

УДК 697.317.4

## Методика выбора оптимальной мощности теплоисточников при реконструкции централизованных систем теплоснабжения

Е.А. Бузоверов<sup>1</sup>, О.Н. Махов<sup>2</sup>, М.В. Исаев<sup>3</sup>, И.Д. Чернов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация

<sup>3</sup> ООО «Эксперт Энерго», г. Москва, Российская Федерация  
E-mail: teoconsult@inbox.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Российские системы теплоснабжения имеют высокий износ, и необходимость их реконструкции является объективной неизбежностью. Одной из проблем, препятствующих реализации программ реконструкции, является низкий уровень предпроектной проработки, связанный с недостатком финансирования и времени на стадии подготовки соответствующих программ. Существующие методики являются трудоемкими, требуют привлечения специализированных организаций, большого объема инженерных расчетов и, как следствие, связаны с достаточно существенными затратами. В связи с этим представляется актуальной задача создания простых и доступных методик, позволяющих оптимизировать технико-экономические показатели системы теплоснабжения в процессе реконструкции.

**Материалы и методы:** Используются методы статистической обработки данных о капитальных и эксплуатационных затратах для определения корреляционных зависимостей технико-экономических показателей системы теплоснабжения от мощности теплоисточников. Построение зависимости осуществлено путем экстраполяции показателей существующей системы теплоснабжения на проектные варианты.

**Результаты:** Разработана технико-экономическая модель, позволяющая выполнять экспресс-оценки оптимальной мощности и количества теплоисточников в системе теплоснабжения. Разработанная модель апробирована на объектах системы теплоснабжения г. Волгограда. Определена оптимальная мощность теплоисточников и выполнен анализ чувствительности целевых показателей модели к различным внешним факторам.

**Выводы:** Разработанная методика является эффективным инструментом, позволяющим оптимизировать технологический облик системы теплоснабжения на стадии предпроектных проработок при минимальных временных и финансовых затратах. Полученные корреляционные зависимости технико-экономических показателей системы централизованного теплоснабжения от мощности теплоисточников позволяют прогнозировать капитальные затраты на их реконструкцию и эксплуатационные показатели при их дальнейшей эксплуатации.

**Ключевые слова:** централизованная система теплоснабжения, теплоисточник, тепловая сеть, тепловая мощность, оптимизация, технико-экономическая модель.

## Methods of calculating optimum source capacity for the reconstruction of district heating systems

E.A. Buzoverov<sup>1</sup>, O.N. Makhov<sup>2</sup>, M.V. Isayev<sup>3</sup>, I.D. Chernov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Joint institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>3</sup> Expert Energo Ltd, Moscow, Russian Federation

E-mail: teoconsult@inbox.ru

### Abstract

**Background:** The high level of wear and tear of the Russian district heating systems necessitates their urgent reconstruction. One of the barriers is the low quality of pre-design preparation due to the lack of time and money. The methods currently in use are labour-consuming; their implementation requires involving specialized organizations and numerous engineering calculations, which makes them very costly. All this makes it urgent to develop simple and cheap reconstruction methods for optimizing technical and economic performance of the heating systems.

**Materials and methods:** The authors used statistical methods of processing data about capital and operational costs to obtain correlation dependences of technical and economic indicators of a heating system on heat source capacity. The dependence was plotted by extrapolating the indicators of the existing system to the design variants.

**Results:** The authors have developed a technical and economic model allowing quick estimation of optimal capacity and heating source number in the heating system. The developed model has been tried out at Volgograd heating facilities. The authors have also determined the optimal capacity of heat sources and analysed the dependence of the model target indicators on different external factors.

**Conclusions:** The developed method is an effective instrument allowing optimization of heating system technical parameters at the design stage with minimum time and financial expenses. The obtained correlation dependences of the technical and economic indicators of the district heating system on heat source capacity allow us to predict capital costs for their reconstruction and operational indicators of their further operation.

**Key words:** district heating system, heat source, heating system, heating capacity, optimization, technical and economic model.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2017.3.020-029

**Введение.** Средний физический износ систем централизованного теплоснабжения в российских городах достигает 70 %, потери во многих тепловых сетях достигают 20 %, расход электроэнергии на выработку и транспорт тепла – 40 кВт·ч/Гкал<sup>1</sup>, что приводит к низкому уровню надежности и качества теплоснабжения потребителей, а также к росту издержек. Это вынуждает муниципалитеты и теплоснабжающие организации искать возможности реновации систем теплоснабжения. Одновременно в крупных населенных пунктах активно идут процессы расширения существующих жилых районов и реализуются проекты их комплексной застройки. Но, как в случае модернизации, так и в случае нового строительства возникает вопрос выбора оптимальных технологий, обеспечивающих приемлемый уровень надежности, качества и экологичности систем централизованного теплоснабжения при минимальных издержках.

Практика показывает, что принятие таких решений не всегда выполняется с достаточной степенью обоснованности, поскольку на предпроектной стадии, как правило, имеются ограничения по объему финансирования и срокам.

Сегодня определение даже предварительных технико-экономических показателей будущей системы централизованного теплоснабжения требует привлечения специализированных организаций, большого объема инженерных расчетов и, как следствие, связано с достаточно существенными затратами. Трудоемкость расчетных методик приводит к тому, что проектанты сравнивают не более двух конкретных вариантов, что не всегда позволяет найти наиболее оптимальное решение поставленной задачи.

Реализация неоптимальных технологических решений ведет как к неэффективному расходованию денежных средств на обеспечение потребителей тепловой энергией, так и к нежелательным последствиям в плане экологичности, промышленной безопасности и надежности систем теплоснабжения. В сложившейся ситуации становится целесообразным создание методик, позволяющих при использовании минимального объема исходной информации, простых инженерных расчетов вести оптимизационные расчеты по определению оптимальных характеристик систем теплоснабжения, в частности мощности теплоисточников в системе теплоснабжения.

Ниже получены зависимости для расчета длины, материальной характеристики тепловой сети и других технико-экономических показателей системы теплоснабжения при различной единичной мощности теплоисточников. На основании полученных зависимостей разработана расчетная методика оценки оптимальной мощности теплоисточников реконструируемых систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) на базе фактических технико-экономических показателей существующей системы теплоснабжения. Методика апробирована на системе теплоснабжения г. Волгограда.

Вопросы выбора оптимальной мощности источников теплоснабжения в СЦТ подробно рассматривались в отечественной научно-технической литературе на протяжении всей истории развития централизованного теплоснабжения [1]. Техничко-экономические расчеты, выполненные большинством исследователей, показали, что на протяжении многих десятилетий для большинства городов и поселков наиболее эффективным решением оказывалось укрупнение источников теплоснабжения. При существовавшем техническом уровне агрегатов централизация позволяла также решить проблемы надежности. В настоящее время, в связи со сменой экономической ситуации и существенным повышением технического уровня инженерных систем, вопрос оптимальной степени централизации может иметь различные решения. Широко внедряются индивидуальные и автономные когенерационные и некогенерационные системы теплоснабжения, а также групповые котельные небольшой мощности. Выполнены расчеты, подтверждающие в ряде случаев целесообразность децентрализации.

Для определения оптимальной мощности теплоисточников используются различные методики. Наиболее простой способ состоит в расчете целесообразности подключения к существующему источнику дополнительной нагрузки [1]. Но этот вариант позволяет решить только локальные задачи по подключению и отключению отдельных потребителей и не позволяет провести комплексную оптимизацию системы теплоснабжения. Более прогрессивным инструментом планирования развития систем теплоснабжения являются компьютерные информационные геосистемы. Наиболее популярные отечественные информационные продукты, используемые разработчиками, – ИГС «CityCom-ТеплоГраф», ZuluHydro. Эти продукты позволяют реализовать вышеописанный алгоритм расчетов целесообразности подключения тепловой нагрузки для каждого

<sup>1</sup> Об энергетической стратегии РФ на период до 2030 г.: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009.

объекта системы теплоснабжения. Учитывая возможности современной вычислительной техники, расчеты могут вестись не только для отдельных потребителей, но и для районов комплексной застройки.

Исследователями были предложены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать длину и материальную характеристику тепловых сетей в зоне действия теплового источника как функцию плотности тепловых нагрузок [1]. Информация о плотности тепловых нагрузок может быть получена из градостроительной документации. Поэтому этот вариант расчетов позволяет выполнить оценки на предварительном этапе проработки схемы теплоснабжения, не требует существенных трудозатрат и большого объема исходных данных. На базе этого метода предложены также и эмпирические формулы, позволяющие рассчитать радиус эффективного теплоснабжения [2, 3, 4].

Недостаток данной методики состоит в низкой точности расчетов, связанных с допущениями о равномерности территориального распределения тепловых нагрузок. В зону действия тепловых сетей могут попадать шоссе и железные дороги, рекреационные зоны, водоемы, промышленные зоны. Плотность тепловых нагрузок может существенно варьироваться в пределах района теплоснабжения. Это вносит довольно существенные погрешности в расчеты.

Предложенные соотношения были положены в основу расчетов предельного радиуса теплоснабжения [4], однако было сделано замечание, что данные уравнения носят полуэмпирический характер, и правильный расчет технико-экономических параметров может быть выполнен только при использовании современных электронных моделей на базе геоинформационных систем.

Итак, существующие методики и программные продукты не позволяют решить вопрос выбора оптимальной мощности теплоисточников в системе теплоснабжения на предпроектной стадии наиболее рациональным путем. Поэтому остается актуальным вопрос разработки методики, позволяющей при использовании минимального объема исходной информации, простых инженерных вычислений провести соответствующий оптимизационный расчет.

**Методы исследования.** В соответствии с [5], целевыми критериями, которые необходимо оптимизировать при определении мощности теплоисточника, являются плановые затраты на строительство  $KЗ$ , тыс. руб., издержки на эксплуатацию системы теплоснабжения  $ЭЗ$ , тыс. руб./год, а также приведенные затраты  $З_{прив}$ , тыс. руб./год:

$$З_{прив} = CRF \cdot KЗ + ЭЗ,$$

где  $CRF$  (capital return factor) – безразмерный коэффициент возмещения капитала [9]:

$$CRF = \frac{d/100}{1 - (1 + d/100)^{-n}},$$

где  $d$  – коэффициент дисконтирования, %;  $n$  – горизонт расчета проекта, лет.

В минимальных капитальных затратах может быть заинтересован инвестор-застройщик, в сокращении эксплуатационных затрат – теплоснабжающая организация, а потребителя, как правило, интересует сокращение совокупных приведенных затрат, поскольку они в конечном итоге определяют уровень тарифа на тепловую энергию.

Для расчета приведенных критериев предлагается технико-экономическая модель, основанная на использовании показателей существующей системы при различной степени централизации источников теплоснабжения. Данная модель применима в рамках проектов комплексной реконструкции существующих систем теплоснабжения, в которых планируется замена существующих источников и тепловых сетей.

Оптимизация ведется по ключевому параметру – единичной тепловой мощности котельных. Предполагается, что общая мощность рассматриваемого района теплоснабжения делится между несколькими теплоисточниками в равной пропорции. Вопрос уточнения мощности каждого из теплоисточников, а также их размещение на местности относится к стадии подготовки детальной схемы теплоснабжения района. Для принятой плотности тепловых нагрузок, технологической схемы и прочих инженерных решений удельные капитальные вложения в реконструкцию источника и сетей, а также эксплуатационные затраты могут быть выражены функцией тепловой мощности.

**Характеристики тепловых сетей.** В рамках предпроектных расчетов не рассматриваются вопросы конфигурации и детальной трассировки тепловых сетей, а рассчитываются два обобщающих показателя – материальная характеристика  $M$ ,  $m^2$ , и длина тепловых сетей  $L$ , м, в целом по СЦТ, а также относительные показатели в расчете на единицу подключенной тепловой нагрузки  $M_{уд}$ ,  $m^2 \cdot ч/Гкал$ , и  $L_{уд}$ , м·ч/Гкал. Данные параметры позволяют с достаточной точностью определить необходимые технико-экономические показатели, относящиеся к строительству и эксплуатации тепловых сетей.

Материальная характеристика тепловых сетей определяется как сумма произведения длин  $l_i$ , м, и диаметров  $d_i$ , м, всех участков тепловой сети [11]:

$$M = \sum_{i=1}^n l_i d_i.$$

Удельная материальная характеристика определяется отношением материальной характеристики системы теплоснабжения к подключенной тепловой мощности:

$$M_{уд} = \frac{M}{N_{потр}},$$

где  $N_{потр}$  – нагрузка потребителей, Гкал/ч.

Имея фактические данные по удельной материальной характеристике тепловых сетей от существующего источника теплоснабжения, можно оценить значение этого показателя для случая, когда вместо этого источника в процессе реконструкции будет построено несколько источников меньшей мощности. Аналогично можно оценить укрупнение действующих источников.

Для расчета материальной характеристики и длины тепловых сетей используются эмпирические соотношения, в том числе полученные по результатам анализа типовых проектов.

Удельная материальная характеристика тепловой сети при некоторой постоянной плотности тепловых нагрузок  $M'_{уд_i}$ , м·ч/Гкал, имеет степенную зависимость от единичной мощности теплового источника<sup>2</sup>:

$$M'_{уд_i} = M_{уд_i} \frac{N_{потр\_i}^{0,2}}{N_{потр\_i}^{0,2}}, \quad (1)$$

где  $M_{уд_i}$  – фактическая удельная материальная характеристика тепловых сетей от  $i$ -го теплоисточника, м<sup>2</sup>·ч/Гкал;  $N_{потр\_i}$  – подключенная мощность к  $i$ -му существующему теплоисточнику, Гкал/ч;  $N$  – подключенная мощность к  $i$ -му теплоисточнику после реконструкции, Гкал/ч.

Удельная длина трубопроводов  $L'_{уд_i}$ , м·ч/Гкал, также с достаточной степенью точности аппроксимируется степенной функцией:

$$L'_{уд_i} = L_{уд_i} \frac{N_{потр\_i}^{0,08}}{N_{потр\_i}^{0,08}}, \quad (2)$$

где  $L_{уд_i}$  – фактическая удельная длина тепловых сетей от  $i$ -го теплоисточника, м·ч/Гкал.

**Капитальные затраты.** Капитальные затраты на реконструкцию системы теплоснабжения состоят из затрат на реконструкцию теплоисточников, тепловых сетей и ЦТП. Стоимость реконструкции теплоисточников и сетей может быть определена путем аппроксимации данных о рыночных ценах на реконструкцию систем теплоснабжения, таких как данные тендерных торгов, публикаций и справочников укрупненных расценок [7], с корректировкой на текущий уровень цен:

$$KZ_{кот} = N_{кот} \cdot 12,28 \cdot 10^6 N_{кот}^{-0,463},$$

где  $KZ_{кот}$  – стоимость реконструкции котельной, тыс. руб/Гкал/ч;  $N_{кот}$  – установленная мощность котельной, тыс. руб/Гкал/ч;

$$KZ = 13,9L + 84M;$$

где  $KZ_{сеть}$  – стоимость реконструкции тепловой сети, тыс. руб.

Для ЦТП может быть применена зависимость

$$KZ_{ЦТП} = N_{ЦТП} \cdot 0,916 N_{ЦТП}^{-0,75} \cdot 10^6,$$

где  $KZ_{ЦТП}$  – стоимость реконструкции ЦТП, тыс. руб.;  $N_{ЦТП}$  – установленная мощность ЦТП, тыс. руб/Гкал/ч.

**Баланс выработки и потребления тепловой энергии.** Количество тепловой энергии, вырабатываемой теплоисточниками после реконструкции  $Q'_{выр}$ , Гкал/год, определяется отпуском тепла потребителям, потерями в тепловых сетях и расходом на собственные нужды котельных:

$$Q'_{выр} = Q'_{потр} + Q'_{сн} + Q'_{пот},$$

где  $Q'_{потр}$  – полезный отпуск тепла потребителям, Гкал/год;  $Q'_{сн}$  – расход тепла на собственные нужды котельных, Гкал/год;  $Q'_{пот}$  – потери в сетях, Гкал/год.

Отпуск тепла потребителям источником может быть принят на уровне фактических значений предыдущего периода:

$$Q'_{потр} = \sum_{i=1}^n Q_{потр\_i};$$

где  $Q_{потр\_i}$  – фактический полезный отпуск тепла потребителям за предыдущий период, Гкал/год.

Расход тепла на собственные нужды теплоисточника для водогрейной котельной может быть принят в соответствии с нормативом  $k'_{сн} Q'_{выр}$ , %:

$$Q'_{сн} = \frac{k'_{сн} Q'_{выр}}{100\%}.$$

Тепловые потери в сетях  $Q'_{пот}$  состоят из потерь через изоляционные конструкции трубопроводов и с утечками теплоносителя.

Годовые потери тепла в сетях могут быть приближенно рассчитаны по формуле<sup>3</sup>

$$Q_{пот} = q M_{усл},$$

где  $M_{усл}$  – условная материальная характеристика тепловой сети, м<sup>2</sup>;  $q$  – удельные годовые потери, отнесенные к условной материальной характеристике тепловой сети, Гкал/м<sup>2</sup>;

$$M_{усл} = M + 0,15 \sum L;$$

$$q = 3,6\pi k(\tau_{ср} - t_0)(1 + \beta)n \cdot 10^{-6},$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи с учетом толщины и материала изоляции;  $\tau_{ср}$  – средняя температура воды в трубопроводе, °C;  $t_0$  –

<sup>2</sup> Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. – М.: МЭИ, 2001. – 472 с.

<sup>3</sup> Там же.

среднегодовая температура грунта, °С;  $\beta$  – коэффициент местных тепловых потерь;  $n$  – время работы тепловой сети в год, ч.

Это позволяет сделать вывод о том, что тепловые потери через изоляционные конструкции трубопроводов для определенного теплового графика и климатических условий пропорциональны их условной материальной характеристике, и вычислить тепловые потери после реконструкции на основании фактических данных существующей системы централизованного теплоснабжения:

$$Q'_{\text{пот}_i} = k'_{\text{энергоэф}} Q_{\text{пот}_i} \frac{M'_i + 0,15L'_i}{M_i + 0,15L_i},$$

где  $k'_{\text{энергоэф}}$  – усредненный коэффициент энергоэффективности современных трубопроводных систем по отношению к теплотрассам традиционной конструкции, % (принимается равным 65 %<sup>4</sup>).

*Нормативы расхода ресурсов на выработку и передачу тепловой энергии.* Потребность в топливе в расчетном периоде на выработку тепловой энергии  $T'$ , т у.т./год, определяется по нормам удельного расхода топлива  $T'_{\text{уд}}$ , кг у.т./Гкал, на весь объем выработки тепловой энергии:  $T' = T'_{\text{уд}} Q'_{\text{выр}}$ .

В свою очередь, удельный расход топлива определяется такими параметрами, как тип и мощность котлоагрегата, вид и качество сжигаемого топлива, режимы работы котлоагрегатов и т.п. Но, учитывая принятые условия функционирования проектируемой системы централизованного теплоснабжения – современное энергоэффективное оборудование, газообразное топливо, полная автоматизация, удельный расход топлива для теплоисточников любой мощности может быть принят на уровне 158 кг у.т./Гкал (соответствует КПД нетто котлоагрегатов 90 %). Это подтверждает анализ эффективности современного теплогенерирующего оборудования в различных режимах эксплуатации.

Расход воды на выработку и передачу тепловой энергии  $V$ , м<sup>3</sup>/год, складывается из количества воды, необходимого для разового наполнения трубопроводов тепловых сетей и систем теплопотребления, затрат воды на подпитку системы теплоснабжения и на собственные нужды источников теплоснабжения.

Основной объем потребления воды приходится на первые две позиции – наполнение трубопроводов и подпитку, и пропорционален объему системы теплоснабжения  $V$ , м<sup>3</sup>. Затраты воды на собственные нужды источни-

ков теплоснабжения применительно к водогрейным котельным относительно невелики и ими в предварительных расчетах можно пренебречь.

Поэтому, имея фактический объем потребления воды  $V$  в существующей системе, можно оценить расход воды в проектируемой системе  $V'$ , м<sup>3</sup>/год, используя данные о фактическом и проектном объемах воды в системе ( $V$ , м<sup>3</sup>, и  $V'$ , м<sup>3</sup>, соответственно):

$$V' = V \frac{V'}{V};$$

$$V = \frac{\pi L d_{\text{ср}}^2}{4} = \frac{\pi M^2}{4L}. \quad (3)$$

Обобщая (1), (2) и (3), можно записать формулу для объема трубопроводов:

$$V'_i = V_i \frac{N'_i{}^{0,32}}{N_i{}^{0,32}}.$$

Следовательно,

$$B'_i = B_i \frac{N'_i{}^{0,32}}{N_i{}^{0,32}}.$$

Удельный расход воды в целом по системе  $B^{\text{уд}}$ , м<sup>3</sup>/Гкал, составит

$$B^{\text{уд}} = \frac{\sum_{i=1}^n B'_i}{Q'_{\text{потр}}}.$$

*Норматив расхода электроэнергии для выработки и передачи тепловой энергии.* Удельный объем электрической энергии, расходующейся на отпуск тепла в  $i$ -й системе теплоснабжения  $\mathcal{E}'_{i\text{уд}}$ , кВт·ч/Гкал, складывается из потребления электроэнергии на выработку  $\mathcal{E}'_{\text{выр}_i\text{уд}}$ , кВт·ч/Гкал, и транспорт тепловой энергии  $\mathcal{E}'_{\text{тр}_i\text{уд}}$ , кВт·ч/Гкал:

$$\mathcal{E}'_{i\text{уд}} = \mathcal{E}'_{\text{выр}_i\text{уд}} + \mathcal{E}'_{\text{тр}_i\text{уд}}.$$

Удельный расход электроэнергии на выработку тепловой энергии применительно к газовой котельной при работе на закрытую систему теплоснабжения  $\mathcal{E}'_{\text{выр}}\text{уд}$  составляет 5–6 кВт·ч/Гкал<sup>5</sup>.

Затраты на транспорт тепла связаны преимущественно с работой сетевых насосов. Расход электроэнергии на привод сетевого насоса определяется исходя из гидравлического сопротивления, преодолеваемого насосом, и массового расхода теплоносителя<sup>6</sup>:

<sup>4</sup> Об организации в министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии: Приказ Мин. энергетики Рос. Федерации от 30.12.2008 № 325.

<sup>5</sup> Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий. ГУП Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова. – М., 2002.

<sup>6</sup> Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. – М.: МЭИ, 2001. – 472 с.

$$\mathcal{E}_{\text{тр}} = \frac{G \Delta p n}{\rho \eta} 10^{-3}, \quad (4)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $\Delta p$  – перепад давлений, развиваемый насосами, Па;  $n$  – число часов работы насосов в год, ч;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – КПД насосной установки.

При изменении мощности теплоисточника в формуле (4) существенно изменяется параметр  $\Delta p$ , массовый расход теплоносителя  $G$  меняется пропорционально мощности, прочие параметры можно с определенной степенью точности принять постоянными. Таким образом, удельный расход электроэнергии на единицу теплоты зависит только от перепада давления, развиваемого насосом. Потеря давления в сети может быть рассчитана по выражению

$$\Delta p = R_{\text{л}} L (1 + \alpha), \quad (5)$$

где  $R_{\text{л}}$  – удельное линейное падение давления в главной магистрали;  $L$  – длина главной магистрали, м;  $\alpha$  – коэффициент местных потерь.

В формуле (5) значения  $R_{\text{л}}$  и  $\alpha$  при масштабировании системы теплоснабжения не претерпевают существенных изменений. Длина главной магистрали  $L$  пропорциональна квадратному корню из площади района теплоснабжения (при принятом допущении о правильной, квадратной форме района теплоснабжения). При равной плотности тепловых нагрузок существует пропорциональная зависимость между мощностью теплоисточника и площадью района теплоснабжения.

Таким образом, удельный расход электроэнергии на транспорт тепла в проектируемой системе может быть рассчитан на основе данных о среднем фактическом удельном расходе электроэнергии и средней тепловой нагрузке:

$$\mathcal{E}'_{\text{тр}_\text{ср}} = \mathcal{E}'_{\text{тр}_\text{ср}} \frac{N'_{\text{ср}}{}^{0,5}}{N_{\text{ср}}{}^{0,5}}. \quad (6)$$

Общий расход электроэнергии на выработку и транспорт тепла составляет

$$\mathcal{E}'_{\text{уд}} = \mathcal{E}'_{\text{выр}_\text{ср}} + \mathcal{E}'_{\text{тр}_\text{ср}}.$$

**Удельная численность производственного персонала.** Численность персонала<sup>7</sup> котельных с автоматизированными котлами может быть принята в соответствии с действующими нормативами:

- операторы котельных установок

$$\Pi_{\text{опер}}^{\text{ист}} = 1,247 N_{\text{уст}}^{0,3};$$

- персонал, занятый техническим обслуживанием котельных установок,

$$\Pi_{\text{ТО}}^{\text{ист}} = 0,3 N_{\text{уст}}^{0,6};$$

- численность персонала тепловых сетей
- $$\Pi^{\text{сеть}} = 0,017 M^{0,72}.$$

**Эксплуатационные затраты.** Затраты на ремонт оборудования могут быть рассчитаны в соответствии с нормативами отчислений на текущий и капитальный ремонт<sup>8</sup> от первоначальной стоимости оборудования:

$$TP'_{\text{кот}} = 4\% \cdot KZ_{\text{кот}};$$

$$TP'_{\text{сети}} = 0,8\% \cdot KZ_{\text{сети}},$$

где  $TP'_{\text{кот}}$  – затраты на текущий ремонт котельных, тыс. руб/год;  $TP'_{\text{сеть}}$  – затраты на текущий ремонт сетей тыс. руб/год.

Аналогично рассчитываются затраты на капитальный ремонт котельных  $KP'_{\text{кот}}$ , тыс. руб/год, и сетей  $KP'_{\text{сети}}$ , тыс. руб/год:

$$KP'_{\text{кот}} = 1,5\% \cdot KZ_{\text{кот}};$$

$$KP'_{\text{сети}} = 0,9\% \cdot KZ_{\text{сети}}.$$

**Оптимизационные расчеты на примере системы теплоснабжения г. Волгограда.** Для апробирования методики выбора оптимальной мощности источников теплоснабжения и определения основных факторов, влияющих на целевые показатели, были проведены расчеты по 22 системам теплоснабжения г. Волгограда. В процессе расчетов оптимизировалась мощность теплоисточников по критериям приведенных, эксплуатационных и капитальных затрат.

В табл. 1 приведены исходные данные, использованные в расчетах. Также в расчетах были использованы фактические данные о потреблении ресурсов и затрат на их оплату, предоставленные эксплуатирующей организацией МУП ВКХ.

Выполненные расчеты показали, что оптимальные уровни мощности теплоисточников, рассчитанные для различных субъектов системы теплоснабжения – муниципалитета (критерий минимальных приведенных затрат), инвестора-застройщика (критерий минимальных капитальных затрат) и теплоснабжающей организации (критерий минимальных эксплуатационных затрат), значительно различаются.

Для инвестора-застройщика будут выгодны проекты строительства квартальных котельных средней мощности – около 30 Гкал/ч, которые позволяют обеспечить районы комплексной застройки. И именно тенденция строительства теплоисточников малой и средней мощности наблюдается в большинстве современных девелоперских проектов, реализуемых в российских городах.

<sup>7</sup> Нормативы численности рабочих котельных установок и тепловых сетей. Всесоюзный центр производительности министерства труда и социальных вопросов СССР. – М, 1991.

<sup>8</sup> Ионин А.А., Хлыбов Б.М., Братенков В.Н. Теплоснабжение: учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.

Таблица 1. Характеристики систем теплоснабжения

Наименование и адрес котельной	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Материальная характеристика, кв. м
Котельная № 3 пос. Водстрой ул. Костюченко, 8а	10	2 266
Котельная квартала 412 ул. Гороховцев, 1	124	14 088
Котельная квартала 849 ул. Мещерякова, 12	133	15 878
Котельная «ВИЗ» ул. Ясноморская, 2	20	4 421
Котельная квартала 317 Хрустальная, 8а	62	6 259
Котельная «4-х Связистов» ул. 4-х Связистов, 23а	66	6 563
Котельная квартала 629 ул. Богунская, 12а	115	13 259
Котельная квартала 164 ул. Титова, 20а	22	2 392
Котельная квартала 135-1 оч. ул. В.-Казахстанская, 18	13	1 079
Котельная квартала 199 ул. К. Либкнехта	22	1 544
Котельная квартала 127 «Кача» б-р 30-летия Победы, 27а	26	3 703
Котельная "БСМП" ул. Землячки, 74	14	1 018
Котельная ЖБИ-1 ул. 51-я Гвардейская, 1а	99	23 935
Котельная квартала 40 ул. Пражская, 18	91	9 785
Котельная ЦРТС (ТДИН) ул. Глазкова, 15	187	22 875
Котельная квартала 207 ул. Нежинская, 32	15	2 037
Котельная квартала 82 ул. Социалистическая, 19	136	13 041
Котельная квартала 494 ул. Шефская, 84/1	64	7 204
Котельная квартала 71 ул. Тулака, 6/1	10	740
Котельная «ДОЗ им. Куйбышева» ул. 25 лет Октября, 1	30	3 493
Котельная квартала 1111 ул. Закавказская, 4	97	17 588
Котельная 1308 ул. Новоанненская, 1	117	18 453
<b>ИТОГО:</b>	<b>1 472</b>	<b>191 620</b>
<b>Среднее значение:</b>	<b>67</b>	<b>8 710</b>

Теплоснабжающая организация, как правило, заинтересована в эксплуатации районных котельных мощностью 80 Гкал/ч и выше. Этот вывод подтверждает анализ хозяйственной деятельности теплоснабжающих организаций в различных российских регионах. Крупные районные котельные в большинстве случаев являются наиболее рентабельными объектами в системах теплоснабжения российских городов, доходы от которых направляются на покрытие убытков, образующихся при эксплуатации котельных малой мощности.

Приведенные затраты являются средне-взвешенной величиной капитальных и эксплуатационных затрат, при этом в качестве коэффициента взвешивания используется коэффициент CRF, зависящий от экономической ситуации в стране, уровня процентной ставки по банковским кредитам. При процентной ставке 15 %, оптимальная мощность теплоисточников по данному критерию составляет 46 Гкал/ч. Данный уровень мощности является приемлемым для муниципалитета и потребителей.

Приведенные выводы справедливы для рассматриваемых систем централизованного теплоснабжения г. Волгограда. Для других систем, расположенных в других климатических зонах, использующих другое топливо и имеющих иные особенности, расчетные показатели могут отличаться.

*Основные факторы, влияющие на уровень оптимальной мощности.* Оптимальный уровень мощности теплоисточников, определяемый по критерию минимальных капитальных затрат, в значительной степени зависит от материальной характеристики и протяженности тепловых сетей в зоне теплоснабжения.

**Результаты расчетов.** Результаты расчетов по оптимизации мощности теплоисточников, выполненные по рассматриваемой методике, приведены в табл. 2.

Оптимальный уровень мощности теплоисточников показывает определенную чувствительность к удельной материальной характеристике тепловых сетей (рис. 1). Это соответствует выводам ряда исследователей [7, 1]. В целом, при увеличении удельной материальной характеристики снижается оптимальный уровень мощности теплоисточников, рассчитанный по критерию капитальных затрат. Однако следует обратить внимание, что по ряду позиций разброс оптимальных мощностей достигает двукратного значения. Очевидно, что разброс значений возникает из-за различной удельной протяженности тепловых сетей (или, что то же самое, из-за различного среднего диаметра), поскольку от этого показателя напрямую зависят капитальные затраты на реконструкцию системы теплоснабжения.

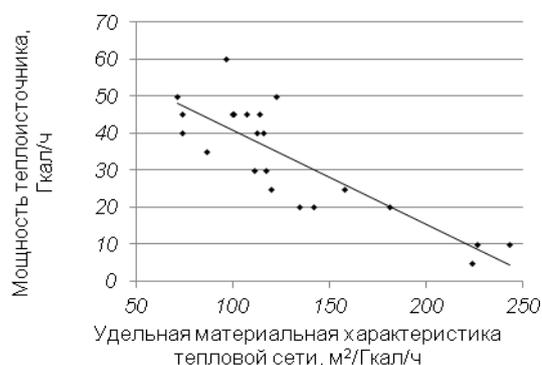


Рис. 1. Зависимость оптимальной мощности теплоисточников от удельной материальной характеристики (критерий – капитальные затраты)

Таблица 2. Результаты расчетов

Наименование и адрес котельной	Подключенная нагрузка, Гкал/ч	Оптимальная нагрузка, Гкал/ч по критерию		
		приведенные затраты	эксплуатационные затраты	капитальные затраты
Котельная № 3 пос. Водстрой ул. Костюченко, 8а	10	10	30	5
Котельная квартала 412 ул. Гороховцев, 1	124	60	85	45
Котельная квартала 849 ул. Мещерякова, 12	133	50	95	25
Котельная «ВИЗ» ул. Ясноморская, 2	20	20	35	10
котельная 317 ул. Хрустальная, 8а	62	45	110	45
Котельная «4-х Связистов» ул. 4-х Связистов, 23а	66	45	105	45
Котельная квартала 629 ул. Богунская, 12а	115	55	75	40
Котельная квартала 164 ул. Титова, 20а	22	40	105	30
Котельная квартала 135-1 оч. ул. В.-Казахстанская, 18	13	45	75	35
Котельная квартала 199 ул. К. Либкнехта	22	55	60	50
Котельная квартала 127 «Кача» б-р 30-летия Победы, 27а	26	20	40	20
Котельная «БСМП» ул. Землячки, 74	14	55	75	45
Котельная ЖБИ-1 ул. 51-я Гвардейская, 1а	99	20	45	10
Котельная квартала 40 ул. Пражская, 18	91	65	175	45
Котельная ЦРТС (ТДИН) ул. Глазкова, 15	187	80	145	50
Котельная квартала 207 ул. Нежинская, 32	15	40	70	20
Котельная квартала 82 ул. Социалистическая, 19	136	70	100	60
Котельная квартала 494 ул. Шефская, 84/1	64	55	150	40
Котельная квартала 71 ул. Тулака, 6/1	10	45	50	40
Котельная «ДОЗ им. Куйбышева» ул. 25 лет Октября, 1	30	40	60	30
Котельная квартала 1111 ул. Закавказская, 4	97	35	55	20
Котельная 1308 ул. Новоанненская, 1	117	55	155	25
<b>ИТОГО:</b>	<b>1 472</b>	<b>1 005</b>	<b>1 895</b>	<b>735</b>
<b>Среднее значение:</b>	<b>67</b>	<b>46</b>	<b>86</b>	<b>33</b>

Таким образом, оптимальная мощность теплоисточников по критерию минимальных капитальных затрат должна определяться с использованием как минимум двух показателей – удельной материальной характеристики тепловой сети и ее удельной протяженности.

Показатель удельной материальной характеристики в диапазоне до 200 м<sup>2</sup>/Гкал/ч оказывает незначительное влияние на оптимальный уровень мощности по критерию эксплуатационных затрат (рис. 2). В этом диапазоне удельной материальной характеристики оптимальная мощность теплоисточников находится на уровне 50–250 Гкал/ч. При большем значении удельной материальной характеристики оптимальные значения мощности находятся в пределах 50 Гкал/ч.

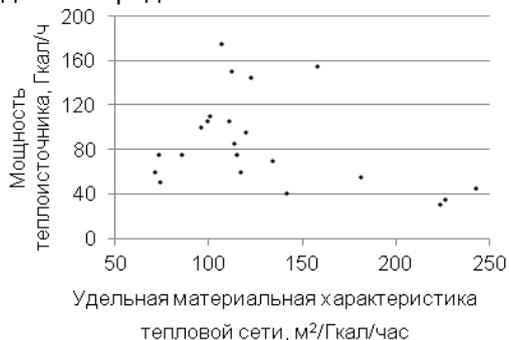


Рис. 2. Зависимость оптимальной мощности теплоисточников от удельной материальной характеристики (критерий – эксплуатационные затраты)

Соответственно, оптимумы мощности по показателю приведенных затрат показывают определенную чувствительность к удельной материальной характеристике тепловой сети, но менее выраженную по сравнению с зависи-

мостью от капитальных затрат (рис. 3). Среднеквадратичное отклонение выборки оптимумов мощности по критерию приведенных затрат находится на уровне 0,44 против 0,71 по критерию капитальных затрат.

Таким образом, уровень мощности теплоисточников, позволяющий эксплуатировать систему теплоснабжения с минимальными приведенными затратами, зависит от целого набора технико-экономических показателей, таких как материальная характеристика, протяженность тепловых сетей, нормы потребления энергоресурсов, а также ценовых факторов.

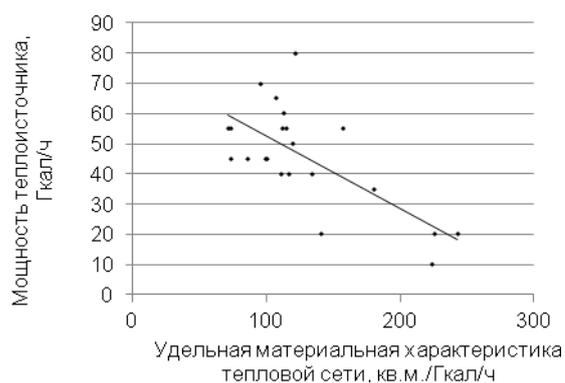


Рис. 3. Зависимость оптимальной мощности теплоисточников от удельной материальной характеристики (критерий – приведенные затраты)

**Стоимость капитала.** Анализ чувствительности, проведенный по уровню процентной ставки на банковское финансирование (рис. 4), показывает, что уровень оптимальной мощности теплоисточников снижается при нестабильной ситуации на финансовых рынках и

росте процентных ставок. Таким образом, при текущей ситуации в российской экономике, для которой характерна высокая стоимость заемных денег, целесообразно снижать единичную мощность теплоисточников. И наоборот, в стабильной ситуации, например в европейских условиях, создание теплоисточников значительной мощности является более выгодным.

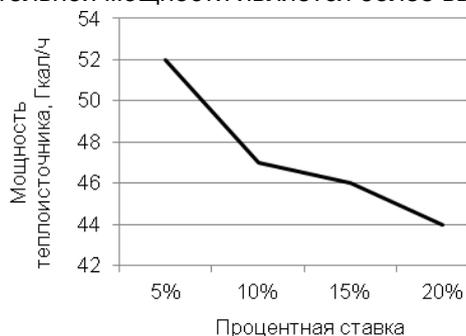


Рис. 4. Зависимость оптимальной мощности теплоисточников от процентной ставки по банковским кредитам

**Удельные капитальные вложения.** Анализ чувствительности по показателю удельных капитальных затрат в реконструкцию СЦТ в диапазоне от 50 до 200 % к расчетному уровню выявил, что оптимальная мощность теплоисточников растет при увеличении удельных капитальных вложений (рис. 5). Такие выводы были сделаны при условии равномерного увеличения стоимостных показателей по всем элементам системы теплоснабжения (источники и сети). Причем следует отметить, что эта зависимость является сильно выраженной. При снижении затрат до уровня 50 % от текущего уровня оптимальная мощность снижается до 27 Гкал/ч, при повышении до 200 % – увеличивается до 85 Гкал/ч. Настолько существенное варьирование оптимального уровня теплоисточников при изменении уровня цен на объекты строительства обозначает возможность кардинальной смены стратегий развития СЦТ с переходом от строительства квартальных котельных к районным источникам, что может внести существенные коррективы в существующие схемы теплоснабжения городов.

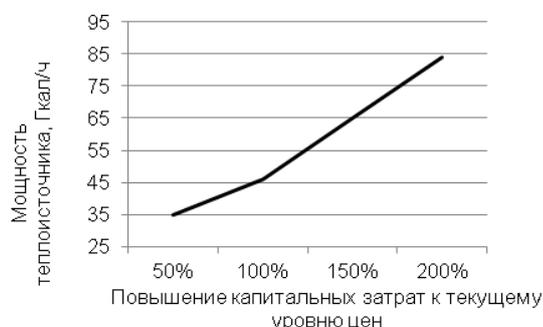


Рис. 5. Зависимость оптимальной мощности теплоисточников от уровня капитальных затрат

Представленные расчеты демонстрируют функциональность разработанной модели, по-

зволяющей не только определить оптимальную мощность теплоисточника, но и структуру затрат на выработку и транспорт тепла, а также выполнить анализ чувствительности. Расчеты показали, что наибольшее влияние на оптимальную мощность теплоисточников в СЦТ оказывает плотность тепловых нагрузок, что подтверждает выводы, сделанные другими исследователями. В то же время выявлено существенное влияние и других факторов, таких как стоимость капитала и общий уровень удельных капитальных затрат.

**Выводы.** Разработанная технико-экономическая модель позволяет на предпроектной стадии реконструкции при минимальных временных и финансовых затратах провести экспресс-оценки оптимальной мощности и количества теплоисточников как одного из ключевых параметров ее эффективности. Полученные зависимости позволяют рассчитать технико-экономические показатели тепловой сети (длина и материальная характеристика) для различных вариантов реконструкции системы теплоснабжения при различной единичной мощности теплоисточников в системе.

Полученные корреляционные зависимости технико-экономических показателей системы централизованного теплоснабжения от мощности теплоисточников позволяют прогнозировать капитальные затраты на их реконструкцию и эксплуатационные показатели при их дальнейшей эксплуатации.

Оптимизационный расчет, проведенный с использованием технико-экономических показателей реальных систем теплоснабжения г. Волгограда, показал, что в зонах плотной городской застройки оптимальная мощность теплоисточников находится на уровне: 46 Гкал/ч – для муниципалитета; 86 Гкал/ч – для теплоснабжающей организации; 33 Гкал/ч – для инвестора-застройщика. Для зон с низкой плотностью тепловых нагрузок оптимальный уровень мощности теплоисточников – 5–10 Гкал/ч.

Разработанная технико-экономическая модель показывает высокую чувствительность оптимальной мощности теплоисточников к экономической ситуации в стране. Высокая стоимость капитала определяет целесообразность снижения этого показателя.

Наблюдаемый рост капитальных затрат на реконструкцию систем теплоснабжения в российской экономике также приводит к снижению оптимальной мощности теплоисточников.

#### Список литературы

1. Якимов Л.К. Предельный радиус теплофикации // Тепло и Сила. – 1931. – № 9. – С. 8–10.
2. Папушкин В.Н. Радиус теплоснабжения. Хорошо забытое старое // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 9. – С. 44–49.
3. Папушкин В.Н., Григорьев А.С., Щербаков А.П. Задачи перспективных схем теплоснабжения. Изменение зон действия источников тепловой энергии (систем тепло-

снабжения) // Новости теплоснабжения. – 2013. – № 3. – С. 13–25.

4. **Методика** расчета радиуса эффективного теплоснабжения для схем теплоснабжения / В.Н. Папушкин, С.О. Полянцев, А.П. Щербakov, А.А. Храпов // Новости теплоснабжения. – 2014. – № 9. – С. 44–47.

5. **Определение** оптимальной мощности теплового источника централизованного теплоснабжения на основании экспресс-расчета с использованием критериев эффективности / Е.А. Бузоверов, И.Д. Чернов, М.В. Исаев, О.Н. Махов // Современные материалы и технологии. – 2016. – № 5(8). – С. 28–32.

6. **Ereev S., Patel M.** Standardized cost estimation for new technologies (SCENT) – methodology and tools // Journal of Business Chemistry. – 2012. – № 9. – С. 31–48.

7. **Бузоверов Е.А., Островский В.М.** Об удельных капитальных затратах на строительство котельных и тепловых сетей // Промышленная энергетика. – 2015. – № 11. – С. 7–11.

#### References

1. Yakimov, L.K. Predel'nyy radius teplofikatsii [Limit value of the heating supply radius]. *Teplo i Sila*, 1931, no. 9, pp. 8–10.

2. Papushkin, V.N. Radius teplosnabzheniya. Khorosho zabytoe staroe [Heating supply radius. The well forgotten old]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2010, no. 9, pp. 44–49.

*Бузоверов Евгений Анатольевич,*

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,

научный сотрудник отдела энергетических установок,

телефон (495) 485-10-63,

e-mail: teoconsult@inbox.ru

*Buzoverov Yevgeny Anatolyevich,*

Joint institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,

Researcher of the Power Plant Department,

tel. (495) 485-10-63,

e-mail: teoconsult@inbox.ru

*Махов Олег Николаевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики,

e-mail: kaf.tovarov.ruc@mail.ru

*Makhov Oleg Nikolayevich,*

Ivanovo State Power Engineering University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering,

e-mail: kaf.tovarov.ruc@mail.ru

*Исаев Михаил Владимирович,*

ООО «Эксперт Энерго»,

кандидат технических наук, руководитель проектов,

телефон (499) 647-61-25,

e-mail: isaevm7@mail.ru

*Isayev Mikhail Vladimirovich,*

Expert Energo Ltd.,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Project Leader,

tel. (499) 647-61-25,

e-mail: isaevm7@mail.ru

*Чернов Игорь Дмитриевич,*

ООО «Эксперт Энерго»,

директор,

телефон (499) 647-61-25,

e-mail: igor.chernov@eenergo.ru

*Chernov Igor Dmitrievich,*

Expert Energo Ltd.,

Director,

tel. (499) 647-61-25,

e-mail: igor.chernov@eenergo.ru

3. Papushkin, V.N., Grigor'ev, A.S., Shcherbakov, A.P. Zadachi perspektivnykh skhem teplosnabzheniya. Izmenenie zon deystviya istochnikov teplovoy energii (sistem teplosnabzheniya) [Goals of the future heating supply schemes. Changing of heat source operation areas (heating supply systems)]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2013, no. 3, pp. 13–25.

4. Papushkin, V.N., Polyantsev, S.O., Shcherbakov, A.P., Khrapkov, A.A. Metodika rascheta radiusa effektivnogo teplosnabzheniya dlya skhem teplosnabzheniya [Method of heating supply radius calculation for heating supply schemes]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2014, no. 9, pp. 44–47.

5. Buzoverov, E.A., Chernov, I.D., Isayev, M.V., Makhov, O.N. Opreделение optimal'noy moshchnosti teplovogo istochnika tsentralizovannogo teplosnabzheniya na osnovanii ekspress rascheta s ispol'zovaniem kriteriev effektivnosti [Calculation of the optimal heat capacity of the heat source in the district heat systems based on quick evaluation by using efficiency criteria]. *Sovremennye materialy i tekhnologii*, 2016, no. 5(8), pp. 28–32.

6. Ereev, S., Patel, M. Standardized cost estimation for new technologies (SCENT) – methodology and tools. *Journal of Business Chemistry*, 2012, no. 9, pp. 31–48.

7. Buzoverov, E.A., Ostrovsky, V.M. Ob udel'nykh kapital'nykh zatratkha na stroitel'stvo kotel'nykh i teplovykh setey [On unit capital costs of constructing boiler units and heating systems]. *Promyshlennaya energetika*, 2015, no. 11, pp. 7–11.