



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Кикоть Евгений Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ
С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Атомная и тепловая энергетика»

Научный руководитель: **Амосов Николай Тимофеевич**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Гашо Евгений Геннадьевич**
доктор технических наук, профессор кафедры
промышленных теплоэнергетических систем,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва

Пузаков Вячеслав Сергеевич,
кандидат технических наук, Руководитель
направления энергосбережения и повышения
энергоэффективности ООО «Энсис Технологии»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический
университет», г. Казань

Защита диссертации состоится 12 октября 2021 г. в _____ на заседании
диссертационного совета У.05.14.04 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-
Петербург, ул. Политехническая, 29 ПГК, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ
ВО «СПбПУ» и на сайте <http://www.spbstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.05.14.04
д.т.н.

 М.И. Куколев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Условия работы теплоэлектростанций (ТЭЦ) при становлении розничных рынков электрической и тепловой энергии существенно отличается от тех условий, для которых они проектировались. Компетентные специалисты констатируют потери значительных долей рынков как тепловой, так и электрической энергии многими ТЭЦ в России за последние 10-12 лет. При этом общая энергетическая эффективность систем теплоснабжения проявляет тенденцию к многолетней «стабилизации» на достигнутом уровне, а в некоторых городах – к регрессу, связанному с тем, что часть потребителей переходит на свои собственные источники – котельные, которые по энергетической эффективности уступают ТЭЦ. В связи с этим, представляется важным проанализировать разработанные перспективные схемы теплоснабжения городов и предложить направление их совершенствования.

Степень разработанности темы исследования. Проблемой анализа и оценки общей энергетической эффективности систем теплоснабжения городов занимались отечественные ученые: Л.А. Мелентьев (1932-1998 гг.), Е.Э. Шубин (1964-1976 гг.), Е.Я. Соколов (1947-1998 гг.), В.Н. Папушкин (2006г. по настоящее время), Е.Г. Гаши (1988г. по настоящее время) и др. Теория анализа развития больших систем энергетики в основном складывалась на опыте анализа систем электроэнергетики в 60-е годы прошлого столетия. Системы теплоснабжения городов, как важнейшая часть систем жизнеобеспечения, достигли максимальной централизации в 70-е годы и стали объектом исследования ряда отраслевых институтов (ОАО «ВТИ», ОАО «ВНИИЭ», ОАО «ВНИПИэнергопром», ОАО «Фирма ОРГРЭС», АО «ЭНИН», «ВНИИКТЭП»). Исследования этих институтов сформировали научную методологию разработки перспективных схем теплоснабжения городов в рамках плановой экономики.

Работа по схемам теплоснабжения городских поселений была возобновлена после выхода ФЗ №190 «О теплоснабжении», а с выходом постановления Правительства РФ № 154 в 2014 году носит систематический характер. Методология разработки схем теплоснабжения должна была соответствовать рыночным условиям, и в то же время реализовать научные подходы к анализу и прогнозированию новых условий существования сложных систем теплоснабжения. Однако формирование механизмов рыночного управления развитием этих систем не завершено и продолжается в настоящее время. Методы анализа энергетической эффективности схем теплоснабжения должны адекватно отражать сложившиеся условия их существования и будущего развития, и находить пути ее улучшения при разработке схем теплоснабжения городов.

Для решения описанной проблемы необходимо исследовать факторы, влияющие на выбор источников теплоснабжения при развитии районов города, проанализировать практику разработки схем теплоснабжения городов, и на этой основе предложить методику, обеспечивающую повышение энергетической эффективности совместной работы тепловых источников города, как в сложившихся условиях, так и в долгосрочной перспективе.

Цель исследования: определить тенденции в изменении энергетической эффективности теплоснабжения городов, выявить факторы, обуславливающие роль ТЭЦ в этом, и на основе этого разработать методику выбора структуры тепловой генерации в схемах теплоснабжения городов.

Задачи, которые должны быть решены для достижения указанной цели, следующие:

- провести анализ материалов схем теплоснабжения городов для выявления тенденций и факторов, определяющих возможность повышения энергоэффективности теплоснабжения;
- обосновать критерии и процедуру выбора структуры тепловой генерации в городах, (а именно – состав и нагрузки источников тепловой энергии) для повышения энергоэффективности теплоснабжения поселения в целом;
- разработать методику *выбора структуры тепловой генерации* города по критерию *энергоэффективности*;
- провести апробацию разработанной методики для анализа энергоэффективности вариантов развития теплоисточников в схемах теплоснабжения городов.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту, заключается в следующем:

- 1) Систематизированы данные разработки планов развития теплоснабжения для городов Российской Федерации;
- 2) Исследованы тенденции и факторы, определяющие системные технико-экономические показатели совокупностей теплоснабжающих систем в сложившихся условиях становления рынков электрической и тепловой энергии;
- 3) Предложены критерий и процедура выбора структуры источников тепловой генерации с целью повышения энергетической эффективности теплоснабжения городов;
- 4) Предложен алгоритм двухэтапного отнесения потребителей к зоне теплоснабжения от ТЭЦ – на основе оценки себестоимости тепла для потребителя и критерия энергоэффективности – для совокупности всех источников;
- 5) Разработана методика выбора структуры тепловой генерации города, обеспечивающая повышение энергоэффективности теплоснабжения поселения.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется:

1. Обоснованием основных соотношений для структурных эффектов при анализе энергоэффективности совокупности источников теплоснабжения городского поселения, применимые для любого сочетания типов источников тепловой энергии. Предложен критерий оценки энергоэффективности для совокупности источников теплоснабжения. Разработана методика выбора наилучшей структуры теплогенерации в схемах теплоснабжения городов.
2. Практическая значимость результатов заключается в применении предлагаемых методических положений в практике разработки схем теплоснабжения городов, что повысит экономическую эффективность теплоснабжающих систем, что также будет содействовать реализации энергосберегающей политики в теплоснабжении.
3. Методические и практические результаты диссертации были использованы при разработке перспективных схем теплоснабжения ряда городов РФ.

Методология и методы исследований.

Методология исследований опирается на основные положения системных исследований в энергетике, анализа эффективности топливоиспользования, на обширном опыте математического моделирования систем теплоснабжения, экономику энергетики в сложившихся нормативно-правовых условиях.

Объект исследования - совокупность источников теплоснабжения города, обеспечивающих повышение энергетической эффективности теплоснабжения города в контексте развития городской застройки. *Предметом исследования* являются общая энергетическая эффективность тепловых источников города как в сложившихся условиях, так и с учетом перспектив развития городской застройки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа данных разработки планов развития систем теплоснабжения городов Российской Федерации.
2. Тенденции и факторы, определяющие системные технико-экономические показатели совокупностей теплоснабжающих систем в сложившихся условиях становления рынков электрической и тепловой энергии.
3. Предложены критерий и процедура выбора вариантов структуры тепловой генерации в совокупностях теплоснабжающих систем с целью повышения энергетической эффективности теплоснабжения.
4. Предложен алгоритм двухэтапного отнесения потребителей к зонам теплоснабжения от ТЭЦ – на основе оценки себестоимости тепла для потребителя и критерия энергоэффективности для совокупности источников.
5. Разработана методика выбора структуры тепловой генерации, обеспечивающая повышение энергоэффективности теплоснабжения.

Достоверность результатов исследований подтверждена строгим обоснованием соотношений для структурных эффектов в анализе энергоэффективности совокупностей источников теплоснабжения и использованием данных из утвержденных схем теплоснабжения городов.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; в разработке схем теплоснабжения городов; в создании методики выбора структуры тепловой генерации городов; в выявлении тенденций изменения энергоэффективности теплоснабжения городов по материалам разработки их схем теплоснабжения; в выявлении факторов, влияющих на выбор вариантов развития (модернизации) источников теплоснабжения на перспективу.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика». Работа соответствует паспорту специальности в части формулы специальности: «...объединяющая исследования по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем...сбережение энергетических ресурсов, ..., защиту окружающей среды»; в части области исследования специальности: пункту 3 «...Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов».

Апробация результатов работы. Методические результаты диссертации были использованы при разработке перспективных схем теплоснабжения городов РФ (г. Мурманск, Вологодск, Ирбит, Инта, Дербент) выполненных ООО «Научно-технический центр «ГИПРОГРАД», ООО «Невская энергетика». Докладывались при работе круглого стола Минэнерго Российской Федерации «О выборе критериев реконструкции (модернизации) ТЭЦ на новом этапе внедрения механизмов ДПМ-2» (Москва, октябрь 2017 г.); конференции «IX международная школа-семинар молодых ученых и специалистов «Энергосбережение-теория и практика», в НИУ «МЭИ» (Москва, 5 - 12 октября 2018 г.). На основе результатов работы были созданы и зарегистрированы в три программных продукта, в том числе программа для ЭВМ «Анализ структуры тепловой генерации города (поселения) по критериям энергоэффективности с учетом балансов мощности».

Публикации. По результатам выполненных исследований у автора опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК, 2 работы в изданиях, входящих в международные базы Scopus и 3 программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем 130 стр., из них: 117 стр. текста, 15 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы и обоснованы актуальность, цель, задачи исследования, научная новизна разработки. Выбрано направление исследования.

В первой главе кратко проанализированы проблемы теплоснабжения городов, новые аспекты в методах обоснования развития и реконструкции источников теплоснабжения в условиях формирования рыночных механизмов управления отраслью. Уделено внимание анализу развития централизованных систем теплоснабжения в России и возрастающей роли схем теплоснабжения городов. Обобщен опыт разработки и утверждения схем теплоснабжения, показано, что ряд проблем развития отрасли связан с необходимостью повышения энергоэффективности источников теплоснабжения. Со ссылкой на исследования других авторов показано, что формирование рыночных механизмов в сфере теплоснабжения не завершено, что не способствует повышению энергетической эффективности. При этом, в последние годы наработки российских специалистов и достижения ведущих научных школ в теории повышения энергетической эффективности теплоснабжения городов не используются в полной мере. Вследствие этого анализ энергоэффективности при разработке схем теплоснабжения городов проводится в минимальном объеме, лишь на уровне констатации текущих и ожидаемых показателей эффективности топливоиспользования. Некоторые аспекты в этом направлении требуют дополнительного исследования.

Во второй главе приведены основные соотношения, предлагаемые для анализа энергетической эффективности в совокупностях систем теплоснабжения городов и результаты их применения для наиболее крупных городов Российской Федерации на основе материалов утвержденных схем теплоснабжения.

Приняв за основу известное определение удельного расхода условного топлива - как основного показателя энергетической эффективности любой энергетической установки и системы, распространим его применение на совокупность таких систем, обеспечивающих тепловой энергией городское поселение. Тогда общий расход топлива всеми системами поселения выразится:

$$B_c = b_1 * Q_1 + b_2 * Q_2 + b_3 * Q_3 + b_4 * Q_4 + b_5 * Q_5 + \dots b_n * Q_n \quad (1)$$

где $b_1 \dots b_n$ – удельные расходы топлива на отпущенную тепловую энергию, соответственно, от каждого из источников совокупности, тут/Гкал,

$Q_1 \dots Q_n$ – отпуск тепловой энергии, соответственно, от каждой из систем, составляющих совокупность.

В самом общем случае изменение энергоэффективности совокупности выражается следующим уравнением:

$$\Delta B_c = B'_c - B_c = (b'_1 + b'_2 + \dots + b'_n) - (b_1 + b_2 + \dots + b_n), \quad (2)$$

Перейдем к обозначениям «изменений»: $\Delta Q_i = Q_i^{\cdot} - Q_i$ – изменения отпуска тепловой энергии i -той системой (источником), $\Delta b_i = b_i^{\cdot} - b_i$ – изменения удельного расхода условного топлива, соответственно i -той системой (источником); здесь «штрих» означает «после изменения», буквенное обозначения «без штриха» – «до изменения», или значение «базисного» периода с которым проводят сравнение. Введем «относительные отпуска» q_i , для вычисления которых поделим абсолютный отпуск тепловой энергии i -того источника на суммарный отпуск для всей совокупности $q_i = Q_i/Q_c$, и получим общее выражение для изменения энергоэффективности для совокупности систем (источников тепловой энергии):

$$\Delta b_c = (\Delta b_1 * q_1^{\cdot} + b_1 * \Delta q_1) + (\Delta b_2 * q_2^{\cdot} + b_2 * \Delta q_2) + \dots + (\Delta b_n * q_n^{\cdot} + b_n * \Delta q_n) \quad (3)$$

Каждая скобка в данном выражении относится к отдельной системе, входящей в совокупность систем данного поселения, и состоит из 2-х частей, каждая из которых отражает определенный характер влияния на показатель всей совокупности: первая – от изменения «экономичности» данной системы, вторая – так называемый «структурный» эффект, от изменения доли отпуска тепловой энергией данной системой.

Для совокупности положительным эффектом будет увеличение доли более экономичных систем и уменьшение доли систем, которые работают с высоким удельным расходом. Эту составляющую следует называть «структурным» эффектом: он отражает степень изменения общего (для всей совокупности систем) удельного расхода топлива при улучшении (либо ухудшении) структуры отпуска тепловой энергии от разных систем.

В проведенном исследовании показателей энергетической эффективности теплоснабжения использовались официальные данные администраций городов, численностью населения от 500 тыс. чел. и выше. Предварительный анализ показал, что удельное потребление условного топлива для теплоснабжения на жителя в крупных городах существенно разнятся: от 0,7 до 4,93 т.у.т./чел. в год.

Важно также было установить факторы, определяющие такие различия. Понятно, что на величину «удельного» потребления влияет многое: от климатических особенностей территории и рельефа местности и имеющихся на территории поселения потребителей, их видов и параметров до особенностей исторически сложившейся структуры источников тепловой энергии, условий топлив обеспечения и водоснабжения. Многие исследователи рассматривали подобную типологию, однако желательно выделить на основе укрупненных данных из схем теплоснабжения главные факторы влияния на общую энергетическую эффективность теплоснабжения городов в целом.

Для этого последовательно рассматривались и анализировались взаимосвязи различных параметров развития территорий застройки, вариантов расположения крупных и мелких источников тепловой энергии и структур тепловых сетей, обеспечивающих транспорт тепла до потребителей. Основные итоги этого исследования приводятся далее.

Приведение сводных данных по климатологическому параметру – градусо-суток отопительного периода (ГСОП) для данного региона позволило почти на порядок уменьшить разброс показателей «удельных» расходов топлива для схем разных городов, чем подтвердило влияние особенностей климата как основного определяющего фактора.

Упорядочение данных по ГСОП выявило средний уровень для большинства крупных городов, и позволило выделить группу со сравнительно высоким уровнем затрат топлива на теплоснабжение. Для большей части городов показатель имеет значение между 0,30 до 0,56 т.у.т./чел/ГСОП.

Сравнение показало (рисунок 1) также относительно высокое удельное потребление топлива для таких городов, как Краснодар, Набережные Челны, Липецк, Тольятти, Ульяновск. Эти городские поселения названы промышленно-жилимыми агломерациями (ПЖА). Удельные приведенные затраты топлива для ПЖА существенно выше, и имеет следующие значения: для Краснодара 0,72, Набережных Челнов 0,78, для Липецка 0,69, для Тольятти 0,86, для Ульяновска 0,69.

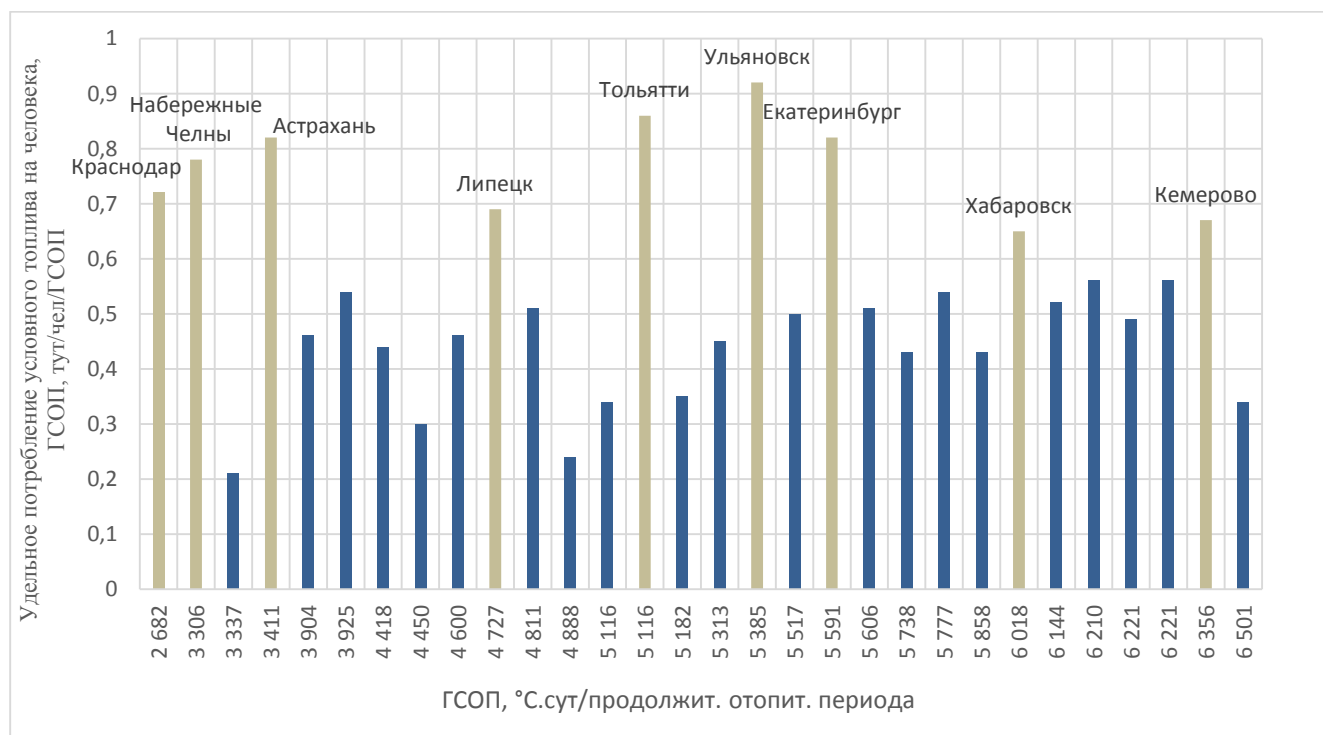


Рисунок 1. Отличие промышленно-жилых агломераций по «средней» эффективности использования топлива в системах теплоснабжения городов РФ

Сопоставление для крупных городов (включая ПЖА – промышленно-жилые агломерации) параметров, характеризующие типоразмеры, протяженности

участков тепловых сетей и соответствующие им удельные расходы энергетических ресурсов на теплоснабжение, позволило выявить и другие факторы влияния на энергоэффективность совокупностей систем теплоснабжения городов. На рисунке 2 отображены результаты сопоставления параметров тепловых сетей по величине «относительной» (удельной) протяженности тепловых сетей. Для большинства крупных городов – средний сложившийся уровень «удельной» протяженности сетей лежит приблизительно на одном уровне, и практически не изменен при существенно разном числе ГСОП. Некоторые города, отнесенные нами к группе ПЖА, имеют существенные отклонения от «среднего» уровня основной группы.

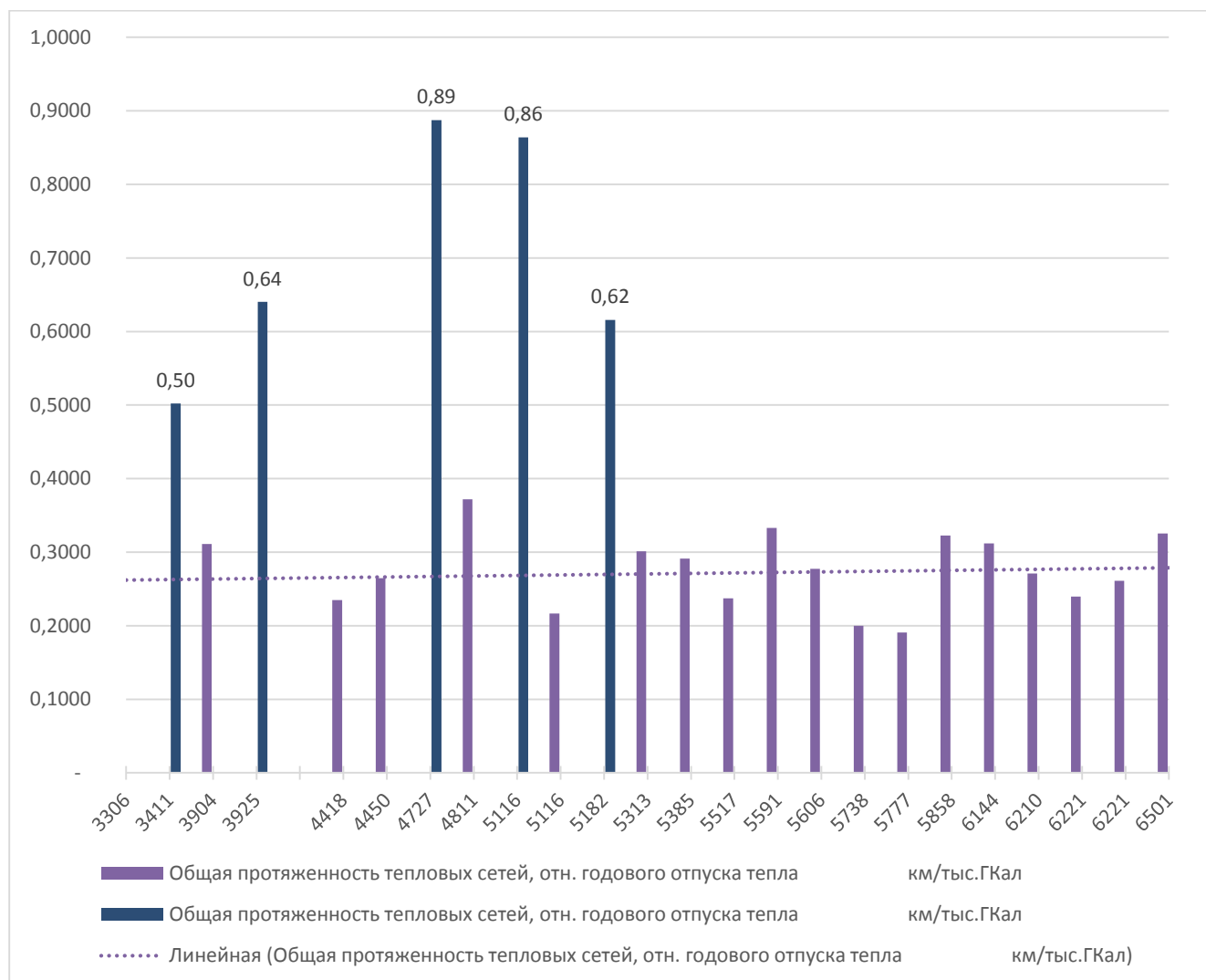


Рисунок 2. Сравнение удельной протяженности тепловых сетей для промышленно-городских агломераций и крупных городов РФ (в среднем).

Отличие ПЖА, примерами которых являются Астрахань (3411,2 ГСОП), Волгоград (3924,8), Липецк (4726,8), Тольятти (5115,6), Нижний Новгород (5181,5), в том, что «удельная» протяженность тепловых сетей в 1,5-2 раза

больше, чем в других крупных городах РФ в среднем, и, следовательно, это сказывается на показателе эффективности использования энергии топлива.

Третья глава содержит обоснование методики выбора структуры тепловой генерации, включая анализ критериев энергоэффективности, которые использовались в различных задачах проектирования, планирования, управления и анализа в централизованных системах теплоснабжения городов на различных этапах их развития. Использование системы из 2-х показателей, например, удельных расходов топлива на тепловую и электрическую энергии, используется и в отчетности ТЭЦ, и в анализе топливных и энергетических балансов. Однако это требует распределения затрат на топливо между видами продукции, что вносит произвольный элемент, и может считаться искусственным приемом, не отражающим физическую природу технологических процессов.

Изменение условий функционирования источников теплоснабжения привело к тому, что появились предложения по «дополнениям» известных критериев энергоэффективности, которые были направлены: одни – на комплексный учет выработки как электрической, так и тепловой энергии, другие – для учета внедренных «рыночных» механизмов выбора источников генерации (гл. образом – электрической энергии). Однако эти предложение не затрагивают принципиального момента – они не оценивают общую энергетическую эффективность выработки тепловой и электрической энергии различными типами источников энергии.

Для практического использования в современных условиях формул Соколова Е.Я. была проведена серьезная работа в ВТИ (Папушкиным В.Н.), что позволило развить и дополнить известный теоретический подход к обоснованию зон теплоснабжения от централизованных источников. В работах Плахуты А.В. и Ахметовой И.Г. показана относительность этой категории в условиях неравномерной плотности застройки в крупных городах. В данной работе предлагается дополнить оценочную категорию радиуса эффективного теплоснабжения (РЭТ) критерием оценки общей энергетической эффективности для совокупности всех источников тепловой энергии города.

При разработке планов развития городов и схем их теплоснабжения обязательной является оценка энергетической эффективности, и для этого должен использоваться показатель, показывающий соотношение выработки электроэнергии на тепловом потреблении и суммарной подключенной тепловой нагрузки городов. В качестве инструмента такой оценки при выборе структуры тепловой генерации в схеме теплоснабжения города предлагается использовать соотношение:

$$q_{mf}^s = \frac{\sum \alpha Q_{НАГР}^{ТЭЦ}}{\sum [\alpha Q_{НАГР}^{ТЭЦ} + (1 - \alpha) Q_{НАГР}^{ТЭЦ}] + \sum Q_K} \quad (4)$$

α – коэффициент теплофикации, отражает влияние на энергоэффективность теплофикационной нагрузки, покрываемой из отборов турбин,

$Q_{НАГР}^{ТЭЦ}$ – отпуск тепловой энергии от i-той ТЭЦ города, Гкал/год;

Q^K – отпуск тепловой энергии от j-той котельной города, Гкал/год.

Это отношение фактически эквивалентно сумме всех структурных эффектов (вторые части двучленов выражения (3)) для ТЭЦ города: чем больше это значение – тем большая доля тепловой энергии в городе вырабатывается в комбинированном цикле. Тем самым создается главная предпосылка для увеличения объема выработки тепловой и электрической энергии в комбинированном (теплофикационном) цикле. Критерий (4) – безразмерная величина; для систем, в которых нет ТЭЦ, его значение равно нулю. При появлении теплофикационных агрегатов на котельных (например, ГПУ для обеспечения локальных нужд теплофикации) значение этого показателя отлично от нуля, и также характеризует «уровень теплофикации» по совокупности тепловых источников города.

Сумма в числителе этого выражения (для каждого отдельного источника) может быть умножена на W – удельную выработку электрической энергии на базе отпуска данного тепла из отборов турбин (МВт-ч/Гкал). Таким путем возможен переход к параметру «энергоэффективности»:

$$\mathcal{E}_c = \frac{\sum w \alpha Q_{НАГР}^{ТЭЦ}}{\sum [\alpha Q_{НАГР}^{ТЭЦ} + (1 - \alpha) Q_{НАГР}^{ТЭЦ}] + \sum Q_K} \quad (5)$$

w – удельная выработка электрической мощности на тепловом потреблении, прочие обозначения соответствуют (4);

$\mathcal{E}_c$ – отношение годовой выработки электроэнергии в теплофикационном цикле ТЭЦ к суммарному годовому отпуску тепловой энергии от всех тепловых источников города.

В физическом понимании это значение показывает «удельную» выработку электроэнергии, полученной комбинированным способом на всех ТЭЦ рассматриваемой территории, приходящуюся на единицу суммарного тепла, выработанного ТЭЦ и котельными поселения.

Итоговым критерием выбора структуры тепловой генерации является минимум целевой функции – суммы приведенных затрат: в существующие и дополнительно сооружаемые источники теплоснабжения, затраты в сети энергоснабжения (в необходимых для теплоснабжения объемах), а также затраты

на дополнительную электроэнергию, что обеспечивает приведение вариантов к сопоставимому виду по энергетическим эффектам:

$$Z_{ИТ} + Z_{ТС} + Z_{ДЭ} \rightarrow \min \quad (6)$$

Здесь $Z_{ИТ}$ - затраты в источники тепла, $Z_{ТС}$ - затраты в тепловые сети, $Z_{ДЭ}$ - затраты на электроэнергию, затрачиваемую на перекачку теплоносителя по системе в каждый период по каждому из рассматриваемых вариантов развития системы.

При сравнении структур тепловой генерации, отличающихся распределением перспективной нагрузки между разными источниками тепловой энергии, кроме разницы в капитальных затратах и общей энергоэффективности необходимо учитывать дополнительные затраты электроэнергии на транспорт теплоносителя. Затраты на дополнительную электроэнергию ($Z_{ДЭ}$) - представляют собой стоимость электроэнергии, обеспечивающей приведение вариантов к равному энергетическому эффекту.

Система условий и ограничений включает наряду с общепринятыми проверками материальных и энергетических балансов, известными техническими ограничениями (на давления теплоносителя в узлах, на скорости течения теплоносителя по участкам тепломатриалей, на необходимые располагаемые перепады давления теплоносителя на вводах потребителей, на предельные мощности источников тепловой энергии и др.) здесь обоснованные замыкающие соотношения: балансы как по тепловой, так и по электрической мощности совокупности источников:

$$\sum_{j \in J_2} Q_j = Q; \quad \sum_{j \in J_2} P_j = P \quad (7) \text{ и } (8)$$

$$\phi \leq Q_j \leq \overline{Q_j}, \quad j \in J_2; \quad \phi \leq P_j \leq \overline{P_j}, \quad j \in J_2 \quad (9) \text{ и } (10)$$

Введение критерия по энергоэффективности совокупности всех теплоисточников города (5) и учет дополнительных ограничений (7) - (10) существенно изменяет процедуру анализа и обоснования наилучшей структуры тепловой генерации для сложившихся в городе условий и на перспективу, и является основанием для построения комплексной методики, которая реализуется в комплексе алгоритмов и программ, структура которого приведена далее.

Укрупненная блок-схема взаимосвязей алгоритмических блоков, обеспечивающих процедуры анализа и оценки вариантов совместной работы источников теплоснабжения при развитии городского поселения, показана на рисунке 3. Предлагаемые отличия в методологии реализованы в блоках, защищенных соответствующими авторскими свидетельствами.

Рисунок 3. Особенности включения процедуры оценки тепловой генерации по энергоэффективности в алгоритм обоснования схем теплоснабжения городов (цветом выделены блоки программ, защищенных свидетельствами)



Далее (в таблице 1) проведено сравнение разработанной методики с действующим регламентом, отражающее отличия и особенности предлагаемого подхода. Основным отличием является включение процедуры ранжирования (оценки вариантов) по критерию энергоэффективности (5) и проверки соблюдения условий (7-10).

Таблица 1. Сравнение ключевых блоков предлагаемой методики с действующим регламентом выбора структуры тепловой генерации

Действующий РЕГЛАМЕНТ	Предлагаемая МЕТОДИКА
Определение прироста тепловой нагрузки района перспективной застройки	Определение прироста тепловой нагрузки района перспективной застройки
Определение РЭТ*	Проверка РЭТ + ранжирование источников по показателю энергоэффективности
Определение параметров участков тепловых сетей	Определение параметров участков тепловых сетей ПО ВАРИАНТАМ
Определение резервов по пропускной способности существующих тепловых сетей для приростов нагрузки	Определение резервов ПО ИСТОЧНИКАМ и по пропускной способности существующих тепловых сетей для приростов нагрузки
Составление балансов тепловой мощности	Составление балансов тепловой и ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ мощности
Определение совокупных затрат для первого и второго вариантов развития системы теплоснабжения	Определение совокупных затрат для ВСЕХ ЭФФЕКТИВНЫХ вариантов развития системы теплоснабжения

*РЭТ – радиус эффективного теплоснабжения

Выбор наилучшего варианта структуры тепловой генерации в рамках разработки/актуализации схемы теплоснабжения позволит снизить топливные затраты на расчетный период в границах территории и, соответственно, на душу населения.

В четвертой главе приведены результаты апробации разработанной методики для ряда крупных городов РФ (с населением более 500 тыс. чел.). Интегральные показатели, приводимые в сводных таблицах схем теплоснабжения городов, отражают существующее положение в сфере теплоснабжения. Такое детальное рассмотрение общих показателей теплоснабжения крупных городов позволило выявить следующее: относительно высокий уровень затрат топлива на удовлетворение нужд теплоснабжения выявляется как в городах с относительно теплым климатом, так и расположенных в Сибири и Северных регионах России.

Можно проследить основную тенденцию в городах с долей покрытия тепловых нагрузок от ТЭЦ, более 65 % - энергоэффективность устойчиво выше (на 10-30 %). На сравнительном графике (Рисунок 4), отражающим суммарные годовые показатели разных городов РФ в такой группе городов (ряд 2) удалось сохранить долю выработки тепловой энергии на ТЭЦ свыше 65 %.

Не смотря на разные климатические условия, за счет значительной доли отпуска тепловой энергии от ТЭЦ удельная выработка теплофикационной

электрической энергии существенно выше, чем в аналогичных климатических условиях, но с меньшей долей отпуска тепла от ТЭЦ.

Сравнение данных по 16 городам подтверждает результативность методики выбора структуры тепловой генерации при разработке схем теплоснабжения городов на перспективу.

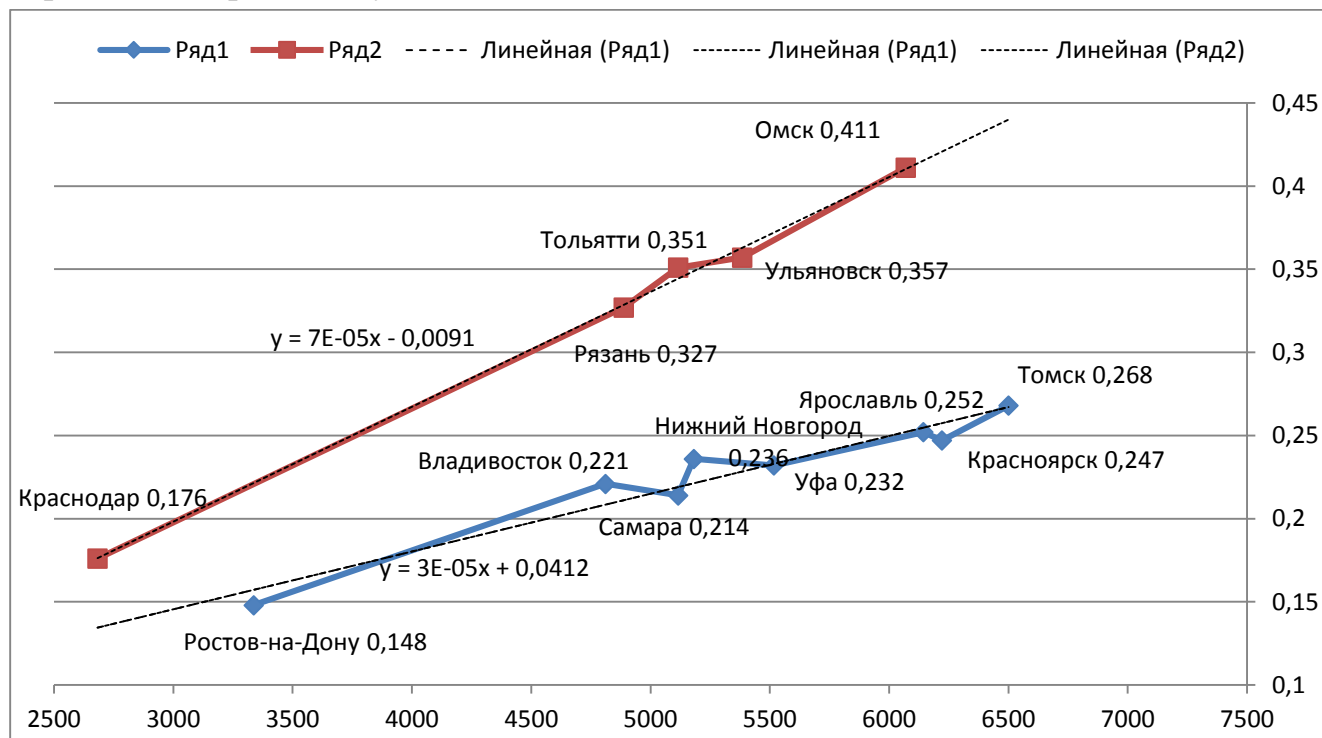


Рисунок 4. Сравнение энергоэффективности по удельной выработке теплофикационной электроэнергии городов РФ (ряд 2), сохранившим превалирование ТЭЦ ($q_{\text{ТЭЦ}} > 60\%$) в покрытии суммарных тепловых нагрузок города

Применение этой методики на уровне районов Нижнего Новгорода позволило получить существенные эффекты в энергоэффективности теплоснабжения этих районов путем перенесения тепловых нагрузок с неэффективных котельных на существующую крупную ТЭЦ (таблица 2).

Таблица 2. Результаты апробации методики выбора структуры тепловой генерации в схеме теплоснабжения районов Нижнего Новгорода

Район города	Наименование ТЭЦ	Уд. расход топлива для ТЭЦ, кг.у.т./Гкал	Кол-во котельных	Уд. расход топлива для котельных, кг.у.т./Гкал	Годовой расход топлива (по всем источникам, т.у.т.)		Изменение энергоэффективности, т.у.т.
					до	после	
Сормовский	Сормовская ТЭЦ	152	11	168-172	19 880	18 764	117
Автозаводский	Автозаводская ТЭЦ	154	4	174-176	36 880	34 540	2 340
Нагорный	Нижегородская ТЭЦ	150	16	164	421 090	417 670	3 421

В городах, где сохранено превалирование теплофикации (как в по структуре загруженных теплоисточников, так и по структуре отпуска тепловой энергии от ТЭЦ) – уровень топливных затрат на 7 – 12 % ниже аналогичных систем, которые эксплуатируются в похожих условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ материалов схем теплоснабжения крупных городов России подтвердил тенденцию снижения общей энергетической эффективности теплоснабжения, а – в качестве причины - действие основного фактора: «котельнизации» городов при планировании развития и модернизации источников теплоснабжения.
2. Обоснованы соотношения для анализа энергетической эффективности совокупности систем теплоснабжения городов на предпроектной стадии выбора вариантов развития в схемах теплоснабжения городов. Применение соотношений показало, что снижение доли отпуска тепловой энергии от источников с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии происходит из-за отдельного анализа тепловых и электрических балансов региона.
3. Анализ энергетической эффективности источников теплоснабжения в схемах теплоснабжения 28 крупных городов России показал следующее: удельное потребление условного топлива на одного жителя для большинства крупных городов России (приведенное к ГСОП) – в диапазоне: от 0,30 до 0,56 т.у.т./чел/ГСОП. Отличие ПЖА по макропараметрам энергетической эффективности объясняется относительно бóльшей удельной протяженностью тепловых сетей. Для городов этой группы (ПЖА) характерно: увеличенная в сравнении с другими городами доля магистральных и транзитных трубопроводов в сетях; относительно бóльшие диаметры участков сетей (в среднем на 5-8%).
4. С учетом полученных результатов разработана методика выбора структуры тепловой генерации городов, отличающаяся применением дополнительного критерия энергоэффективности (5) и системой учитываемых ограничений по энергетическим балансам региона.
5. Разработанная методика выбора структуры тепловой генерации апробирована при анализе схем крупных городов РФ. Эффективность (по районам и в целом по городу) составила от 16,5 млн. до 180,0 млн. рублей в год. Применение разработанной методики позволит повысить энергетическую эффективность имеющихся ресурсов ТЭЦ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные материалы диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

1. Кикоть Е.А. Эффективность использования топлива в городах РФ (по материалам схем теплоснабжения) / Кикоть Е.А. // Международный технико-экономический журнал – 2018. - №12. – с. 107-114.
2. Кикоть Е.А. Оценка показателей технико-экономической эффективности теплофикации в современных условиях // Кикоть Е.А., Ситас В.И., Федюхин А.В., Деревянко О.В // Computational nanotechnology. – 2018. - №2 – с. 91-97.
3. Кикоть Е.А. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения // Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – т. 22, №5 – с. 71-82.

В сборниках научных трудов и материалах конференций, входящих в международные базы «Scopus»:

4. Kikot E.A. Assessment of technical and economic efficiency indicators of cogeneration in modern market conditions // Kikot E.A., Sitas V.I., Fedyukhin A.V., Akhmetova I.G., Mitrofanov A., Makoev S.O., Asadpoori A., Sinitsyn A.A. // International Journal of Civil Engineering and Technology – 2019 - Том 10, №2 - с.2106-2117.
5. Kikot E.A. Flexible allocation of costs between electricity and heat as a factor for improving the CHP competitiveness // Kikot E.A., Sukhareva E., Fedyukhin A.V., Matisov B.G., Nikitkov N.V., Izrantsev V.V., Knorring V.G., Kondrashkova G.A., Akhmetov T.R., Sinitsyn A.A. // статья в сборнике трудов конференции «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science». – 2019 - с.12079.

В прочих сборниках научных трудов и материалах конференций:

6. Кикоть Е.А. Эффективность использования топлива в городах РФ (по материалам схем теплоснабжения) / Кикоть Е.А., Косяков С.А. // статья в сборнике трудов конференции «Энергосбережение – теория и практика». – 2018 - с. 550-556.

Зарегистрированные программные продукты:

1. Кикоть Е.А. Программа для ЭВМ «Анализ структуры тепловой генерации города (поселения) по критериям энергоэффективности с учетом балансов мощности». - ООО «Невская Энергетика», Гос.рег.№2019663917 от 25.10.2019 г.
2. Кикоть Е.А. Программа для ЭВМ «Программа для расчета нормативов удельного расхода топлива и нормативов запаса топлива для котельной». - ООО «Невская Энергетика», Гос.рег.№2019663918 от 25.10.2019 г.
3. Кикоть Е.А. Программа для ЭВМ «Программа для расчета нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя». - ООО «Невская Энергетика», Гос.рег.№2019663919 от 25.10.2019 г.