

На правах рукописи



Владимиров Ярослав Александрович

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
БИВАЛЕНТНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УТИЛИЗАЦИИ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
член-корр. РАН
Сергеев Виталий Владимирович

Официальные оппоненты: **Ахметова Ирина Гареевна**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Казанский государственный энергетический
университет», г. Казань, заведующий кафедрой
«Экономика и организация производства»

Яворовский Юрий Викторович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва, заведующий кафедрой
промышленных теплоэнергетических систем

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново

Защита диссертации состоится «29» января 2019 г. в 18.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 411

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

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

и.о. учёного секретаря
диссертационного совета Д 212.229.04
д.т.н.



А.В. Митяков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ряд законов и постановлений, принятых на федеральном уровне в последнее десятилетие, определил порядок и формы реализации Энергетической стратегии России. В частности, новым её элементом является необходимость разработки *индивидуальных планов развития систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) для всех поселений и городских округов Российской Федерации на пятнадцатилетний период с ежегодной их актуализацией*. Одновременно на стадии проектирования требуется в полной мере оценивать возможности использования местных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР): органосодержащих отходов, твердых коммунальных отходов (ТКО). В этой связи растёт интерес к комбинированным (бивалентным) системам, где традиционный источник энергии дополняется местным.

Степень разработанности темы исследования. Развитие СЦТ нашло широкое отражение в трудах Л. А. Мелентьева, М. А. Стыриковича, Е. Я. Соколова, Н. М. Зингера, А. И. Андрющенко, Д. П. Гохштейна, В. Г. Семенова, В. Н. Папушкина, И. Г. Ахметовой, П. В. Ротова и др.; проблемы обращения с органосодержащими отходами детально изучались М. П. Фёдоровым, Л. С. Венцюлисом, О. В. Горбатюком, П. В. Дарулисом, А. В. Зинченко, В. И. Масликовым, А. Н. Мирным, Е. Г. Сёминим, А. В. Черемисиным, R. Kossu, R. Stegmann и др. Однако энергетические установки, использующие отходы, рассматриваются преимущественно как автономные (В. В. Померанцев, В. В. Сергеев, Р. Ш. Загрутдинов, В. М. Зайченко, Г. В. Ильиных, Г. А. Рябов, Н. Ф. Тимербаев, А. Н. Тугов и др.), пути интеграции энергетических установок на местных видах топлива в системы централизованного теплоснабжения с традиционными источниками тепловой энергии остаются малоизученными, что определяет необходимость соответствующих исследований.

Цель работы – *совершенствование систем централизованного теплоснабжения на основе бивалентных технологий с использованием*

энергетической утилизации органосодержащих отходов. Для её достижения поставлены и решены **следующие основные задачи:**

1. Обобщить накопленный в 2013-2017 гг. опыт разработки схем теплоснабжения для поселений и городских округов Российской Федерации, установить обобщённые характеристики СЦТ, способствующие унификации дальнейших расчетов.
2. Определить тепловой эквивалент ТКО для теплоснабжения поселений и городских округов Российской Федерации.
3. Разработать режимы эксплуатации бивалентных СЦТ, обеспечивающие максимальную экономию энергетических ресурсов и повышение качества теплоснабжения.
4. Разработать и апробировать методику предпроектной оценки технико-экономических показателей бивалентных СЦТ.
5. Разработать научно-методические рекомендации по предпроектному технико-экономическому расчету бивалентных СЦТ с использованием энергетической утилизации ТКО.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. На основе систематизации и обобщения накопленного опыта разработки схем теплоснабжения для поселений и городских округов Российской Федерации установлены обобщённые технико-экономические характеристики СЦТ, способствующие унификации предпроектных расчетов.
2. Впервые определены значения теплового эквивалента ТКО в СЦТ для ряда населённых пунктов Российской Федерации;
3. Предложен оптимальный режим работы бивалентной СЦТ, обеспечивающий максимизацию загрузки наиболее эффективного источника за счёт организации переменной зоны действия источников теплоснабжения, и новый метод расчета расхода теплоносителя в тепловой сети в зависимости от температуры наружного воздуха;
4. Предложена методика предпроектной оценки технико-экономических показателей бивалентных СЦТ;

5. В результате сравнительного технико-экономического расчета (на примере г. Петрозаводска) доказана целесообразность организации бивалентных СЦТ.

Теоретическая значимость работы определяется тем, что:

1. Сравнительными технико-экономическими расчётами на основе реальных характеристик городского поселения (г. Петрозаводск) показано, что бивалентные СЦТ, использующие местные топлива, при определённых условиях могут быть более рентабельны, чем традиционные СЦТ; обоснована целесообразность распространения подобных исследований на другие регионы страны.
2. Предложенные методики расчёта создают научно-методическую основу для дальнейших расчётно-теоретических исследований бивалентных СЦТ с различными видами местных топлив, в том числе и комбинированных, а также иных видов нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НиВИЭ);
3. Совокупность предложенных алгоритмов создает научно-методическую основу для разработки элементов программных комплексов и регламентов на проектирование схем теплоснабжения для всех поселений и городских округов Российской Федерации.

Практическая значимость работы.

1. Предложенные методики расчёта и рекомендации могут быть использованы при проектировании бивалентных СЦТ, а также при разработке схем теплоснабжения.
2. Определены требования к заказчику по содержанию и объёму исходных данных на проектирование бивалентных СЦТ.
3. Результаты работы используются ООО «Невская энергетика» и ООО «Научно-технический центр «ГИПРОград» при разработке документации стратегического планирования муниципальных образований Российской Федерации (акты о внедрении результатов диссертации).

Методология и методы исследования. В процессе исследования применялись методы математического моделирования, математического анализа, экспертных оценок, прогнозирования. Эмпирическую базу

исследования составили фактические данные, предоставленные ресурсоснабжающими организациями в рамках разработки 11 схем теплоснабжения поселений и городских округов различных регионов Российской Федерации, законодательные акты и другие нормативно-правовые документы. Для проведения гидравлических расчетов был применен программный комплекс САПР «Zulu».

Объект исследования – системы централизованного теплоснабжения;

Предмет исследования – применение энергетической утилизации твердых коммунальных отходов в составе систем централизованного теплоснабжения.

На защиту выносятся: результаты обобщения данных разработки схем теплоснабжения для поселений и городских округов Российской Федерации; новый режим работы бивалентной СЦТ, обеспечивающий максимум энергосбережения за счёт переменной зоны действия нетрадиционного источника, определяемой значением температуры наружного воздуха; результаты расчетов теплового эквивалента ТКО в СЦТ для ряда населённых пунктов Российской Федерации; методика расчёта предпроектных технико-экономических показателей бивалентных СЦТ и результаты ее апробации; результаты сравнительного анализа технико-экономической эффективности моновалентных и бивалентных СЦТ на примере г. Петрозаводска.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается тем, что в своих предпосылках автор использует достаточно хорошо апробированные экспериментальные данные, полученные на натуральных объектах (СЦТ, установках по переработке ТКО, газогенераторах и др.), а в расчётах и математических моделях исходит из общепризнанных физических представлений и созданных на их основе методах теплофизического анализа.

Личный вклад автора заключается в постановке задачи исследования, все результаты получены лично автором, а расчёты, проектные и научно-исследовательские работы, явившиеся содержанием диссертации, осуществлялись под его руководством и при непосредственным его участии.

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 диссертации. Основные результаты работы докладывались на: Международной научно-практической конференции «Зеленое строительство 2016» (Санкт-Петербург, 29 сентября – 01 октября 2016 года); Научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 14-19 ноября 2016 года); Заседании комиссии по рассмотрению проектов схем теплоснабжения поселений, городских округов с численностью населения пятьсот тысяч человек и более, а также городов федерального значения под председательством заместителя Министра энергетики Российской Федерации В.М. Кравченко (Москва, 21 декабря 2016 г.); Научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 13-19 ноября 2017 года); II международной научно-технической конференции «Энергетические системы» (Белгород, 23-24 ноября 2017 года); Семинаре кафедры «Атомная и тепловая энергетика» ФГАОУ ВО СПбПУ (Санкт-Петербург, 29 мая 2018 года).

Материалы работы используются в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого при проведении занятий по дисциплинам: «Теплофикация и теплоснабжение», «Возобновляемые источники энергии и установки утилизации низкопотенциальной теплоты» и «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях».

Публикации. По результатам выполненных исследований у автора опубликовано 11 работ, в т. ч. 3 в изданиях из перечня ВАК.

Структура и объём диссертации: диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 102 источника, в том числе 14 зарубежных. Дополнительный материал и сведения о внедрении сведены в 6 приложений. Основной текст изложен на 121 с., снабжён 32 илл. и 15 табл.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и недостаточная степень её разработанности, формулируются цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту. Даны сведения о методологии, степени достоверности результатов, апробации и внедрении результатов исследования.

Глава 1 посвящена обоснованию цели и задач исследования на основе краткого анализа совокупности научно-технических проблем, связанных с разработкой схем теплоснабжения, и научных предпосылок для развития бивалентных СЦТ.

При комплексном решении объективных проблем в области теплоснабжения, поставленных «Энергетической стратегией России на период до 2030 года», проектировщики сталкиваются как с типовыми задачами по повышению эффективности работы систем, так и с уникальными задачами, к последним зачастую относится распределение нагрузки между источниками, работающими на одну сеть, с учетом необходимых реконструкций и технико-экономических показателей как источников в отдельности, так и всех СЦТ поселения.

В последнее время появились исследования, связанные с решением круга вопросов, возникающих при разработке схем теплоснабжения в современной постановке, такие как: оптимальное распределение тепловой нагрузки между ТЭЦ и котельными; пути оптимизации зон действия источников тепловой энергии; вопросы оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий; использование НиВИЭ; применение того или иного вида теплоснабжения на базе рассматриваемого источника; выбор показателей

эффективности, определяющих централизацию теплоснабжения на всей территории города и т. п. Системам централизованного теплоснабжения, работающим исключительно на возобновляемых источниках энергии, посвящены многие публикации. Однако вопросы использования местных топлив в СЦТ не выходят обычно за рамки автономных источников. Аналогичные комплексные исследования для бивалентных СЦТ, насколько нам известно, до сих пор отсутствуют.

Из всего многообразия местных топлив следует выделить отходы переработки древесины и твёрдые коммунальные отходы. Для оценки перспектив использования местных топлив в бивалентных СЦТ представляют главный интерес такие характеристики как ресурсы, топливный потенциал, экологическое воздействие и стоимость. Суммарный топливный потенциал только отходов лесозаготовок и деревообработки находится в диапазоне значений 19 – 34 млн. т/год, и по самой ориентировочной оценке позволяет обеспечить около 15 % топливной потребности всех СЦТ страны. Твёрдые коммунальные отходы, в отличие от древесных отходов, топливом можно считать весьма условно, однако, место образования ТКО непосредственно совпадает с зоной СЦТ, что определяет целесообразность рассмотрения ТКО в качестве дополнительного топливного ресурса теплоснабжения, позволяющего одновременно решать задачи экологии.

В последнее время быстро развиваются технологии создания из предварительно обработанных ТКО топлива с высокими потребительскими качествами: “refuse-derived fuel” (RDF). Выход RDF в зависимости от страны и технологии варьируется в пределах 25-50 % от массы ТКО, теплота сгорания превышает 12 000 кДж/кг.

Теория тепловых процессов соответствующих установок разработана в достаточном для инженерных расчётов объёме, однако подобные установки преимущественно работают автономно, сочетание их с СЦТ пока требует специального анализа.

В главе 2 приводятся методические основы исследования, описывается методика определения теплоты сгорания ТКО, оценивается их тепловой эквивалент, рассматривается опыт разработки схем теплоснабжения поселений, приводятся результаты экспериментальной оценки объема образования ТКО на примере г. Петрозаводска.

Бивалентные системы централизованного теплоснабжения, согласно определению, предусматривают наличие и совместное использование двух источников тепловой энергии: основного – это обычно ТЭЦ или крупная котельная (традиционный источник), и дополнительного – как правило, это распределённая теплоэнергетическая установка или котельная, применительно к настоящему исследованию, использующая различные местные виды топлива (нетрадиционный источник).

В качестве характеристики энергетической связи нетрадиционного источника с традиционным в бивалентной СЦТ вводится новое понятие *степени бивалентности* W , представляющей отношение максимальной тепловой нагрузки нетрадиционного источника Q_n , к общей максимальной тепловой нагрузке бивалентной системы Q_Σ :

$$W = \frac{Q_n}{Q_\Sigma} = \frac{Q_n}{Q_n + Q_{mp}}, \quad (1)$$

Данная характеристика достаточно универсальная и может рассматриваться применительно к любому нетрадиционному источнику, а также их совокупности. В случае использования ТКО в качестве топлива для нетрадиционного источника, полезная мощность энергетической установки будет определяться зависимостью:

$$N_{\text{пол}} = \eta \frac{J \cdot G_{\text{ТКО}} \cdot Q_n^p}{3600 D}, \quad (2)$$

где η - КПД преобразования энергии в установке; $G_{\text{ТКО}}$ - общая масса ТКО, собираемая в течение года, кг; J - коэффициент снижения массы ТКО; D - число часов работы в год, Q_n^p - низшая рабочая теплота сгорания ТКО, кДж/кг. Термодинамическая эффективность бивалентных СЦТ будет в значительной

степени зависеть от теплоты сгорания топлива (Q_n^p), максимальной температуры горения ($T_{гор}$) и ресурса местного топлива (G_n). Объем накопления ТКО определяют исходя из утвержденных нормативов, которые не учитывают динамично возрастающее количество отходов, требуют постоянной корректировки. В этой связи элементы упрощённой методики определения величины $G_{ТКО}$ отработывались нами экспериментально на примере г. Петрозаводска. Для Петрозаводска определена норма накопления 280 кг/чел в год. Для остальных населённых пунктов нормы накопления ТКО получена в диапазоне 1,9...1,3 м³/чел. в год.

Для оценки ресурсной базы ТКО введена характеристика «тепловой эквивалент ТКО»:

$$Q_{ТКО} = J \cdot G_{ТКО} \cdot Q_n^p, \quad (3)$$

Обобщение экспериментальных данных ОАО «Завод ТО ТБО» показало, что теплота сгорания ТКО находятся в диапазоне от 5024 кДж/кг до 9211 кДж/кг, средняя теплота сгорания составляет 6700 кДж/кг. Расчётный анализ показал, что в зависимости от климатической зоны и спроса на тепловую энергию для рассмотренной группы городов за счёт утилизации ТКО может быть покрыто от 2 до 8,6% общей потребности в тепловой энергии. В диссертации даны алгоритмы определения теплофизических характеристик и свойств (теплоты сгорания, плотности ρ , температуры горения $t_{гор}$, теплоёмкости и показателя адиабаты k) ТКО в зависимости от способа энергетической утилизации. Пример расчётных значений теплофизических характеристик и свойств, полученных для биогаза различного состава дан в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства и характеристики биогаза разного состава

Состав газовой смеси	Q_n^p , кДж/м ³	ρ , кг/м ³	$t_{гор}$, °С	k
СН ₄ - 40%, СО ₂ – 60%	14 344	1,476	2225	1,3
СН ₄ - 70%, СО ₂ – 30%	25 102	1,098	2560	1,3
СН ₄ – 33%, СО ₂ – 60%, Н ₂ О – 7%	11 834	1,48	1702	1,3
СН ₄ – 63%, СО ₂ – 30%, Н ₂ О – 7%	22 592	1,10	1968	1,3

Осуществлено сравнение топливных свойств биогаза и генераторного газа различных составов, полученных из ТКО; приводится сопоставление топливных свойств этих газов со свойствами газов промышленного применения (природного, коксового, полукоксowego, доменного, сланцевого).

На основе анализа разработанных схем теплоснабжения для систематизации СЦТ были выбраны следующие характеристики для их оценки: плотность тепловой нагрузки (q); относительная протяженность тепловых сетей (\bar{L}), отношение полезного отпуска тепловой энергии к тепловой нагрузке (ξ), степень централизации систем теплоснабжения (β).

Глава 3 посвящена разработке методик предпроектной оценки отдельных характеристик бивалентных СЦТ с использованием ТКО. Приведен алгоритм расчёта технико-экономических показателей СЦТ с изменениями и дополнениями, обусловленными наличием дополнительного источника.

Очевидно, что в бивалентной СЦТ нетрадиционный источник, как наиболее эффективный, должен быть максимально загружен. Для реализации такой возможности предлагается создание динамичной зоны действия источников тепловой энергии, где в зависимости от температуры наружного воздуха регулирование отпуска тепловой энергии потребителю будет происходить за счет изменения температуры теплоносителя, то есть качественно. При этом температура теплоносителя в тепловой сети определяться формулами:

$$\tau_1 = t_{e.p.} + (\tau_1' - t_{e.p.}) \cdot \left(\frac{t_{e.p.} - t_n}{t_{e.p.} - t_{n.o}} \right), \quad (4)$$

$$\tau_2 = t_{e.p.} + (\tau_2' - t_{e.p.}) \cdot \left(\frac{t_{e.p.} - t_n}{t_{e.p.} - t_{n.o}} \right), \quad (5)$$

где τ_1, τ_2 - соответственно, температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, °С; $t_{e.p.}$ - расчетная температура внутреннего воздуха, t_n - текущая температура наружного воздуха, °С; $t_{n.o}$ - расчетная температура наружного воздуха, °С; τ_1', τ_2' - значение температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах соответственно при $t_{n.o}$, °С.

Для обеспечения соответствия параметров горячего водоснабжения санитарным нормам, в температурном графике предполагается нижняя срезка. На основании исследования математических моделей СЦТ, приведенного в диссертации, оптимальным температурным графиком работы тепловой сети является 110/70 °С.

Возможность организации динамичной зоны действия источников в бивалентной СЦТ обеспечивается за счет переменного расхода теплоносителя на тепловых выводах источников. Расход определяется текущей нагрузкой нетрадиционного источника Q_H и рассчитывается по следующим формулам:

$$G_H = \frac{Q_H}{c \cdot (\tau_1 - \tau_2)}, \quad (6)$$

$$G_{TP} = \frac{Q_{TP}}{c \cdot (\tau_1 - \tau_2)} = \frac{(Q_{\Sigma} \cdot ((1 - \alpha) \cdot \frac{(t_{e.p} - t_n)}{(t_{e.p} - t_{n.o})} + \alpha) - Q_H)}{c \cdot (\tau_1 - \tau_2)}, \quad (7)$$

где $\alpha = \frac{Q_{ГВС}}{Q_{сумм}}$ - доля нагрузки ГВС в общей нагрузке системы, c – удельная

теплоемкость теплоносителя, кДж/кг·°С. Данные выражения справедливы при наличии циркуляции теплоносителя в тепловой сети и потреблении тепловой энергии, т.е. при $\tau_1 > \tau_2$.

При проектировании бивалентной СЦТ важным фактором является степень бивалентности W . Граничным условием при проектировании является максимизация загрузки нетрадиционного источника. Условие максимизации – при начале отопительного периода ($t_n = +8^\circ\text{C}$) нетрадиционный источник должен быть полностью загружен. Предельная степень бивалентности, при которой обеспечивается максимальная постоянная нагрузка на нетрадиционном источнике в течение отопительного периода определяется по формуле:

$$W_{\max} = \alpha + (1 - \alpha) \cdot \frac{(t_{e.p} - 8)}{(t_{e.p} - t_{n.o})}, \quad (8)$$

На предпроектной стадии материальная характеристика тепловых сетей и их протяженность могут быть определены по следующим зависимостям:

$$M_{y\partial} = \frac{A}{G^{0,038} \cdot q_B^{0,473} \cdot q^{0,139} \cdot z^{0,116} \cdot R_l^{0,19}}, \quad (9)$$

$$L_{y\partial} = \frac{B}{G^{0,091} \cdot q_B^{0,446} \cdot q^{0,473} \cdot z^{0,095}}, \quad (10)$$

где $M_{y\partial}$ – удельная материальная характеристика ($M_{y\partial} = \frac{M}{G}$), м²/кг/с; $L_{y\partial}$ – удельная протяженность тепловых сетей ($L_{y\partial} = \frac{L}{G}$), м/кг/с; A=35, B=33,3 – постоянные коэффициенты; q_{∂} – удельная водоплотность района, кг/с/га; z – коэффициент, учитывающий конфигурацию площади застройки; R_l – удельное падение давления в тепловой сети, Па/м.

Для бивалентной системы теплоснабжения в качестве расхода теплоносителя следует подставлять условный суммарный расход на тепловыводах источников, определяемый по формуле:

$$G_{\Sigma} = \frac{Q_{\Sigma}}{c \cdot (\tau_1^{+8} - \tau_2^{+8})} \cdot \left[\alpha + (1 - \alpha) \cdot W + (1 - \alpha) \cdot (1 - W) \cdot \frac{(t_{\partial.p} - 8)}{(t_{\partial.p} - t_{н.о})} \right] \quad (11)$$

В Главе 4 приводится алгоритм предпроектного технико-экономического расчета бивалентной СЦТ, основанный на методиках, приведенных в главе 3, и его апробация на примере г. Петрозаводска.

Определён объём дополнительных исходных данных для реализации предложенного алгоритма, в том числе: фактическое годовое количество образовавшихся ТКО; сведения о полигонах ТКО; калькуляция тарифа на вывоз и размещение ТКО. Одновременно указывается на целесообразность изменения законодательства, связанного с обращением с отходами и намечаются пути его совершенствования.

В главах 2 и 3 диссертации были предложены методики определения отдельных технико-экономических показателей бивалентных СЦТ. Предпроектную технико-экономическую оценку целесообразности организации бивалентной СЦТ с использованием энергетической утилизации органосодержащих отходов следует производить по следующему алгоритму, базирующемуся на методической основе, изложенной в главах 2 и 3:

1. Сбор исходных данных о системе централизованного теплоснабжения поселения с определением основных количественных характеристик (q, \bar{L}, ξ, β) .

2. Экспериментальное определение нормы накопления ТКО.

3. Определение теплофизических свойств по морфологическому составу, выбор способа энергетической утилизации ТКО, расчет установленной мощности нетрадиционного источника.

4. Принятие решения о развитии СЦТ (реконструкция существующей системы, либо организация новой) с учётом анализа градостроительной документации и наличия проектов комплексного освоения территории.

5. Расчет граничных условий проектирования.

6. Определение установленной мощности бивалентной СЦТ.

7. Расчет полезного отпуска тепловой энергии от бивалентной СЦТ.

8. Оценка материальной характеристики и протяженности тепловых сетей.

9. Расчет тепловых потерь в тепловых сетях.

10. Расчет затрат электроэнергии на транспорт тепловой энергии.

11. Оценка капитальных затрат на строительство источников и сетей.

12. Расчет себестоимости генерации и транспорта тепловой энергии.

13. Расчет экономической эффективности организации бивалентной СЦТ.

Апробации данного алгоритма проведена на основе проекта схемы теплоснабжения города Петрозаводска на период 2013-2029 гг., разработанного с участием автора, для которого имелись наиболее полные исходные данные, также с участием автора в рамках разработки Территориальной схемы обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Республики Карелия было проведено экспериментальное исследование по определению норматива образования ТКО.

Расчет производился для следующих четырех вариантов:

Вариант 1 - традиционная СЦТ на основе газовой котельной;

Вариант 2 - бивалентная СЦТ с использованием ТКО по схеме газогенератор-котел. Доставку ТКО оплачивает организация, эксплуатирующая СЦТ.

Вариант 3 - бивалентная СЦТ с использованием ТКО по схеме газогенератор-котел. Доставку ТКО оплачивают в полном объеме абоненты регионального оператора согласно утвержденному тарифу на транспорт ТКО;

Вариант 4 - бивалентная СЦТ с использованием ТКО по схеме газогенератор-котел. Плата организации, эксплуатирующей бивалентную СЦТ, за доставку ТКО определена исходя из срока окупаемости проекта – 8 лет.

Основные результаты расчета приведены в таблице 2. Из приведенных данных следует, что экономическая эффективность строительства бивалентной СЦТ с использованием энергетической утилизации ТКО в рассмотренном примере зависит от стоимости транспорта ТКО. Если транспорт ТКО полностью оплачивает организация, эксплуатирующая бивалентную СЦТ, данный инвестиционный проект не окупаем. Наиболее обоюдно эффективная модель оплаты вывоза ТКО для абонента регионального оператора и организации, эксплуатирующей бивалентную СЦТ – разделение затрат. Для г. Петрозаводска при стоимости транспорта ТКО для организации, эксплуатирующей бивалентную СЦТ, 514,71 руб/т, дисконтированный срок окупаемости инвестиционного проекта приемлем для инвестора. Также данный метод ведет к снижению платы граждан за коммунальные услуги.

Таблица 2. Основные результаты сравнительного расчета технико-экономических показателей бивалентной СЦТ ($W_{пред} = 0,35$)

Показатель	Размерн.	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Установленная Мощность нетрадиционного источника	МВт (Гкал/час)	-	25,74 (22,13)	25,74 (22,13)	25,74 (22,13)
Установленная мощность традиционного источника	МВт (Гкал/час)	87,3 (75,10)	56,45 (48,54)	56,45 (48,54)	56,45 (48,54)
Тариф альтернативной котельной	руб/МДж (руб/Гкал)	0,359 (1503,5)	0,359 (1503,5)	0,359 (1503,5)	0,359 (1503,5)
Себестоимость отпуска тепловой энергии потребителю	руб/МДж (руб/Гкал)	0,270 (1129,82)	0,389 (1627,9)	0,181 (759,39)	0,226 (947,3)

Показатель	Размерн.	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Экономический эффект Э	тыс. руб/год	85647,38	-28511	170549	127481
Дисконтированный срок окупаемости	лет	18	Не окупаемо	6	8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. На основе анализа базы данных по разработке и актуализации схем теплоснабжения для поселений и городских округов Российской Федерации, выполненных за период с 2013 по 2017 г., определены характеристики сравнения различных СЦТ: относительная протяжённость тепловых сетей, отношение полезного отпуска тепловой энергии к тепловой нагрузке, плотность тепловой нагрузки, степень централизации.
2. Исследование морфологического состава, теплоты сгорания и динамики образования ТКО позволило рассчитать значение теплового эквивалента ТКО для всех выполненных проектов его значение лежит в интервале 62,16 – 3041,17 тыс. ГДж (14,85 – 726,51 тыс. Гкал). Расчёты показали, что за счёт энергетической утилизации ТКО может быть покрыто от 2 до 8,5 % потребности поселения в тепловой энергии.
3. Приведено обоснование выбора температурного графика регулирования отпуска тепловой энергии в бивалентной СЦТ. На основе результатов проведенных исследований был принят график 110/70 °С.
4. Предложен, теоретически обоснован и подтверждён расчётами режим работы бивалентной СЦТ с переменной зоной теплоснабжения источников, позволяющий максимизировать использование местных топлив, а также обеспечить экономию базового топлива.
5. Предложен алгоритм расчёта бивалентной СЦТ, предназначенный для использования при предпроектной проработке. Апробация алгоритма, выполненная применительно к г. Петрозаводску, показала, что строительство бивалентной системы теплоснабжения, использующей ТКО, позволит снизить плату населения за вывоз ТКО на 42% и решить проблему захоронения отходов,

при этом необходим механизм софинансирования доставки ТКО к нетрадиционному источнику.

6. Сформулированы дополнительные требования к исходным данным для разработки схем теплоснабжения поселений и городских округов Российской Федерации, учитывающие возможности распределённых источников энергии и использования энергетической утилизации органосодержащих отходов.

7. В результате исследования определены перспективы развития СЦТ на основе бивалентных технологий и энергетической утилизации органосодержащих отходов, разработаны научно-методические основы для создания эффективных тепловых схем и оптимальных режимов сочетания различных НиВИЭ с традиционными системами теплоснабжения.

8. Результаты исследования используются ООО «Невская энергетика» и ООО «Научно-технический центр «ГИПРОград» при разработке документации стратегического планирования муниципальных образований Российской Федерации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Владимиров, Я.А. Перспективы энергетического использования твердых коммунальных отходов в крупных городах / Я.А. Владимиров, Е.В. Кожукар, А.Н. Луми, А.М. Опарина // Вестник КГЭУ. – 2017. - №4. - С. 74-82.
2. Владимиров, Я.А. Методические вопросы использования твердых коммунальных отходов и продуктов их газификации / Я.А. Владимиров, Л.В. Зысин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – т.24. - №1. – С. 5-16.
3. Владимиров, Я.А. Некоторые актуальные вопросы перехода к бивалентным системам при совершенствовании централизованного теплоснабжения / В.В. Сергеев, Я.А. Владимиров, Л.В. Зысин // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2018. - №4 – С. 46-56.

В прочих сборниках научных трудов и материалах конференций:

4. Vladimirov, Y.A. Gasification and plasma gasification as type of the thermal waste utilization / V.V. Sergeev, Y.A.Vladimirov, K.S. Kalinina, E.V. Kazhukar // Construction of unique buildings and structures. – 2016/ - №12. – p. 85-93.
5. Владимиров, Я.А. Определение предельного расстояния от проектируемого источника тепловой и электрической энергии до центра тепловых нагрузок / Я.А. Владимиров, Н.Т. Амосов, В.В. Сергеев // Неделя науки

СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 1. – 2016. – С. 17-20.

6. Владимиров, Я.А. Методы калибровки математических моделей систем теплоснабжения / Я.А. Владимиров, П.Л. Аксенов // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 1. – 2016. – С. 78-80.

7. Владимиров, Я.А. Исследование влияния температурного графика на параметры систем централизованного теплоснабжения / Я.А. Владимиров, Н.Т. Амосов, В.В. Сергеев // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 1. – 2016. – С. 14-17.

8. Владимиров, Я.А. Влияние температурного графика на энергоемкость транспорта тепловой энергии / М.С. Рыков, Я.А. Владимиров // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 1. – 2016. – С. 74-76.

9. Владимиров, Я.А., Определение предельных параметров зоны эффективного теплоснабжения ТЭЦ / Я.А. Владимиров, Н.Т. Амосов // Энергетические системы: сборник трудов II Международной Научно-технической Конференции БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – С. 10-16.

10. Владимиров, Я.А. Оценка потенциальных возможностей использования твердых коммунальных отходов в системах централизованного теплоснабжения / Я.А. Владимиров, Н.Т. Амосов, Е.В. Кожукар, М.С. Рыков // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 1. – 2017. – С. 47-49.

11. Владимиров, Я.А. Сравнительная оценка биогазового потенциала полигона твердых коммунальных отходов / Я.А. Владимиров, А.В. Бахарева, Е.В. Кожукар, А.М. Опарина // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 1. – 2017. – С. 94-96.