

УДК 697.341

В. В. Сергеев, Я. А. Владимиров, Л. В. Зыссин

НЕКОТОРЫЕ АКТУАЛЬНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПЕРЕХОДА К БИВАЛЕНТНЫМ СИСТЕМАМ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Рассматриваются перспективы модернизации и развития систем централизованного теплоснабжения в условиях перехода к рыночной экономике. Отмечается важная роль, которую при этом могут сыграть системы с комбинированным бивалентным энергообеспечением, в том числе на основе тепловых насосов, а также энергетического использования твёрдых коммунальных отходов. Анализируются результаты и опыт проектирования, ставятся задачи создания динамических алгоритмов расчёта, позволяющих учитывать динамику изменения исходных данных.

ТЕПЛОФИКАЦИЯ, БИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ, РАДИУС ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ, КОММУНАЛЬНЫЕ ОТХОДЫ, ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ

V. V. Sergeev, I. A. Vladimirov, L. V. Zyssin

SOME TOPICAL THEORETICAL AND PRACTICAL ISSUES OF TRANSITION TO BIVALENT SYSTEMS IMPROVING THE CENTRALIZED HEAT SUPPLY

The prospects of modernization and development of systems of the centralized heat supply in the conditions of transition to market economy are considered. The important role systems with combined bivalent power supply can play, including based on heat pumps and also energy use of civil waste is noted. Results and experience of designing are analyzed, problems of creation of the dynamic algorithms of calculation providing to consider dynamics of change of input data are defined.

CENTRAL HEATING, BIVALENT SYSTEMES, RADIUS OF ACTION OF THERMAL NETWORK, MUNICIPAL WASTE, DYNAMICS OF DEVELOPMENT

Первая работа, возможно не только в нашей стране, но и в мире, посвящённая бивалентному энергоснабжению, использующему не один, а два разных по природе источников энергии, была выполнена ещё в 20-ых годах прошлого века замечательным отечественным физиком В.А. Михельсоном, учеником А.Г. Столетова [1]. Он разработал индивидуальную систему отопления крупного общественного здания, построенную на комбинации теплового насоса и солнечного коллектора, которую назвал *динамической*. Он же воскресил основательно забытый за предыдущие семь десятилетий термин *тепловой насос* (*heat pump*), предложенный У. Томпсоном (лордом Кельвиным) ещё в 1852 году для устройства, трансформирующего температурный уровень теплоты с целью её дальнейшего полезного использования [2].

Однако при плановой системы хозяйствования у нас в стране далее предпочтение отдали централизованному энергоснабжению. Холодный климат на значительных территориях, преобладание в жилищном строительстве компактной многоэтажной застройки, большая доля теплотребления в промышленности, создавали предпосылки для выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Поэтому в большинстве городов и промышленных центров сложились системы централизованного теплоснабжения, включающие ТЭЦ, укомплектованные паровыми турбинами большой мощности, из отборов которых покрывалась базисная часть тепловой нагрузки (примерно 50% максимального теплотребления в наиболее морозные дни), и пиковыми водогрейными котлами, предназначенных для резервирования теплоснабжения и обеспечения повышенной нагрузки отопления при низких температурах воздуха. Теоретические основы теплофикации в нашей стране были заложены и развиты в трудах известных отечественных учёных и инженеров: А.И. Андрущенко, В.М. Бродянского, Л.Л. Гинтера, Д.П. Гохштейна, В.В. Дмитриева, Л.А. Мелентьева, Е.А. Соколова, М. А. Стыриковича и многих других специалистов [3]. Уже к середине XX века наша страна по масштабам теплофикации заняла ведущее место в мире, отечественный опыт и оборудование широко использовались за рубежом.

Однако, по мере роста единичных установленных мощностей, экологических ограничений и ряда других объективных факторов постепенно нарастали противоречия, связанные с централизованным теплоснабжением. Ошибки органов плановой экономики, пренебрежение мнением ведущих учёных [4], привели в конечном счёте к тому, что прогрессивные идеи комбинированной выработки тепла были дискредитированы. Значительная часть экономии от самого принципа теплофикации была утеряна из-за перерасходов топлива, связанного с нерациональным размещением ТЭЦ, не оптимальной загрузки электрических мощностей, нарушения правил технической эксплуатации и т. п. В результате повсеместно в крупных городах доля ТЭЦ снизилась до 20-30% от максимальной тепловой нагрузки, а остальная её часть покрывалась за счёт крупных котельных с водогрейными котлами. Для меньших городов и промузлов с максимальной тепловой нагрузкой не более 1000-1500 Гкал/ч стали вообще отказываться от ТЭЦ и всю нагрузку покрывали за счёт котельных. Более того,

получила развитие тенденция на промышленных предприятиях, в составе которых были запроектированы ТЭЦ, переводить их в режим работы котельных, т. е. выводить турбины из эксплуатации. Всё это увеличивало надежность теплоснабжения, снижало эксплуатационные затраты, минимизировало капиталовложения в теплогенерирующие источники и тепловые сети, однако, вело к существенному перерасходу топлива. Но в условиях неоправданно низких цен (прежде всего, на газ) на это не особенно обращали внимание. Сложилась парадоксальная ситуация – экономить топливо предприятиям стало невыгодно!

Укажем ещё на одну специфическую особенность исторически сложившейся в стране системы теплоснабжения. Вопреки декларированному утверждению, что единой системой электроснабжения охвачена вся страна, минимум 40% её территории находились за пределами такой системы. Там господствовала так называемая "малая энергетика" - преимущественно дизельные электростанции и автономные котельные. Пренебрежительное отношение к малой энергетике сказывалось прежде всего в том, что её оборудование мало совершенствовалось: дизель-генераторы имели крайне низкий моторесурс, в котлах сжигалось топливо с низкой эффективностью и высокими вредными выбросами.

Переход к рыночной экономике охарактеризовался возникновением интереса к различным видам бивалентного теплоснабжения, прежде всего, как средства повышения надёжности энергоснабжения. При этом стали множиться поспешные и часто мало квалифицированные решения. Например, получили распространение автономные котельные и электростанции на дизельном топливе, тепловые насосы без должного технико-экономического обоснования [5] и т. п. В этой связи назрела очевидная необходимость скорейшей разработки новой концепции теплоснабжения, с внесением соответствующих ей изменений в нормативы проектирования (СНиПы) и постановки задачи совершенствования и создание нового теплотехнического оборудования. При этом следовало исходить из того, что крупные инвестиции в энергетику мало вероятны, и такая тенденция будет сохраняться ещё достаточно долго. О чём можно судить на основании гистограмме, составленной по официальным данным Росстата (рис. 1), где показана динамика инвестиций в производство, передачу и распределение электроэнергии, газа, пара и горячей воды, из которой видно, что после 2013 года присутствует стойкий тренд к уменьшению вложения денежных средств в развитие энергетики.

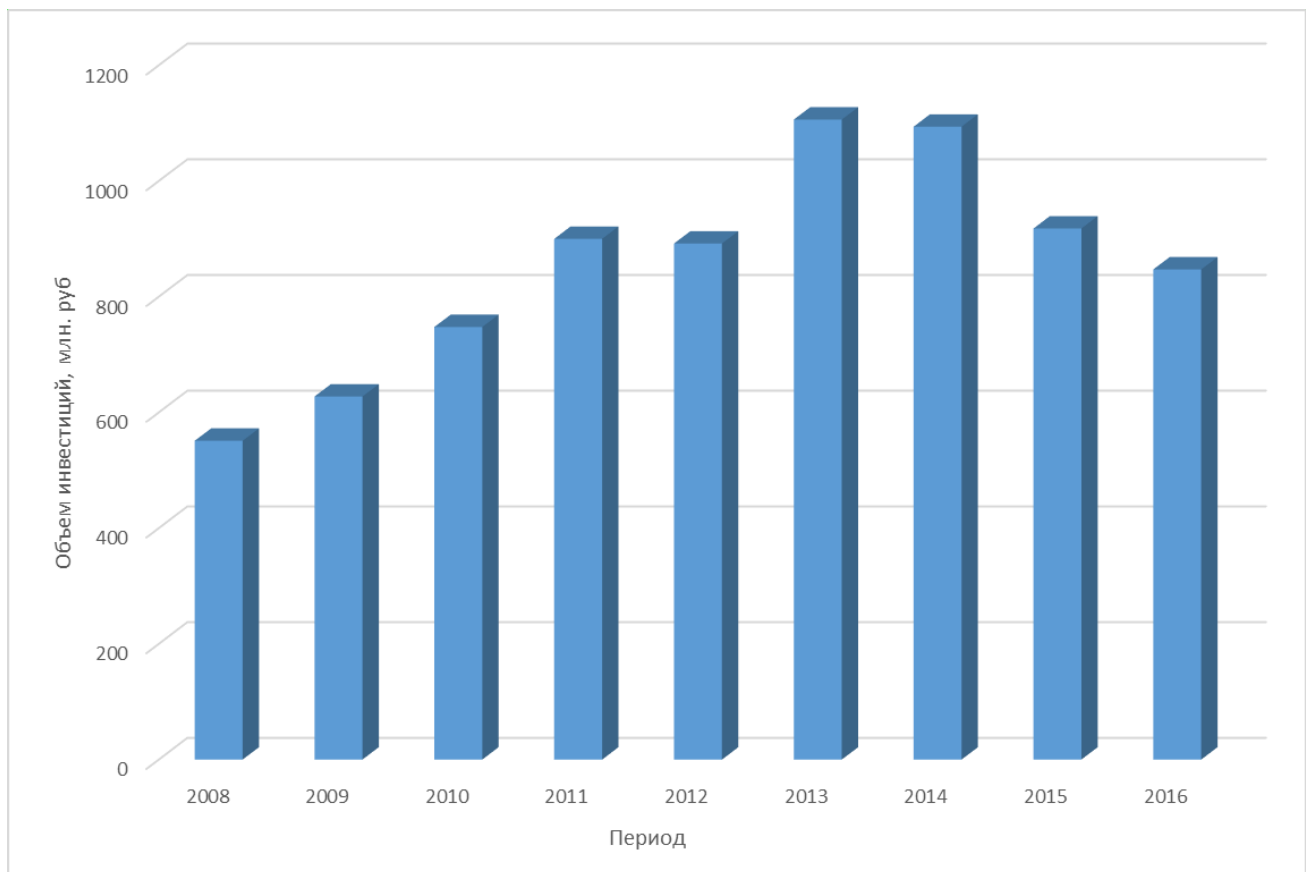


Рис. 1. Динамика инвестиций в производство, передачу и распределение электроэнергии, газа, пара и горячей воды

В этой связи остановимся на некоторых результатах исследований и основных научных положениях, из которых, на наш взгляд, следует исходить при проектировании, модернизации и развитии систем теплоснабжения на современном этапе.

1. Созданию новой концепции теплоснабжения России были посвящены последние работы акад. М. А. Стыриковича [4]. Суть его предложений сводилась к необходимости надстройки всех относительно крупных котельных газовыми турбинами, переводя их в режим работы ТЭЦ. Реализующие его идеи расчёты показали, что, например, для условий Москвы любая система теплоснабжения, имеющая максимальную расчетную тепловую нагрузку $Q_{\text{макс}} > 10-20$ Гкал/ч при графике теплопотребления, типичном для коммунальных ТЭЦ будет рентабельной уже при надстройкой ГТУ, имеющей КПД порядка 35%. Для регионов с более суровым климатом указанные граничные величины оказываются еще ниже, и для производственных потребителей тепла с летней нагрузкой 50-60% от максимально-расчетной надстройки могут быть эффективными уже при $Q_{\text{макс}} > 3$ Гкал/ч. Достаточно надстроить подобным образом 40% котельных средней мощности ($Q_{\text{расч}} = 6-7$ Гкал/ч) и 80% крупных котельных в Европейской части страны, чтобы на ближайшие 15-20 лет полностью отказаться от строительства новых КЭС. В результате стоимость

электроэнергии существенно сократится, что может стать важным фактором значительного снижения тарифов на электроэнергию в перспективе, и что сегодня практически не учитывается в дебатах по реформированию электроэнергетики. Позднее идеи Стыриковича нашли отражение в энергетической стратегии Российской Федерации, где обозначен приоритет комбинированной выработки тепловой и электрической энергии [6]. Однако, важно учитывать рациональность переоборудования котельных в источники комбинированной выработки. У генерируемой электрической энергии должен быть свой потребитель. Главная цель работы котельных – производство тепловой энергии, таким образом, электроэнергия для таких источников, в отличие от классических ТЭС, будет побочным продуктом, график ее выработки будет в первую очередь определяться графиком производства тепловой энергии. Тотальное переоборудование источников теплоснабжения средней и большой мощности приведет к следующим последствиям: появление на рынке большого количества электрической энергии, зависимость количества вырабатываемой электроэнергии от потребления тепловой энергии. В таблице 1 приведены данные прогноза баланса генерирующих мощностей ЕЭС России [7], которые показывают, что в ЕЭС России существует значительный избыток генерирующих мощностей.

Таблица 1.

Баланс генерирующих мощностей ЕЭС России,

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Максимум потребления мощности	154748	156489	158289	159949	161498	163089	164598
Нормативный резерв	25118	25410	25684	25927	26183	26453	26716
Экспорт	3838	3438	3338	3338	3338	3338	3338
Спрос на мощность всего	183704	185337	187311	189214	191019	192880	194652
Установленная мощность электростанций (факт, 2016 год)	236343,6	236343,6	236343,6	236343,6	236343,6	236343,6	236343,6
Итого резерв	52639,6	51006,6	49032,6	47129,6	45324,6	43463,6	41691,6
то же, %	22	22	21	20	19	18	18

Следовательно, появление на рынке электроэнергии новых мощностей без возможности обеспечения гибкого графика нагрузки вряд ли будет обеспечено спросом. В случае работы данных источников в базе нагрузки, будет снижен коэффициент использования установленной мощности объектов крупной энергетики – ГЭС и АЭС и, как следствие, приведет к удорожанию стоимости электрической энергии, генерируемой на этих объектах. Отсюда следует, что решение о переоборудовании котельной в источник комбинированной выработки должно в каждом случае приниматься индивидуально, на основании технико-экономических расчетов, с учетом модели рынка электрической энергии и мощности, а также при наличии гарантированного потребителя вырабатываемой электрической энергии.

2. Наряду с крупными энергогенерирующими установками, такими как паровые турбины противодавления и конденсационные с отборами пара, газовыми турбинами с утилизацией теплоты выхлопных газов для целей отопления и горячего водоснабжения (ГВС), в рамках систем централизованного энергоснабжения теплоснабжение должно расширяться за счёт применение локальных установок средней и малой мощности, прежде всего ГТУ, двигателей внутреннего *сгорания* (газопоршневые, газо-дизельные и дизельных) с утилизацией теплоты систем охлаждения и выхлопных газов двигателя. Высокая надёжность и постоянная готовность подобных установок делают их незаменимыми при покрытии пиковых нагрузок как суточных, так и сезонных. Однако номенклатура подобных установок, выпускаемых промышленностью ограничена. На рынке имеется ряд предложений от авиационных фирм, осуществивших конверсию своих двигателей для наземных условий за счёт снижения их экономичности, а доводочные работы по перспективным отечественным разработкам, таким как, например, ГТЭ-65, растягиваются на многие годы.

3. В себестоимости энергетической продукции топливная составляющая в зависимости от региона колеблется в весьма значительных пределах и находится в диапазоне 19-57%. При этом топливная составляющая в стоимости тепловой энергии от комбинированных источников выше, чем от котельных. На рис. 2 приведены результаты обобщения значений топливных составляющих тарифа на тепловую энергию в различных регионах Российской Федерации.

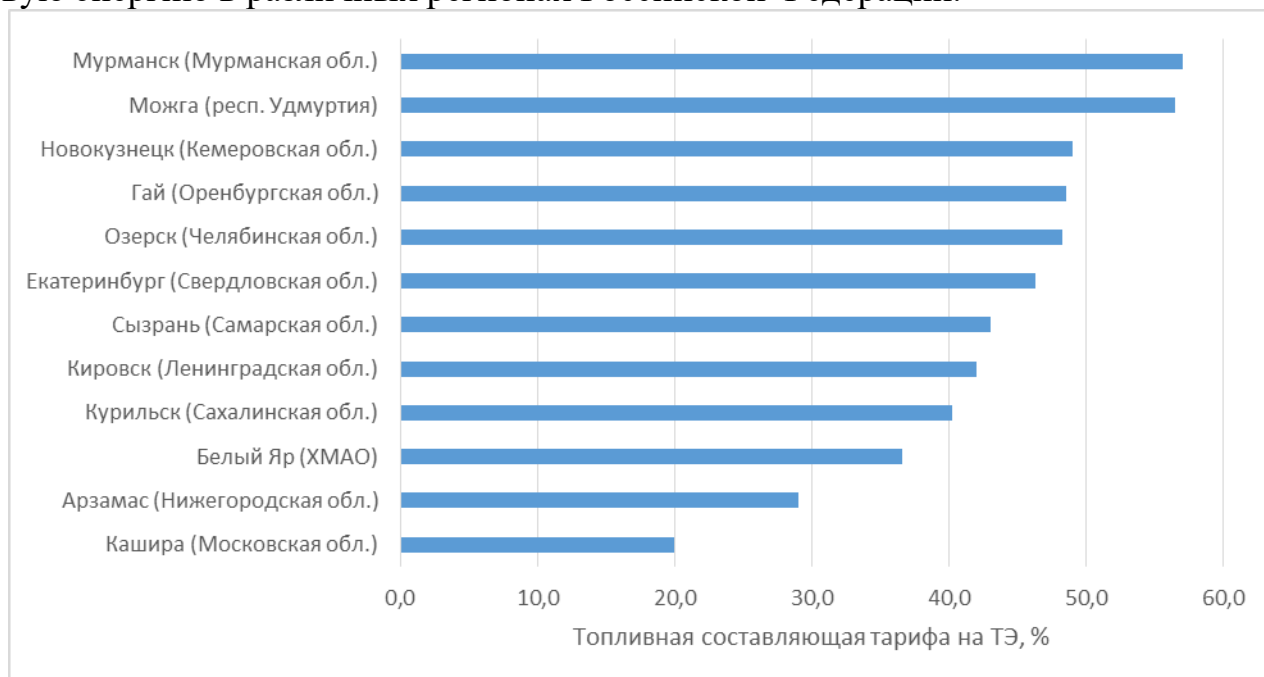


Рис. 2. Топливная составляющая тарифа на тепловую энергию в различных регионах Российской Федерации.

Стоимость топлива неуклонно растёт, и эта тенденция далее, очевидно, сохранится, поэтому всё возрастающее значение будет иметь вовлечение в топливный баланс местных видов топлива. Для большинства регионов России это прежде всего органосодержащие промышленные и бытовые отходы, а также древесина, отходы её переработки и торф. Следует подчеркнуть, что при транспортировке стоимость такого топлива быстро нарастает, потому оно носит сугубо местный характер и должно перерабатываться в предельно близко к месту своего возникновения. Проблема хранения, размещения и утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является у нас в стране крайне острой. В этой связи целесообразна оценка масштабов и технических возможностей использования ТКО в бивалентных схемах при развитии и расширения действующих систем централизованного теплоснабжения.

К сожалению, в регионах, как правило, отсутствуют достоверные оценки ресурсов ТКО. На стадии разработки различных документов стратегического развития муниципальных образований (МО) нами на основе региональных данных была проведена оценка количества твердых коммунальных отходов и рассчитана потенциальная доля теплоты, полученной из отходов, в тепловом балансе муниципального образования, результаты которой приведены в таблице 2.

Таблица 2.
Оценка теплового потенциала ТКО в различных городах Российской Федерации (МО)

Наименование МО	Оценочная масса ТКО, т/год	Потенциальное количество теплоты ТКО, Гкал	Годовая потребность абонентов МО в тепловой энергии, Гкал	Тепловой потенциал ТКО, %
Петрозаводск	79387	53856	2295208	2,3
Екатеринбург	979238	664315	17168700	3,9
Няндомы (Архангельская обл.)	6123	4154	125601,8	3,3
Кировск (Ленинградская обл.)	12340	8371	194260	4,3
Саратов	384682	260968	3855000	6,8
Санкт-Петербург	2062193	1398991	44271000	3,2

Из таблицы 2 следует, что от 2 до 7% спроса на тепловую энергию может быть удовлетворено за счет энергетической утилизации твердых коммунальных отходов. На основании анализа зарубежных источников можно ожидать, что на основе внедрения прогрессивных систем селективного сбора ТКО, современных технологий их переработки и экологически чистого сжигания, их доля в тепловом балансе теплоснабжения может быть увеличена. Следует подчеркнуть, что энергетическое использование ТКО позволяет успешно решать и некоторые сложные экологические проблемы, например, плазменная утилизация - обезвреживание токсичной части отходов [8] и т. п.

В целом, использование местных топлив является в перспективе ещё одним реальным фактором снижения тарифов. При этом следует различать *новые по технологическим признакам и формам применения установки*, относительно не большой и средней мощности, работающие на местном топливе в составе бивалентных систем централизованного энергоснабжения, где они служат одновременно целям экономии топлива, расширения зон обслуживания и повышения надёжности энергоснабжения, от моновалентных установок на местном топливе (прежде всего органосодержащих отходах), работающих в составе крупных ТЭЦ с паротурбинными блоками различной конструкции, серийно выпускаемых промышленностью и решающих преимущественно задачи утилизации отходов, а уж потом и экономии *топлива*.

5. В настоящее время наиболее изученным источником дополнительной энергии для систем бивалентного теплоснабжения являются теплонасосные установки (ТНУ). Обилие публикаций на этот счёт в известной степени обусловлено ошибочными представлениями, что тепловой насос позволяет использовать некое "даровое" тепло. Однако, если исключить случаи термотрансформации низкопотенциального тепла, отводимого в ряде технологических процессов (сушка, выпаривание, ректификация и т. п.), то окажется, что целесообразность применения для целей отопления теплового насоса в каждом конкретном случае требует доказательства. Дело в том, что использование теплового насоса вместо ТЭЦ в общем случае увеличивает расход топлива энергосистемой и капитальные вложения в неё, а замещение тепловыми насосами отдельных котельных может дать экономию топлива, но одновременно потребует существенно больших капитальных вложений.

Обзор исследований, посвящённых разграничению областей применения ТЭЦ, ТНУ и котельных [9], показал, что применительно к техническим возможностям и меняющимся экономическим условиям установленные в них границы носят весьма приблизительный характер. Так ориентируясь на конкретные величины потерь в машинах и механизмах, тарифы, климатические зоны и т.п. граничные значения *коэффициента эффективности* ϕ , выше которого использование ТНУ может стать целесообразным варьируется в широких пределах, от 2 до 8. Отметим, что применительно к отопительным системам коэффициент ϕ аналогичен *отопительному коэффициенту*. Целесообразность использования теплонасосных установок требуют проверки посредством технико-экономического расчета для каждого случая. Так, например, оценка экономической эффективности создания локальной системы теплоснабжения общественно-делового здания ($Q_{ос} = 0,426 \text{ Гкал/ч}$; $Q_{нсс.час} = 0,045 \text{ Гкал/час}$), расположенного на территории Санкт-Петербурга, с помощью теплового насоса [5], в ходе которой были рассмотрены три способа теплоснабжения: от системы централизованного теплоснабжения, с электронагревом ГВС в период отключения централизованного теплоснабжения;

когда с помощью каскадов тепловых насосов, работающих на отопление и вентиляцию греют питательную воду до 35 °С, а тепловые насосы, обеспечивающие ГВС греют горячую воду до 55 °С; когда все тепловые насосы греют питательную воду до 35 °С, а догрев ГВС производится с помощью ТЭНов

Оценка показала, что годовая доходность альтернативных вложений от разницы в стоимости создания локальной системы теплоснабжения от ТНУ и подключения к системе централизованного теплоснабжения превышает годовую экономию денежных средств теплоснабжение здания, полученную при использовании тепловых насосов. Следовательно, в данном случае создание системы теплоснабжения от теплового насоса не окупится.

Однако, существует ряд комбинированных схем утилизации теплоты продуктов сгорания в котельных установках, вторичной теплоты в двигателях внутреннего сгорания, а также эффективно использующих переменность сезонных и суточных графиков нагрузки тепловых систем, для которых применение тепловых насосов открывает новые возможности, в том числе и в сочетании с современными тепловыми аккумуляторами.

Сравнение термодинамических циклов ТНУ и ТЭЦ показывает, что при работе по идеальным обратимым циклам Карно, теплоснабжение с помощью теплового насоса и с помощью теплофикационной турбины равноценны. Разница только в способе связи с потребителями. Для ТЭЦ это теплопровод, для ТНУ - электропередача. Однако ТЭЦ при современных способах передачи тепла имеет ограниченный радиус действия. По мере удаления от ТЭЦ эффективность теплофикационной системы снижается; растут затраты энергии на привод сетевых насосов, теплотери в окружающую среду, падает граничная температура сетевой воды. В результате, на некотором расстоянии от ТЭЦ теплоснабжение от ТНУ становится экономически более выгодным [9].

В оптимизации зон централизованного теплоснабжения и обоснованном выборе источников тепловой энергии для перспективных потребителей кроется существенный потенциал энергосбережения и экономии денежных средств. Сравнение показателей энергоэффективности на стадии выбора варианта источника теплоснабжения позволяет исключить малоэффективные предложения инвестиционных проектов. Для сравнения вариантов необходимо иметь единый сравнительный показатель (единый критерий энергоэффективности различных источников энергоснабжения). Для оценки энергетической эффективности централизованного теплоснабжения от теплоисточников находится граница эффективности данного вида теплоснабжения. Искомая граница определяется из условия, что данный способ теплоснабжения будет эффективнее по сравнению с децентрализованным теплоснабжением [10]. Попытки определения границы зоны предпринимались многими учеными.

Попытки получения аналитического выражения для зоны эффективного теплоснабжения в России начали предприниматься с 30-х годов XX века [11]. Концептуально оптимальную зону теплоснабжения предлагалось определять из

условия минимума выражения для «удельных стоимостей сооружения тепловых сетей и источника»:

$$S = A + Z \rightarrow \min, \quad (1)$$

где: где A – удельная стоимость сооружения тепловой сети, руб./Гкал/ч; Z – удельная стоимость сооружения котельной (ТЭЦ), руб./Гкал/ч.

Однако, данная формула учитывает лишь капитальные вложения, оставляя без внимания стоимость тепловой энергии для потребителя. Для учета как постоянных, так и переменных затрат в системе теплоснабжения, Е.Я. Соколовым было введено понятие предельного радиуса действия тепловой сетей от источника централизованного теплоснабжения:

$$R_{пред} = \left[\frac{(p - C)}{1,2 \cdot K} \right]^{2,5}, \quad (2)$$

где p – разница себестоимости тепла, выработанного на ТЭЦ и в индивидуальных котельных абонентов, руб./Гкал; C – переменная часть удельных эксплуатационных расходов на транспорт тепла, руб./Гкал; K – постоянная часть удельных эксплуатационных расходов на транспорт тепла при радиусе действия тепловой сети, равном 1 км, руб./Гкал.км. Однако, данная зависимость содержит эмпирические коэффициенты, корректность использования которых в условия рыночной экономики, как минимум, требует доказательства.

Одним из наиболее успешных исследований данного направления, выполненных в последнее время, стала работа [12], где предлагается метод решения трёх типовых задач, связанных с развитием систем централизованного теплоснабжения, а именно: сравнение фактически сложившегося радиуса теплоснабжения с радиусом эффективного теплоснабжения; определение возможности расширения существующей зоны действия источника тепловой энергии в зону перспективного строительства; оценку последствий перераспределения тепловой нагрузки между источниками с ,пересекающимися зонами действия.

При определении возможности расширения зоны действия источника с целью подключения новых потребителей необходимо оценивать эффект от подключения как для перспективных потребителей (то есть здесь имеет место метод альтернативной котельной), так и для существующих потребителей тепловой энергии (условия. При которых подключение новых потребителей не ведет к росту совокупных удельных затрат в системе).

Согласно упомянутой методике [12], расчет зоны эффективного теплоснабжения включает в себя следующие виды задач:

- Сбор исходных данных для расчета;
- Определение прогнозных тепловых нагрузок территории, для которой происходит расчет;

- Определение расстояния от точки подключения к существующей тепловой сети до нового потребителя;
- Гидравлический расчет системы теплоснабжения с целью определения характеристик вновь строящихся тепловых сетей, а также выявление необходимости перекладки существующих тепловых сетей с увеличением диаметра;
- Составление перспективного баланса тепловой мощности источника тепловой энергии;
- Составление балансов производства тепловой энергии, потребления топлива, воды и электроэнергии. Для источников комбинированной выработки тепловой и электрической энергии составляется баланс выработки электроэнергии
- Определение совокупных затрат для различных вариантов теплоснабжения перспективного потребителя
- Сравнение совокупных затрат для разных вариантов

Таким образом, зона эффективного теплоснабжения для существующего источника тепловой энергии представляет собой не константу, а зависит от подключаемой нагрузки перспективного потребителя. Более того, для существующего источника тепловой энергии зона должна быть определена для каждой потенциальной точки подключения (тепловой камеры). Для тепловой камеры зона эффективного теплоснабжения будет в общем случае представлять собой окружность и характеризоваться радиусом эффективного теплоснабжения. Для удобства восприятия, результаты расчета параметров зоны эффективного теплоснабжения от существующего источника централизованного теплоснабжения для тепловой камеры приведены на рис. 2 в виде графика.

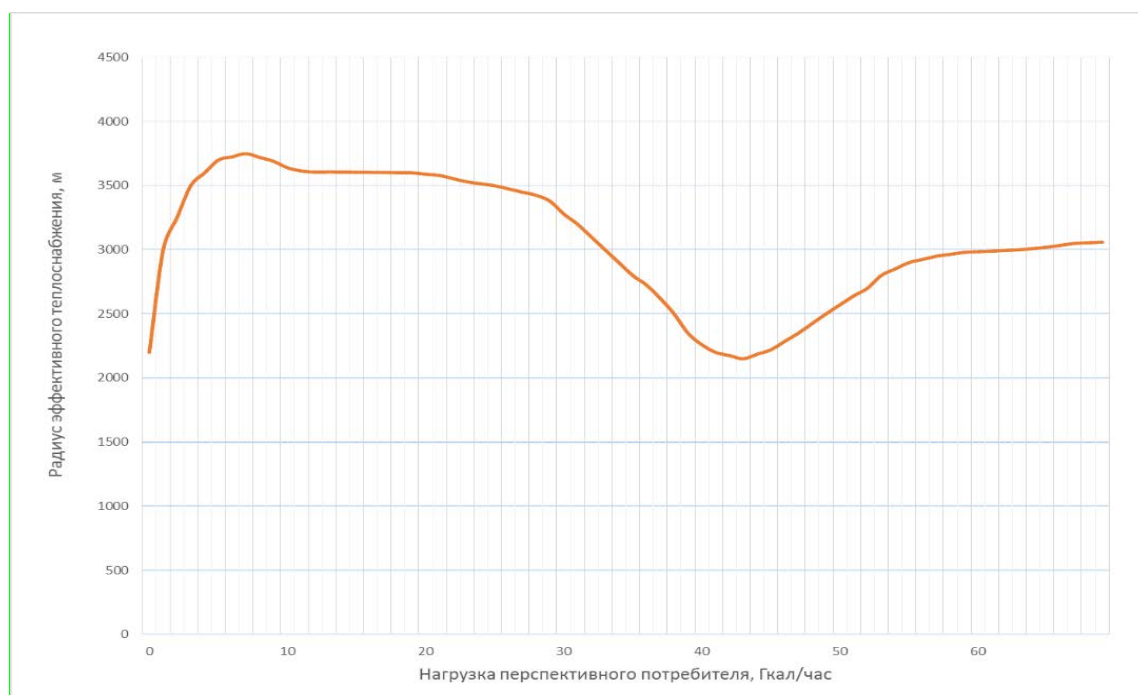


Рис. 2. Радиус эффективного теплоснабжения котельной

При расчетах предполагалось, что точка подключения перспективного потребителя расположена в конкретной тепловой камере. То есть для каждой тепловой камеры данный расчет будет индивидуален. Тем не менее, рис.2 иллюстрирует характер изменения радиуса эффективного теплоснабжения для любой точки подключения. Отличие зависимостей для разных тепловых камер будут заключаться в координатах точек перегиба и экстремумов.

Из приведенных на рис. 2 результатов следует, что при подключении к системе теплоснабжения потребителя с нагрузкой до 8 Гкал/час зона эффективного теплоснабжения котельной увеличивается. Последующее снижение радиуса эффективного теплоснабжения обусловлено необходимостью перекладки ряда участков тепловой сети. Чем выше подключаемая нагрузка, тем больше участков нужно переложить с увеличением диаметра и тем больше расчетный диаметр реконструируемой тепловой сети. Объем необходимой перекладки тепловых сетей определялся посредством серии гидравлических расчетов системы теплоснабжения, проведенных в расчетно-программном комплексе Zulu Thermo. Учитывая, что данный расчет в общем случае должен быть произведен для каждой тепловой камеры, целесообразно его проведение при решении вопроса об эффективности подключения к системе теплоснабжения конкретного потребителя, когда известна величина подключаемой нагрузки, местоположения потребителя, ограничен выбор точек подключения.

При подключении потребителя тепловой энергии с нагрузкой более 44 Гкал/час наблюдается возобновление роста радиуса эффективного теплоснабжения, что связано с характером изменения стоимости трубопроводов в зависимости от диаметра. Таким образом, при превышении расстояния, полученного при проведении описанного выше расчета, от точки подключения до абонента целесообразно рассматривать возможность теплоснабжения данного абонента от альтернативных источников энергии – автономной котельной, ТНУ и пр. [12].

Дополнительные возможности для развития теплофикации открываются с применением для привода теплового насоса поршневых машин, работающих на газе. В свою очередь использование генераторного газа, получаемого из органосодержащих бытовых и промышленных отходов, открывает возможности уже для *тривалентного* теплоснабжения, а при экономических оценках следует учитывать вклад подобных систем в экологию, для чего пока нет пока обоснованных экономических данных и нормативов.

При всей важности термодинамического анализа при выборе источников энергии и типе схемы теплоснабжения, не менее важные значения имеют ряд факторов регионального и сугубо местного значения. Сюда следует отнести соотношение долей бытового и промышленного теплопотребления, наличие источников низкопотенциального тепла и местных топливных ресурсов, динамика суточных и сезонных графиков нагрузок, состояние и тип

существующих тепловых схем, техническая возможность и экономическая целесообразность их модернизации. Наконец, уровень квалификации и опыт эксплуатационного персонала также может стать ограничением при выборе эффективных, но относительно менее надёжных систем теплоснабжения. Современный этап развития САПР позволяет ставить вопрос о комплексном решении на стадии проектирования указанных выше вопросов. Но он требует для своей реализации обобщённых данных по проектированию, монтажу и эксплуатации для конкретных объектов, отличающихся типом и масштабам потребления, климатическими и региональными условиями, одновременно позволяющим учитывать динамику изменения внешних условий, включающую развитие объекта исследования.

Бивалентные системы теплоснабжения являются одним из важных элементов изложенного выше подхода

6. Современный этап развития энергетики связан с постоянно расширяющейся областью использования НВИЭ. Можно ожидать, что эта тенденция будет широко далее развиваться по мере совершенствования и удешевления систем НВИЭ. Помимо упомянутых выше ТНУ и БЭУ, в южных регионах происходит освоение солнечной энергии, а также геотермальной энергии, в районах, где её запасы разведены.

Если это не сугубо автономные установки, то они должны комбинироваться с традиционными системами, улучшая их свойства. Естественным можно считать появления энергетических систем включающих три и более источников энергии, но подобная *поливалентность* для систем теплоснабжения не самоцель, а путь увеличения радиуса их обслуживания, повышения надёжности действующих систем и снижения стоимости продаваемой ими энергии. Пока часто идут по пути формального сложения двух систем энергоснабжения, что ведёт к прямому удорожанию установки и в известной мере дискредитируют идею [13].

Если использование локальных солнечных коллекторов может являться и является эффективным дополнением к традиционным системам теплоснабжения, а в ряде южных стран полностью их замещающих, то снижение себестоимости "солнечного" электричества может коренным образом изменить стратегию и схемы теплоснабжения. Дешёвая электроэнергия поднимет уровень эффективности ТНУ и сделает актуальным переход непосредственно к теплоснабжению на основе электрической энергии. Заметим, что такой положительный опыт уже имеется за рубежом и у нас в стране. Так в районе Саяно-Шушенской ГЭС при избытке электрической энергии нашло применение электрическое отопление на ряде промышленных предприятий.

7. Развитие бивалентных систем теплоснабжения неразрывно с совершенствованием методов проектирования и оценки их эффективности, а также определение показателей, по которым может происходить сравнение.

Длительное время подобные методы базировались на той или иной модификаций диаграммы Синкея, строго учитывающей только принцип сохранения энергии. На ряду с этим отмечалась односторонность такого подхода, и необходимость учитывать потери работоспособности (эксергии) рабочего тела, связанные со вторым началом термодинамики. Эксергетические методы исследования, разрабатываемые с середины прошлого столетия, существенно подняли теоретический уровень термодинамических расчётов в теплоэнергетике, достаточно упомянуть работы А.И. Андриященко [14], Ф. Бошняковича [15], В.М. Бродянского [16], Д.П. Гохштейна [17] и др. Однако важная задача в области анализа энергетических установок по увязке термодинамического анализа с экономикой энергетики пока остаётся не решённой. Нельзя считать удовлетворительным состояние, когда попытки приложения этих методов к решению практических задач проектирования требует перемножения многочисленных КПД, образованных параметрами, имеющих сугубо разную физическую основу. Нельзя сказать, что ничего в данном направлении не делается, так, например, простая методика учёта влияния технического состояния элементов технологической схемы на показатели работы ТЭЦ, позволяющая учитывать дисконтированные сроки окупаемости и доходы от капитальных затрат в реконструкцию, предложена в работе [18].

Данная методика исходит из предположения, что величина субъективного удельного перерасхода топлива численно характеризует потенциал экономии топлива, который может быть реализован в результате улучшения характеристик оборудования до проектных значений». Иными словами - замена или ремонт оборудования требуют капитальных затрат, но ведут к экономии топлива. Оценка эффективности затрат на ремонт либо замену какого-либо оборудования ТЭЦ характеризуется сроком окупаемости и производится на основании зависимости:

$$ЧДПp^t = \sum_{t=0}^{T_{ок}} \left[b_{II}^{j,cyб} + b_{II}^{j,cyб} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^{j-1} \Omega_i\right) \right] \cdot C_{топл} \cdot E_{ТЭЦ}^t \cdot (1 - e)^{-t} = 0, \quad (3)$$

где $ЧДПp^t$ – чистая дисконтированная прибыль за период времени t ; $T_{ок}$ – срок окупаемости; $b_{II}^{j,cyб}$ – субъективный удельный перерасход топлива на элементе j , $\sum \Omega_i$ – сумма коэффициентов эксергических потерь, $C_{топл}$ – средняя прогнозируемая цена топлива на период времени t , e – норма дисконтирования, E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений j – порядковый номер элемента в цепи энергетических превращений.

Данная методика для бивалентных систем теплоснабжения нуждается в доработке, так как с учетом использования вторичных энергоресурсов, потери в системе не могут быть сведены к перерасходу топлива. При этом, например, для анализа систем с ТНУ задача усложняется тем, что приведенные в литературе зоны эффективной работы ТНУ получены для конкретных параметров системы, в то время как КПД турбомашин, входящих в систему в зависимости от их конструкции и мощности могут меняться в широких пределах, что ограничивает применения полученных ранее результатов. Потому на данном этапе проект

остаётся главным орудием исследования, накопление и обобщение опыта проектирования систем теплоснабжения. На этой основе образуется массив данных для разных условий эксплуатации, в ходе которого учитываются объективные и субъективные факторы эксплуатации, который закладывается в основу функционирования, мощной системы автоматического проектирования, базирующейся на существующих и новых алгоритмах расчёта отдельных элементов системы с алгоритмами их взаимодействия и развития.

8. Государственная политика в сфере теплоснабжения в последние годы нашла выражение в ряде директивных документов определяющих стратегическое планирование в данной области, организацию эффективного и безопасного функционирования систем теплоснабжения поселения, городского округа, их развития с учетом правового регулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [6, 7, 19, 20]. В частности, согласно [19] до 2030 года предполагается рост значения возобновляемых источников энергии в обеспечении энергетических потребностей общества.

В настоящее время накоплен уже достаточно большой опыт работы в рамках действия указанных документов. Разработаны и прошли утверждение десятки схем теплоснабжения самых различных муниципальных образований с численностью населения от 1 до 550 тыс. чел.

Накопление опыта проектирования и сопровождения проектов с постоянной корректировкой, учитывающую динамику изменения местных условий позволяет по-новому ставить задачу проектирования. Оптимизация проектных решений, отвечающих задачам, поставленным в указанных выше директивных документах, требуют совершенствования методов проектирования, а именно, создание алгоритма *динамического проектирования*. Схема теплоснабжения подлежит ежегодной актуализации [20]. Данная модель регулярной актуализации позволяет оперативно учитывать фактические темпы реализации схемы теплоснабжения, развитие городской застройки, макроэкономическую ситуацию.

Применение методов динамического проектирования в стратегическом планировании позволяет избежать недостатков и неточностей долгосрочного планирования и делает такие документы максимально приближенными к реальности, то есть выполнимым

В заключение позволим высказать некоторые предположения о дальнейших путях развития централизованного теплоэнергоснабжения. Эпоха, когда теплоэнергетические установки имели термодинамический КПД порядка 25-35% и централизованное теплоснабжение на основе комбинированной выработке тепловой и электрической энергии в местах сосредоточения промышленных предприятий и компактного проживания населения, обладала неоспоримыми преимуществами перед другими видами теплоснабжения, заканчивается. Тому есть ряд разноплановых предпосылок: технических,

экономических, экологических, социальных и некоторых других. В обозримый период энергетика будет развиваться преимущественно на базе мощных комбинированных парогазовых блоков, термодинамический КПД которых уже достиг значений 55-65%. Далее прогресс в энергетике, скорее всего, будет связан с гибридными энергосистемами. Так, например, гибридная топливная система "топливные элементы – ГТУ", разрабатываемая в США в рамках программы NGGT, по прогнозам позволит превысить значение КПД 80%. Появление в последние годы и успешное развитие технологии ферментативных топливных элементов (ФТЭ), не чувствительных к засорению газов сероводородом (SH_3) и окиси углерода (СО) позволяет использовать для *прямого преобразования в электрическую энергию биоводорода*, получаемого из коммунальных отходов [21]. Одновременно, не оправдались господствующие во второй половине XX в. надежды, связанные с расширенным использованием атомной энергии в теплоснабжении. Таким образом доля электроэнергии в мировом энергетическом балансе будет неуклонно расти.

На этом фоне будет увеличиваться вклад в энергетический баланс местных, локальных источников энергии (ТНУ, солнечных коллекторов, геотермальных источников, утилизаторов биомасс и отходов её переработки, ветродвигателей и т.п.). Чем удачней, экономически эффективней, будет их сочетание с существующими системами централизованного теплоснабжения, тем успешней будет конкуренция подобных *бивалентных* (или *поливалентных*) централизованных систем с системами электрического отопления.

Литература

1. **Михельсон В. А.** О динамическом отоплении. - Журн. прил. Физики, 1926, т. III, вып. 3 - 4 с. 243 - 260.
2. **Thomson W.** On the economy of heating or cooling of building by means of currents of air. – In: Mathematical and physical papers. Vol. 1. Cambridge: University press, 1882, p. 515 – 520.
3. **100 лет теплофикации России.** Изд-во "Новости теплоснабжения".: М, 2003. -.....с.
4. **Теплотехника и теплофизика. Экономика энергетики и экология.** *Воспоминания* / Стырикович М. А.; отв. ред. О. Н. Фаворский, Д. С. Львов. - М.: Наука, 2002. - 319 с.
5. **Владимиров Я.А., Сергеев В.В.** Анализ технико-экономической эффективности использования теплового насоса //
6. Приказ Минэнерго России от 01.03.2017 №143 «Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2017-2023 годы».
7. Федеральный закон «О теплоснабжении» от 27.07.2010 №190-ФЗ;

8. **Sergeev V.V., Vladimirov Y.A., Kalinina K.S., Kozhukar E.V.** Gasification and plasma gasification as type of the thermal waste utilization //Construction of unique buildings and structures, 2016, №12, с. 85-93.
9. **Янтовский Е.И., Пустовалов Ю.В.** Парокомпрессионные теплонасосные установки. М.: Энергомздаи, 1982. 141 с.
10. **Плахута, А.Д.** Современный подход к выбору оптимального источника теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка, 2015, №2. С. 33-38.
11. **Ротов П.В.** Повышение эффективности работы централизованных систем теплоснабжения за счет применения теплонасосных установок / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, А.А. Сивухин // Промышленная энергетика., 2014, № 7. С. 27-31.
12. **Методика** расчета радиуса эффективного теплоснабжения для схем теплоснабжения // В.Н. Папушкин, С.О. Полянцев, А.П. Щербаков, А.А. Храпков. 2014 г. URL: http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1601.
13. **Зысин Л.В., Сергеев В.В.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / часть 1. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 191 с.
14. **Андрющенко А.И.** Техническая работоспособность термодинамических систем. Саратов: Изд. Саратовского авто-дорожного ин-та, 1956. 144 с.
15. **Бошнякович, Ф.** Техническая термодинамика / Пер. с нем. и ред. М. П. Вукаловича и В. А. Кириллина. М.-Л: Госэнергоиздат, Том 1, 1955. 440 с. Том 2, 1956. 255 с.
16. **Бродянский В.М.** Энергетический метод термодинамического анализа. М.: "Энергия", 1973. 269 с.
17. **Гохштейн Д.П.** Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М.: "Энергия". 1969.368 с.
18. **Боровков В.М., Скулкин С.В.** Применение энтропийного и эксергетического методов для выявления мест локализации субъективных энергетических потерь // Надёжность и безопасность энергетики. 2010, №3. С. 27-30.
19. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 №1715-р «Об энергетической стратегии России на период до 2030 года»
20. Постановление Правительства Российской Федерации «О требованиях к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения» от 22.02.2012 №154;
21. **Василов Р.Г., Решетилов Д.Н., Шестаков А.И.** Биотопливные элементы. "Природа", 2013, №12. С. 65-70.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЯХ

1. **СЕРГЕЕВ Виталий Владимирович** – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, проректор по научной работе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
E-mail: vitaly.sergeev@spbstu.ru.
2. **ВЛАДИМИРОВ Ярослав Александрович** – заместитель заведующего НИЛ «Промышленная теплоэнергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. E-mail: vladimirov@nil-teplo.ru.
3. **ЗЫСИН Леонид Владимирович** – доктор технических наук, научный сотрудник Института интегральных исследований (ИИИ), Geula 39, Haifa, 33197, Israel. E-mail: lv_zyssin@mail.ru

AUTHORS

1. **SERGEEV Vitalii V.** – Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, polytechnicheskaya str., 29 E-mail: vitaly.sergeev@spbstu.ru.
2. **VLADIMIROV Iaroslav A.** - Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, polytechnicheskaya str., 29 E-mail: vladimirov@nil-teplo.ru.
3. **ZYSSIN Leonid V.** – Integrative Research Institute (IRI), Geula 39, Haifa, 33197, Israel. E-mail: lv_zyssin@mail.ru