

УДК 697.34

Соломин Илья Николаевич

главный инженер проекта

E-mail: solil1@yandex.ru

ЗАО «НПП «Компрессор»

Адрес организации: 420054, Россия, г. Казань, ул. Актайская, д. 21

Даминов Айрат Заудатович

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»

E-mail: daminov@list.ru

Адрес организации: 420111, Россия, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

Садыков Ренат Ахатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: sadykov_r_a@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Оптимизация режимов эксплуатации и параметров систем централизованного коммунального теплоснабжения

Аннотация

Постановка задачи. Работа направлена на разработку оптимизационных решений по повышению энергоэффективности тепловых сетей закрытых систем централизованного коммунального теплоснабжения.

Результаты. Разработан метод расчета и проектирования трубопроводных систем теплоснабжения, где основной частью являются разработанные методика определения оптимальных параметров системы теплоснабжения от теплоисточника до потребителя и методика определения температурного графика регулирования нагрузки с целью оптимального потребления энергоресурсов на теплоисточнике.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности достижения минимальных значений потерь и эксплуатационных затрат в тепловой сети. Эффектом от оптимизации является возможность снизить расчетный температурный график, что приведет к экономии природного газа на источнике и снижению себестоимости тепловой энергии. Данные методики позволят при строительстве новых и модернизации действующих систем централизованного теплоснабжения выбрать наиболее энергоэффективные, рациональные и оптимальные проектные решения.

Ключевые слова: система теплоснабжения, оптимизация, методика, математическая модель.

Введение

На основании Федерального закона № 190-ФЗ «О теплоснабжении» развитие систем теплоснабжения жилых массивов необходимо осуществлять в целях удовлетворения спроса на тепловую энергию, теплоноситель и обеспечения надежного теплоснабжения наиболее экономичным способом при минимальном вредном воздействии на окружающую среду, экономическом стимулировании развития и внедрения энергосберегающих технологий.

Развитие объектов муниципальных образований формирует потребность в модернизации и оптимизации действующих систем теплоснабжения, с учетом изменения (увеличения) тепловых нагрузок и принципов энергосбережения, вызванных непрерывным ростом стоимости энергоресурсов. Это в свою очередь отражается на стоимости тепловой энергии для конечного потребителя, вызывает рост тарифов на тепловую энергию, что ухудшает общую социальную обстановку.

Все мероприятия по снижению издержек в теплоснабжении должны быть направлены на повышение эффективности транспорта и распределения тепловой энергии и обеспечивать надежное и качественное теплоснабжение потребителей. Под энергосбережением в системах теплоснабжения понимается снижение энергоресурсов на источниках тепловой энергии (котельных) и при ее транспортировке и распределения по

потребителям. Основные энергоресурсы для выработки и транспорта тепловой энергии являются топливо (природный газ), сжигание которого необходимо для нагрева теплоносителя до требуемой температуры и электроэнергия для привода сетевых насосов, перекачивающих теплоноситель по тепловым сетям. Из этого следует, что энергосбережение в системах теплоснабжения обусловлено снижением расхода и экономией данных видов энергоресурсов.

Анализ состояния исследований

Энергоэффективная работа существующих систем централизованного теплоснабжения может быть достигнута посредством оптимизации параметров системы, оказывающих большее влияние на затраты энергоресурсов. Оптимизация заключается в определении оптимальных технологических параметров теплоносителя и технических конструктивных характеристик трубопроводов тепловой сети, включая характеристики тепловой изоляции. Существующие системы регулирования основаны на принципе поддержания расхода теплоносителя в зависимости от температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах. Температуры при этом задаются температурным графиком зависимости температур теплоносителя от температур наружного воздуха, в подавляющем большинстве случаев прямолинейным. Для каждой системы теплоснабжения, в зависимости от схемы тепловой сети, ее протяженности, пропускной способности может быть разработан индивидуальный температурный график и график расходов теплоносителя, при котором энергозатраты на производство и распределение тепловой энергии минимальны. Это достигается определением оптимальных технологических параметров теплоносителя для каждой точки температурного графика наружного воздуха соответствующего географического района страны. Данные графики позволяют оптимизировать энергозатраты на производство и транспорт тепловой энергии в системе теплоснабжения, снизить издержки энергопотребления, а также снизить максимально расчетную температуру теплоносителя. В результате снижения максимальной расчетной температуры теплоносителя значительно снижаются фактические тепловые потери в тепловой сети, уменьшаются температурные напряжения трубопроводов, обусловленные снижением термических расширений материалов трубопроводов, открываются широкие перспективы для применения технологичных, в т.ч. неметаллических материалов трубопроводов и высокоэффективных теплоизоляционных материалов с ограниченным температурным применением. В качестве примера данных разработок можно привести организацию и режимы теплоснабжения в зарубежных странах, таких как Дания, Швеция, Норвегия и др. [1-7]. В системах теплоснабжения данных стран максимально снижена расчетная температура теплоносителя, что обеспечивает возможность применения трубопроводов из полимерных материалов с низким гидравлическим сопротивлением, высокоэффективной теплоизоляции с температурными ограничениями. В отечественных системах теплоснабжения масштаб применения данных видов материалов значительно меньше. Это связано с осуществлением регулирования тепловой нагрузки по повышенным температурным графикам, «доставшимся в наследство от советского прошлого».

Уже на протяжении длительного времени, ученые и инженеры занимаются оптимизацией действующих и вновь конструируемых систем теплоснабжения путем внедрения передовых технологий и определения оптимальных параметров и режимов работы. Применительно к источникам известны работы Л.С. Попырина, В.И. Денисова, Л.С. Хрилева. По оптимизации тепловой сети выделяются работы новосибирский ученых А.П. Меренкова, В.Я. Хасилева [8], основанные на теории гидравлических цепей. За рубежом передовыми странами с развитым централизованным теплоснабжением являются Дания, Швеция, Норвегия. Все разработки инженеров и ученых данных стран направлены на повышение эффективности энергетического оборудования, качественного регулирования тепловой нагрузки и надежного теплоснабжения.

Анализ всех моделей и систем уравнения в области оптимизации тепловых сетей показал, что моделирование проводилось с целью определения наилучшего потокораспределения и расчета гидравлического режима, но без учета взаимодействия системы с окружающей средой, в частности теплообмена с окружающей средой, а также тепловые процессы, имеющие место быть в системе. Для достижения наибольшей

экономичности теплоснабжения также представляется возможным введение дополнительных условий по теплопотерям в тепловой сети, и способов их снижения. Эта необходимость обуславливается тем, что получаемое потребителем количество теплоты зависит только от гидравлического режима работы тепловой сети. Другими словами, температура внутреннего воздуха здания зависит от располагаемого напора (при условии отсутствия регуляторов) и чем больше данный напор, тем выше температура воздуха в здании. Если же их учесть, то можно определить влияние теплопотерь на падение температуры теплоносителя от источника до потребителя. Причинами тепловых потерь в сетях может быть недостаточная теплоизоляция участков трубопроводов (толщина слоя, материал), а также низкая скорость движения теплоносителя на этих участках, т.е. несоответствие диаметров участков расходам теплоносителя на них. Данный анализ тепловых потерь не применяется в исходных методах в работах А.П. Меренкова и В.Я. Хасилева [8].

Разработка метода оптимизации параметров систем теплоснабжения

Как показывает практика, существуют системы теплоснабжения, работа которых сопровождается крайне неэффективным функционированием в неоптимальном режиме. В первую очередь это связано с высокими потерями теплоты в тепловой сети. Для снижения таких потерь разработана методика определения оптимальных параметров тепловой сети, основными из которых являются диаметры участков и расходы теплоносителя на них, а также методика расчета оптимального температурного графика работы системы. Результаты расчетов представляют собой качественные или количественные показатели эффективности от реализации проектируемых мер по энергосбережению топливно-энергетических ресурсов и снижению себестоимости производства тепловой энергии. Показатели энергоэффективности могут быть выражены как в абсолютной, так и в удельной форме. При этом регламентированные условия (режимы) работы соответствуют абсолютной форме представления расходов энергоресурсов.

Для наглядности энергоэффективных мер при внедрении оптимизационных мероприятий являются удельные энергетические затраты энергии в системе теплоснабжения на транспорт и распределение тепловой энергии [9]. Составляющими данных затрат являются суммарное годовое потребление всего объема природного газа и электроэнергии. Целевая функция суммарных затрат, в данном случае, в тепловой сети принимает вид:

$$z_{\text{уд}} = \frac{1}{9,8 \ln c (t_{\text{нод}} - t_{\text{обп}})} \sum_i^n \frac{\alpha_{\text{ч}} A_{\text{тн}} G_i^2 (l_i + l_{\text{экв}})}{\rho_{\text{ч}} d_i^{5,25}} + \frac{3600 q_{\text{дт}} l_i \beta_i}{G_i} \frac{\rho}{\rho} \quad (1)$$

где $\eta_{\text{сн}}$ – КПД сетевых насосов; G_i – расход теплоносителя на участке, м³/ч; $A_{\text{тн}}$ – коэффициент, зависящий от шероховатости участка трубопровода и плотности теплоносителя, м^{3,25}/кг; l_i – длина участка трубопровода, м; $l_{\text{экв}}$ – эквивалентная длина участка, м; d_i – диаметр участка, м; $q_{\text{дт}}$ – плотность теплового потока через тепловую изоляцию, Вт/м; β_i – коэффициент, учитывающий тепловые потери запорной арматурой; n – число участков тепловой сети; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; c – удельная теплоемкость теплоносителя, ккал/(кг·К); $t_{\text{нод}}$, $t_{\text{обп}}$ – расчетные температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах соответственно, °С; $k_{\text{ч}} = T_{\text{э}}/T_{\text{т}}$ – коэффициент соотношения тарифов тепловой и электроэнергии.

Коэффициент $k_{\text{ч}}$ помимо количественной составляющей удельных затрат в тепловой сети добавляет качественную, тем самым, оценивая разницу в тарифах на различные виды ресурсов.

Выражение (1) определяет долю затрат от переносимой и распределяемой энергии в тепловой сети, или удельные затраты на единицу распределяемой тепловой энергии.

Энергетические затраты несут определяющую долю в эксплуатационных расходах. В свою очередь, большую роль и существенное значение на соотношение эксплуатационных расходов источниками теплоты оказывают установленные цены на энергоресурсы. Как говорилось выше, основными энергоресурсами на источниках теплоты для выработки тепловой энергии являются природный газ и электроэнергия. Так, например, расходы на природный газ и электроэнергию в структуре тарифа на тепловую энергию доходят до 55 % и 15 % соответственно [10-11].

Оптимизация параметров системы теплоснабжения должна учитывать значения тарифов на энергоресурсы и на основании этого определять резервы и издержки для их

экономии. Максимальная экономия энергоресурсов зависит не только от сэкономленного его количества, но и от влияния цен на эти энергоресурсы [10-11].

Энергетический (полный) КПД определяется из выражения:

$$\eta = Q_{\text{пол}}/Q_u = (Q_u - Q_{\text{потерь}})/Q_u = 1 - Z_{\text{уд}} \quad (2)$$

Условием оптимального и эффективного функционирования тепловой сети является его максимальный КПД. Это достигается при минимизации функции удельных (эксплуатационных) затрат, т.е. $Z_{\text{уд}} \rightarrow \min$.

Оптимальные значения диаметров и расходов участков получаются дифференцированием выражения (1) и равенства его нулю:

$$\begin{aligned} G_i &= G_{\text{iopt}}, \text{ при } \frac{\partial Z_{\text{уд}}}{\partial G_i} = 0 \\ d_i &= d_{\text{iopt}}, \text{ при } \frac{\partial Z_{\text{уд}}}{\partial d_i} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Решив данные уравнения, получим оптимальный диаметр участка тепловой сети:

$$G_{\text{iopt}} = \sqrt[3]{\frac{3600(ad+b)lbh_{\text{ст}}d^{5,25}}{2A_R k_u (l+l_{\text{эKB}})}} \quad (4)$$

и оптимальный расход:

$$d_{\text{iopt}} = \sqrt[6,25]{\frac{5,25A_R G^3 k_u (l+l_{\text{эKB}})}{3600h_{\text{ст}} l b a}}, \quad (5)$$

здесь a, b – коэффициенты интерполяции зависимости значения теплового потока через изоляционные конструкции трубопровода от диаметра трубопровода:

$$q = ad + b \quad (6)$$

Графические зависимости значений теплового потока через изоляционные конструкции трубопровода от диаметра трубопровода для различных значений температуры теплоносителя представлены на рис. 1.

Выражения (4)-(5) определяют оптимальные величины диаметров и расходов по участкам тепловой сети. Графические зависимости удельных затрат на участке тепловой сети от значений расхода теплоносителя и диаметра участка представлены на рис. 2-3 и табл. 1-2 соответственно.

После проведения расчетов значения проверяются на соответствие условиям потокораспределения и не превышения максимальных давлений в узлах тепловой сети.

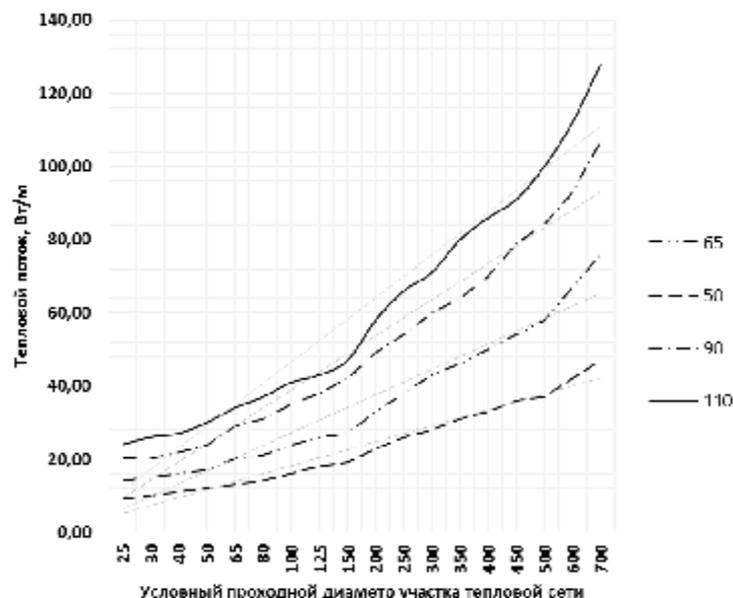


Рис. 1. Графические зависимости значений теплового потока через тепловую изоляцию трубопровода в зависимости от диаметра

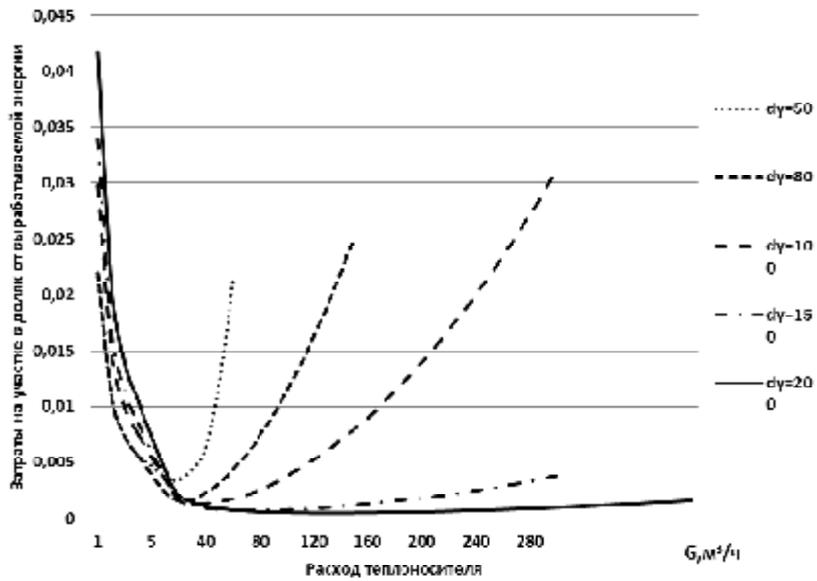


Рис. 2. Зависимость удельных затрат на участке тепловой сети от величины расхода теплоносителя

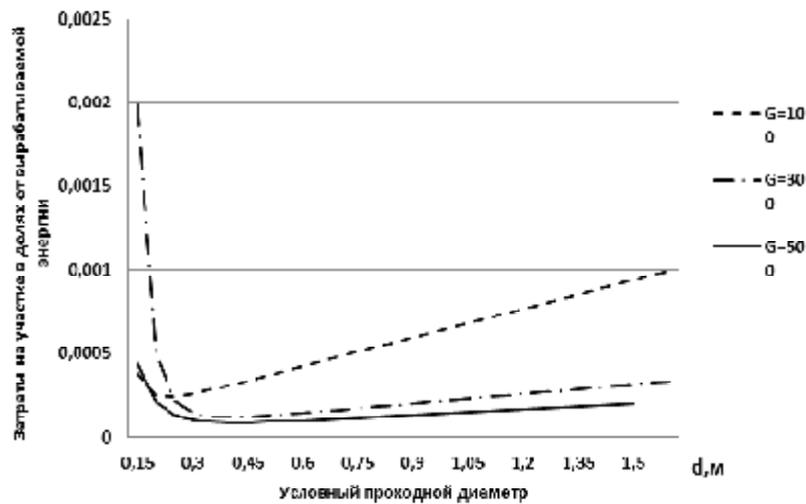


Рис. 3. Зависимость удельных затрат на участке тепловой сети от величины диаметра участка

Таблица 1

Результаты расчетов оптимальных расходов на действующих участках тепловой сети

Диаметр участка	Коэффициент, зависящий от экв. шероховатости	Длина участка	Тепловые потери для диаметра d	Оптимальный расход т/н	Фактический расход т/н
d , мм	$A_r, м^{0,25}$	l , м	q , Вт/м	$G_{опт}$, м³/ч	G , м³/ч
50	0,000025	89	31,86	10,2	6,5
80	0,000025	45	40,7	17,8	12,4
100	0,000025	30	44,53	25,4	22,3
150	0,000025	55	51,02	50,3	44,9
200	0,000025	200	61,8	102,9	95,8

Таблица 2

Результаты расчетов оптимальных диаметров действующих участков тепловой сети

Фактический расход т/н	Коэффициент, зависящий от экв. шероховатости	Длина участка	Оптимальный диаметр участка
$G, \text{ м}^3/\text{ч}$	$A_r, \text{ м}^{0,25}$	$l, \text{ м}$	$d_{\text{опт}}, \text{ м}$
110	0,000027	100	250
325	0,000024	100	400
488	0,000022	100	500

При оптимизации параметров системы теплоснабжения, при введении коэффициента соотношения тарифов, необходимо также учитывать некоторые условия перераспределения долей затрат той или иной энергии в зависимости от их текущих цен. Данное условие позволит достичь минимальных значений потерь и тем самым, уменьшить эксплуатационные затраты в тепловой сети. Главным эффектом от проведенной оптимизации является возможность снизить расчетный температурный график, что приведет к экономии природного газа на источнике и снижению себестоимости тепловой энергии. Помимо этого, снижение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе 130°C на 115°C или ниже, позволит уменьшить температурные напряжения трубопроводов тепловых сетей, обусловленные снижением термических расширений материала трубопроводов.

Разработка метода оптимизации температурных графиков систем теплоснабжения

В последние годы активно обсуждаются вопросы по оптимизации температурного графика регулирования нагрузки с целью оптимизирования потребления энергоресурсов на теплоисточнике в соответствии с потребностями потребителей [12-14]. В законодательстве, включая различные нормативные и регламентирующие документы, отсутствуют нормативы и методические указания по разработке температурного графика теплоснабжающей организации, а также обязанность органа местного самоуправления утверждать его или согласовывать. Как указано в МДК 4-03.2001 «Методики определения нормативных значений показателей функционирования водяных тепловых сетей систем коммунального теплоснабжения», утверждать температурный график должна теплоснабжающая организация. Согласно указанным пунктам данной методики теплоснабжающая организация утверждает режимы отпуска тепловой энергии источником теплоты, график регулирования тепловой нагрузки, а также график отпуска тепловой энергии в зависимости от температуры наружного воздуха.

Корректировка температурного графика фактически ведет к централизованному качественно-количественному методу регулирования отпуска и потребления теплоты, как одного из направлений повышения энергетической эффективности в соответствии с требованиями, прописанными в Федеральном законе № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Для разработки и расчета скорректированного температурного графика была взята методика расчета криволинейного графика, описанная в [15]. Применительно к климату г. Казани можно рассчитать коэффициенты, определяющие долю качественного и количественного регулирования в общем, исходя из значений трех температур:

T_1 – точка на графике, на которой отсутствует теплоотдача отопительного прибора, т.е. температурой теплоносителя равна температуре воздуха помещения;

T_2 – точка излома температурного графика, равная 70°C ;

T_3 – температура в подающем трубопроводе, равная расчетной при оптимальном расходе теплоносителя.

При оптимальных значениях расходов, выше фактических, соответственно максимальная температура в подающем трубопроводе по оптимальному температурному графику будет ниже фактической, что приведет к изменению температурного графика на пониженный. После чего определяется оптимальный коэффициент смешения теплопотребляющих установок и проводят перерасчет температур сетевой воды относительно температур наружного воздуха, при условии сохранения расчетной температуры теплоносителя во внутренних системах отопления ($t_{c.o.}^p$).

Расчет максимальной температуры проводится по классической формуле:

$$Q = \frac{G_{omn} (t_n^p - t_o^p)}{r_g}, \quad (7)$$

здесь $t_o^p = 65^\circ C$ – расчетная температура в обратном трубопроводе тепловой сети.

Тогда максимальная расчетная температура в подающем трубопроводе из (7):

$$t_n^p = \frac{r_g Q}{G_{omn}} + t_o^p. \quad (8)$$

Температура в подающем трубопроводе в зависимости от относительной тепловой мощности системы отопления записывается в виде квадратичного уравнения:

$$t_n = aq^2 + bq + c, \quad (9)$$

где q – относительная тепловая мощность системы отопления; a , b и c – коэффициенты, зависящие от максимальной расчетной температуры в подающем трубопроводе (рассчитываются с помощью табличных редакторов).

Температура теплоносителя в обратном трубопроводе рассчитывается в зависимости от t_n по формуле:

$$t_o = \frac{(t_o^p - 20)(t_n - 20)}{(t_n^p - 20)} + 20, \quad (10)$$

где t_0 – отклонение от прямолинейного графика.

Температура теплоносителя в системе отопления рассчитывается по формуле:

$$t_{c.o.} = \frac{(t_{c.o.}^p - 20)(t_n - 20)}{(t_n^p - 20)} + 20. \quad (11)$$

Данные температуры составляют оптимальный температурный график теплоисточника и потребителя.

Заключение

1. Разработан метод оптимизации параметров систем централизованного коммунального теплоснабжения с использованием разработанных математических зависимостей нахождения оптимальных параметров тепловой сети от теплоисточника до потребителя.

2. При определении оптимальных параметров системы теплоснабжения необходимо учитывать значения тарифов на энергоресурсы и с учетом этого определять резервы и издержки для их экономии. Соответственно максимальная экономия энергоресурсов будет зависеть не только от сэкономленного количества, но и от цены на энергоресурсы.

3. Разработана методика определения температурного графика регулирования нагрузки с целью оптимального потребления энергоресурсов на теплоисточнике. Существует возможность снизить расчетный температурный график, что приведет к экономии природного газа на источнике и снижению себестоимости тепловой энергии.

4. Данный подход в оптимизации систем теплоснабжения позволит выбрать наиболее энергоэффективный, рациональный и оптимальный вариант при строительстве новых и модернизации действующих тепловых сетей.

Список библиографических ссылок

1. Rafalskaya T. A. Investigation of failures in operation of heat networks of large heat supply systems // Thermal Engineering. Vol. 64. Iss. 4. P. 313–317.

2. Elmegaard B., Ommen T. S., Markussen M., Iversen J. Integration of space heating and hot water supply in low temperature district heating // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 124. P. 255–264.
3. Korotkova T. I., Popova V. I. Multicriteria hierarchical iterative interactive algorithm for organizing operational modes of large heat supply systems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 891. Iss. 1. article id. 012164.
4. Bolonina A. Analysis of the Impact of Decreasing District Heating Supply Temperature on Combined Heat and Power Plant Operation // *Environmental and Climate Technologies*. 2014. Vol. 14. Iss. 1. P. 41–46.
5. Bożena Babiarz. Reliability of Heat Supply Subsystem // *Directory of Open Access Journals*. 2015. Vol. 35. Iss. 1. P. 15–22.
6. Möller B., Nielsen S. High resolution heat atlases for demand and supply mapping // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2014. Vol. 01. P. 41–58.
7. Harrestrup M., Svendsen S. Planning of the district heating system in copenhagen from an economic perspective comparing energy-savings versus fossil-free supply // Paper presented at 13th International Symposium on District Heating and Cooling, September 3–4, 2012, Copenhagen, Denmark.
8. Меренков А. П., Хасилев В. Я., Теория гидравлических цепей. М. : Наука, 1985. 280 с.
9. Авсюкевич А. Д. Энергоэффективность и энергосбережение в системах теплоснабжения // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2013. № 2. С. 40–54.
10. Соломин И. Н., Даминов А. З., Караева Ю. В., Садыков Р. А. Значение коэффициента соотношения тарифов тепловой и электроэнергии в оптимизации параметров системы теплоснабжения // *Известия КГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 186–191.
11. Соломин И. Н., Даминов А. З. Влияние механизма тарифообразования на энергосберегающие мероприятия и оптимизацию системы теплоснабжения // *Труды Академэнерго*. 2013. № 4. С. 51–60.
12. Байбаков С. А., Филатов К. В. Оптимизация температурного графика тепловых сетей // *Энергетик*. 2012. № 11. С. 26–30.
13. Баймачев Е. Э., Манзарханова Л. М., Туфанова М. В., Левицкий А. И. Оптимизация температурного графика централизованного теплоснабжения по критерию минимума затрат эксергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 6 (101). С. 68–72.
14. Ротов П. В. О зонировании температурного графика центрального регулирования нагрузки теплофикационных систем // *Промышленная энергетика*. 2013. № 6. С. 21–25.
15. Сапрыкин И. М. О режимах регулирования отпуска теплоты // *Новости теплоснабжения*. 2010. № 6 (118). С. 40–48.

Solomin Iia Nikolaevich

chief project engineer

E-mail: solil1@yande.ru**ZAO «NPP «Compressor»**

The organization address: 420054, Russia, Kazan, Aktayskaya st., 21

Daminov Ayrat Zaudatovich

candidate of technical sciences, head of laboratory

E-mail: daminov@list.ru**Federal Research Center «Kazan Scientific Center of the RAS»**

The organization address: 420111, Russia, Kazan, Lobachevsky st., 2/31

Sadykov Renat Ahatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: sadykov_r_a@mail.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Optimization of operation modes and parameters of centralized district heating systems

Abstract

Problem statement. The work is aimed at the development of optimization solutions for increasing the energy efficiency of heat networks of closed district heating systems.

Results. The method of calculation and design of pipeline heat supply systems is developed, where the main part is the developed method for determining the optimal parameters of the heat supply system from the source to the consumer and the methodology for determining the temperature schedule of load regulation with the aim of optimizing energy consumption on the heat source.

Conclusions. The significance of the results obtained for heat supply systems is that it is possible to achieve minimum losses and operating costs in a heat network. The effect of optimization is the ability to reduce the calculated temperature schedule, which will result in saving natural gas at the source and reducing the cost of thermal energy. These methods will allow to choose the most energy efficient, rational and optimal design solutions when building new and modernizing existing district heating systems.

Keywords: heat supply system, optimization, method, mathematical model.

References

1. Rafalskaya T. A. Investigation of failures in operation of heat networks of large heat supply systems // *Thermal Engineering*. Vol. 64. Iss. 4. P. 313–317.
2. Elmegaard B., Ommen T. S., Markussen M., Iversen J. Integration of space heating and hot water supply in low temperature district heating // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 124, P. 255–264.
3. Korotkova T. I., Popova V. I. Multicriteria hierarchical iterative interactive algorithm for organizing operational modes of large heat supply systems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 891. Iss. 1. article id. 012164.
4. Bolonina A. Analysis of the Impact of Decreasing District Heating Supply Temperature on Combined Heat and Power Plant Operation // *Environmental and Climate Technologies*. 2014. Vol. 14. Iss. 1. P. 41–46.
5. Bożena Babiarz. Reliability of Heat Supply Subsystem // *Directory of Open Access Journals*. 2015. Vol. 35. Iss. 1. P. 15–22.
6. Möller B., Nielsen S. High resolution heat atlases for demand and supply mapping // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2014. Vol. 01. P. 41–58.
7. Harrestrup M., Svendsen S. Planning of the district heating system in copenhagen from an economic perspective comparing energy-savings versus fossil-free supply// Paper presented at 13th International Symposium on District Heating and Cooling, September 3-4, 2012, Copenhagen, Denmark.
8. Merenkov A. P., Hasilev V. Ya. Theory of hydraulic circuits. M. : Nauka, 1985. 280 p.
9. Avsyukevich A. D. Energy efficiency and energy savings in heating // *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2013. № 2. P. 40–54.
10. Solomin I. N., Daminov A. Z., Karaeva J. V., Sadykov R. A. The coefficient of correlation of heat and electricity tariffs in optimizing the parameters of the heat supply system // *Izvestiya KGASU*. 2013. № 4 (26). P. 186–191.
11. Solomin I. N., Daminov A. Z. Influence of the mechanism of tariff formation on energy-saving measures and optimization of the heat supply system // *Trudy Academenergo*. 2013. № 4. P. 51–60.
12. Baibakov S. A., Filatov K. V. Optimization of the temperature graph of heat networks // *Energetik*. 2012. № 11. P. 26–30.
13. Baimachev E. E., Manzarkhanova L. M., Tufanova M. V., Levitsky A. I. Optimization of the temperature graph of centralized heat supply based on the criterion of the minimum cost of exergy // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. № 6 (101). P. 68–72.
14. Rotov P. V. On the zoning of the temperature graph of central regulation of the load of heating systems // *Promyshlennaya energetika*. 2013. № 6. P. 21–25.
15. Saprykin I. M. About regimes of heat release regulation // *Novosti teplosnabgeniya*. 2010. № 6 (118). P. 40–48.