их работы.

3. Предложенные новые аналитические зависимости, описывающие изменение параметров теплообменников в переменных режимах работы, особенностью которых является возможность выполнять расчёты при недостаточных исходных данных. Созданный с их помощью инженерный метод расчёта переменных режимов работы систем теплоснабжения, позволяющий существенно упростить проектные расчёты и сократить время их выполнения.

4. Предложенные аналитические уравнения расчёта температурных графиков регулирования, позволяющие определять температуру сетевой воды после каждого теплообменника для двухступенчатых схем тепловых пунктов и непосредственно выполнять расчёт тепловых пунктов со связанной подачей теплоты.

5. Результаты исследования режимов работы системы теплоснабжения со связанной подачей теплоты при качественном и качественно-количественном регулировании тепловой нагрузки с учётом тепловой аккумуляции помещений с различными наружными ограждениями.

6. Результаты технико-экономического расчета стоимости производства тепловой энергии для систем теплоснабжения с различными температурными графиками

регулирования для определения перспектив развития систем теплоснабжения со связанной подачей теплоты.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Диссертант корректно применяет известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Автором изучены и критически проанализированы известные достижения и теоретические положения таких авторов, как Соколов Е.Я., Зингер Н.М., Шубин Е.П., Ионин А.А. и др., стоявших у истоков развития теплофикации и заложивших её научные основы, а также современных исследователей, посвятивших свои труды разработке методов расчета тепловых и гидравлических режимов систем теплоснабжения.

Обоснованность результатов теоретических исследований, полученных соискателем, основывается на согласованности с расчетами в сертифицированных программных комплексах численного моделирования, а также с литературными и эксплуатационными данными о работе теплосети и теплообменного оборудования.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов диссертационной работы и выводов, полученных диссертантом, обоснована корректностью математической постановки задачи, применением современной методологией технико-экономического анализа и проверенными численными методами, обеспечивающими заданную точность решения.

Положения диссертации, выносимые на защиту, обоснованы теоретически и экспериментально. Методические подходы, предложенные в работе, полученные автором зависимости и разработанные на их основании методы расчета используются рядом организаций, занимающихся вопросами повышения эффективности систем теплоснабжения, их эксплуатацией, экспертизой и успешно прошли практическую проверку.

### **Структура диссертации**

Диссертация содержит 367 с. основного текста, 3 приложения на 80 с., список литературы из 458 наименований, 277 рисунков и 26 таблиц.

По теме диссертации автором опубликовано более 80 работ, из них 24 – в рецензируемых изданиях по списку ВАК, 13 работ в изданиях, включенных в международные базы научного цитирования Web of Science и SCOPUS, 1 глава в книге, получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

### Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. При анализе формулы (1.15) для оценки влияния температуры и расходов теплоносителей на число единиц переноса теплоты NTU (с. 63-64, параграф 1.4) следовало указать, что полученные выводы об изменении температуры теплоносителей в теплообменном аппарате справедливы только для противоточной схемы движения теплоносителей.

2. При описании модели теплообменника (с. 79, параграф 2.3) отмечается, что изменение расхода вторичного теплоносителя не зависит от тепловой мощности теплообменника. Такое утверждение нельзя признать корректным, поскольку тепловая мощность теплообменника как раз и должна определяться расходом нагреваемой воды.

3. Требуется пояснить, почему во многих исследуемых режимах условием равенства параметра теплообменника  $\Phi$  расчетному значению  $\Phi_0$  является равенство расходов первичного и вторичного теплоносителей, если в расчетном режиме параметр  $\Phi_0$  рассчитывался при существенно различных расходах теплоносителей (с. 83-91, параграф 2.3)?

4. В параграфе 3.5 (с. 174-178) описывается методика, которая с помощью предложенных в диссертации уравнений температурных графиков сетевой воды теплообменников двухступенчатых схем тепловых пунктов позволяет прогнозировать температуру воды, возвращаемой в тепловую сеть при переменном суточном водопотреблении в системе горячего водоснабжения. Вместе с тем, в предложенной методике прогнозирования заложены нерациональные режимы работы системы теплоснабжения с завышенной температурой обратной воды (ф-ла (3.32)), хотя автор указывает на завышение температуры обратной воды в теплосети, как одной из основных негативных проблем.

5. Самые сложные режимы совместной работы систем отопления и горячего водоснабжения, как справедливо отмечается автором, наблюдаются в точке излома температурного графика регулирования отпуска тепла. Однако это характерно для двухступенчатой смешанной схемы присоединения теплообменников горячего водоснабжения с ограничением расхода сетевой воды. Не проще ли будет применить двухступенчатую последовательную схему присоединения теплообменников горячего водоснабжения?

Вышеизложенные замечания не снижают научной ценности и практической значимости диссертации и не влияют на общую положительную оценку работы. В целом

материалы диссертации изложены аргументировано, логично и технически грамотно, что характеризует соискателя как высококвалифицированного специалиста.

### Общее заключение по диссертации

Диссертация Рафальской Татьяны Анатольевны соответствует специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника, является завершённой научно-квалификационной работой, в которой с помощью разработанных автором методического аппарата, методов комплексного моделирования и рекомендаций полученных по результатам выполненных исследований решена научная проблема определения способов эффективного использования тепловой мощности систем централизованного теплоснабжения в различных переменных режимах работы, имеющая важное социально-экономическое и хозяйственное значение для энергосбережения и энергетической эффективности в сфере теплоснабжения.

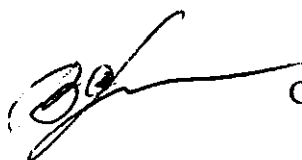
Диссертация написана единолично, содержит совокупность новых научных результатов и положений, имеет внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Предложенные автором новые решения строго аргументированы и критически оценены.

Диссертация соответствует требованиям п.9 "Положения о присуждении учёных степеней" постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Рафальская Татьяна Анатольевна достойна присуждения учёной степени доктора технических наук.

Директор, заведующий отделом трубопроводных систем энергетики № 50,  
заведующий лабораторией Систем теплоснабжения № 53

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской  
академии наук

Доктор технических наук,  
академик РАН, профессор



Стенников Валерий Алексеевич

17.04.2023 г.

Адрес: 664033, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130, каб. 206  
Телефон: +7(3952) 42-47-00  
Эл. адрес: sva@isem.ru



Подпись <i>Стенникова В.А.</i> заверяю
Учёный секретарь ИСЭМ СО РАН
Подпись <i>Мухомов А.В.</i>
расшифровка подписи
17.04.2023 г.