

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ Г. ЧЕЛЯБИНСКА ПУТЁМ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОГО НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА*

Г.М. Цейзер, О.С. Пташкина-Гирина, И.М. Кирпичникова

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)
д. 76, пр. Ленина, Челябинск, 454080, Россия
тел./факс: +7(351)267-90-51; e-mail: info@susu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.01-03.026-036

Заключение совета рецензентов: 28.06.17 Заключение совета экспертов: 12.09.17 Принято к публикации: 21.11.17

Рассмотрена возможность совершенствования системы теплоснабжения г. Челябинска путём внедрения теплонасосной технологии для утилизации сбросного низкопотенциального тепла. Проанализированы проблемы системы теплоснабжения в Российской Федерации. Большинство потребителей в крупных городах средней полосы России снабжаются тепловой энергией за счёт эксплуатации централизованной системы теплоснабжения. Такой подход является во многом устаревшим и неприменим к современной энергетической системе. Повысить эффективность централизованного теплоснабжения предлагается посредством тепловых насосов. Описан пример проведения оценки эффективности применения данного метода, а именно произведены расчёты, конечным результатом которых стала оценка эффективности утилизации сбросного низкопотенциального тепла в системе теплоснабжения г. Челябинска. Для этого предварительно были проанализированы источники информации о способах утилизации сбросной тепловой энергии, принципах работы тепловых насосов, классификации городских источников сбросного тепла. Первым этапом исследования стала разработка методики расчёта, позволяющей произвести данную оценку при варьируемых начальных параметрах объектов системы теплоснабжения. Это позволило оценить эффективность применения тепловых насосов для каждой категории городских источников сбросной тепловой энергии: энергетической (ТЭЦ, котельные, тепловые сети) и неэнергетической (жилые, общественные и производственные объекты). Второй этап заключался в применении полученной методики в условиях г. Челябинска. В качестве исходных были выбраны данные, характеризующие климатические особенности, энергетические параметры источников централизованного теплоснабжения, а также данные по населению, экономике и промышленным объектам г. Челябинска. Результатом проведённого исследования стало численное значение эффективности утилизации сбросного тепла в г. Челябинске.

Ключевые слова: централизованная система теплоснабжения (ТЭЦ); утилизация; сбросное низкопотенциальное тепло; тепловые насосы; эффективность.

INCREASE IN CHELYABINSK HEATING SYSTEM EFFICIENCY BY UTILIZATION OF LOW-GRADE WASTE HEAT

G.M. Tceyzer, O.S. Ptashkina-Girina, I.M. Kirpichnikova

South Ural State University (NIU), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia
tel./fax: +7 (351) 267 90 51, e-mail: info@susu.ru
doi: 10.15518/isjaee.2018.01-03.026-036

Referred 28 June 2017 Received in revised form 12 September 2017 Accepted 21 November 2017

We consider the possibility of improving the heat supply system in Chelyabinsk through the introduction of heat pump technology for the disposal of low-grade waste heat. The paper analyzes the problems of the heat supply system in Russia. The majority of consumers in large cities of the central Russia are supplied with heat energy through the

* Цейзер Г.М., Пташкина-Гирина О.С., Кирпичникова И.М. Повышение эффективности системы теплоснабжения г. Челябинска путём утилизации сбросного низкопотенциального тепла // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(01-03):26-36.

centralized heat supply system. This approach is largely outdated and inapplicable to the modern energy system. We propose the method for increasing the efficiency of centralized heating using heat pumps. This paper makes the evaluation of the effectiveness of the use of this method, namely performs a calculation study, the final result of which is estimation of efficiency of low-grade waste heat utilization in the Chelyabinsk heat supply system. For this purpose, we have previously analyzed the sources of information on the ways of utilization of waste thermal energy, the principles of the heat pumps operation, and the classification of urban sources of waste heat. The first stage of this study is the development of a calculation technique that makes it possible to estimate at varying initial parameters of the heat supply system objects. The developed technique allows estimating the efficiency of using heat pumps for each category of municipal sources of waste heat energy: energy (CHP, boilers, heating networks) and non-energy (residential, public and production facilities) ones. The second stage is the application of this technique to Chelyabinsk. As a starting point for this stage, we take the data which characterize the climatic features, energy parameters of the sources of centralized heating supply, as well as data on the population, economy and industrial facilities in Chelyabinsk. The result of the study is the numerical value of the efficiency of waste heat utilization in Chelyabinsk.

Keywords: centralized heat supply system; utilization; low-grade waste heat; heat pumps; efficiency.



Ирина Михайловна
Кирпичникова
Irina Kirpichnikova

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского гос. университета.

Область научных интересов: ветроэнергетика; солнечная энергетика; распределенная энергетика; возобновляемые источники энергии; гибридные энергокомплексы.

Публикаций: более 150.
h-index: 7

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Professor at Department of Electric Stations, Grids and Systems, South Ural State University.

Research interests: wind power; solar power; distributed power; renewable energy; combine energy complexes.

Publications: more than 150.



Ольга Степановна
Пташкина-Гурина
Olga Ptashkina-Girina

Сведения об авторе: канд. тех. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета.

Образование: Казахский государственный университет по специальности «Гидрология суши» (1976 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; утилизация сбросного низкопотенциального тепла.

Публикаций: более 50.
h-index: 5

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Assistant Professor at the Department of Power Stations, Electrical Grids and Power Supply Systems, South Ural State University.

Education: Kazakh State University in Land Hydrology, 1976.

Research interests: renewable energy sources; utilization of waste low potential heat.

Publications: more than 50.



Григорий Михайлович
Цейзер
Grigoriy Tseyzer

Сведения об авторе: аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета.

Образование: энергетический факультет Южно-Уральского государственного университета (2016 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; утилизация сбросного низкопотенциального тепла.

Публикаций: более 10.

Information about the author: Ph.D. Student of the Department of Power Stations, Electrical Grids and Power Supply Systems, South Ural State University.

Education: Power Engineering Faculty of South Ural State University.

Research interests: renewable energy sources; utilization of waste low potential heat.

Publications: more than 10.

Введение

Система теплоснабжения является одной из ключевых отраслей топливно-энергетического комплекса России. Эта система имеет большое значение не только в энергетическом, но в экономическом и социальном планах [1]. В первую очередь это связано с климатическими особенностями РФ: большая часть

территории расположена в умеренно и резкоконтинентальных климатических зонах, характерной особенностью которых являются продолжительные и холодные зимы, что, в свою очередь, требует покрытия значительных отопительных нужд на протяжении длительных периодов [2].

Обеспечение теплом потребителей, расположенных в крупных российских городах, в большей мере

происходит за счёт эксплуатации устаревшей, созданной в советские годы централизованной системы теплоснабжения. Это приводит к проблемам, связанным с источниками тепловой энергии (ТЭЦ и котельными) и системами доставки и распределения производимого ими тепла (тепловыми сетями) [3]. Одним из способов решения данных проблем может стать утилизация сбросной тепловой энергии. Такой подход позволит покрыть часть тепловых нужд за счёт энергии, которая обычно просто сбрасывается в окружающую среду [4]. Кроме того, утилизация тепла способствует снижению теплового загрязнения, которое в некоторых случаях является существенным фактором антропогенного воздействия на биосферу [5].

В статье производится оценка эффективности утилизации сбросной тепловой энергии в климатических

условиях средней полосы России на примере расчётного исследования, моделирующего внедрение теплонасосных установок в систему теплоснабжения г. Челябинска. Впервые рассматривается теплоэнергетическая система в целом с включением как источников тепловой энергии, так и системы транспортировки и распределения, а также потребителей тепла. Эта расчётная методика применима не только к системе теплоснабжения г. Челябинска, но и практически к любой другой как существующей, так и проектируемой централизованной системе теплоснабжения России. Более того, в перспективе данный подход позволит исследовать эффективность применения не только тепловых насосов, но и других источников, связанных с возобновляемой энергией, в том числе, объектов солнечной, ветровой и водородной энергетики.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
k_{drv}	Коэффициент приводной мощности теплового насоса
$k_{res.hs}^{max}$	Коэффициент, характеризующий значение тепловой мощности, необходимой для покрытия отопительных нужд в период самой холодной пятидневки к установленной мощности теплоэлектроцентрали
$k_{mf.mmf}$	Коэффициент, характеризующий отношение мощности, необходимой производственным объектам, к установленной тепловой мощности теплоэлектроцентрали
$k_{res.hws}$	Коэффициент, характеризующий отношение данной мощности к установленной тепловой мощности ТЭЦ
n_i	Продолжительность i -ого месяца, сут
" Q_{ens}	Мощность, необходимая для покрытия тепловых нужд потребителей при использовании теплонасосных установок на тепловых сетях
Q_n	Установленная тепловая мощность теплоэлектроцентрали, МВт
Q_i	Среднемесячная мощность i -ого месяца, МВт
$Q_{res.hs}$	Тепловая мощность, требуемая для покрытия нужд жилых объектов, МВт
' Q_{usf}^{max}	Полезная тепловая мощность, произведённая в ходе когенерации на теплоэлектроцентрали при совместной работе с теплонасосной установкой, МВт
Q'_{esm}	Суммарная мощность потребителей теплоэлектроцентрали, МВт
Q'_{drv}	Приводная мощность теплового насоса, МВт
Q'_{hpi}	Полезная мощность теплового насоса, МВт
$Q'_{mf.hws}$	Мощность, необходимая для покрытия производственных нужд промышленных объектов, МВт
Q'_{pbh}	Тепловая мощность пиковой котельной при обычной работе теплоэлектроцентрали, МВт
' Q'_{pbh}	Тепловая мощность пиковой котельной при совместной работе теплоэлектроцентрали с теплонасосной установкой, МВт
$Q'_{res.hws}$	Тепловая мощность, необходимая для покрытия нужд в горячем водоснабжении жилых объектов, МВт
Q'_{sel}	Мощность отбора теплонасосной установки, МВт
Q'_{wst}	Мощность сбросного тепла при обычной работе теплоэлектроцентрали, МВт
' Q'_{wst}	Мощность сбросного тепла при совместной работе теплоэлектроцентрали с теплонасосной установкой, МВт
" t_{dir}	Температура воды на подающих линиях при использовании теплонасосных установок на тепловых сетях, °К
t_{out}	Температура наружного воздуха, °К
t_{out}^{min}	Температура наружного воздуха в период самой холодной пятидневки, °К
' t_{rev}	Температура воды на обратных линиях, °К
" t_{hpi}^{rev}	Температура воды, охлажденной тепловым насосом, °К
W_{year}	Суммарная годовая энергия, ГДж
<i>Аббревиатуры</i>	
ГВС	Горячее водоснабжение
КПД	Коэффициент полезного действия
ТНУ	Теплонасосная установка
ТЭЦ	Теплоэлектроцентраль
УТЭЦ	Условная теплоэлектроцентраль



Теоретическое исследование

Для того чтобы произвести классификацию городских объектов в качестве источников сбросного тепла, следует учесть тот факт, что в их число входят объекты, которые не только производят (ТЭЦ, котельные), но и транспортируют тепло (тепловые сети) [6, 7] – они относятся к энергетическим объектам. К неэнергетическим относятся все те объекты, которые не участвуют в непосредственном производстве, транспортировке или распределении электроэнергии – жилые, общественные и производственные объекты [8, 9]. Общая классификация городских источников низкопотенциальной сбросной энергии представлена на рис. 1.

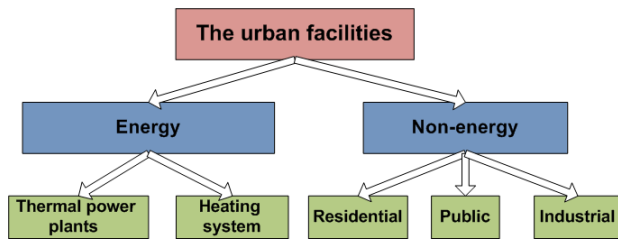


Рис. 1 – Виды городских источников сбросной тепловой энергии

Fig. 1 – Types of the city sources of waste heat

Проблема непосредственного использования низкопотенциальных источников энергии в системе теплоснабжения заключается в их низкой температуре (<40 °C) [10]. В целях преобразования низкопотенциального тепла в тепло с температурой, пригодной для покрытия потребительских нужд, применяются тепловые насосы, или теплонасосные установки (ТНУ) [11].

Прежде всего, источниками сбросного тепла являются теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), которые в ходе генерации электричества производят побочное тепло [13]. Некоторая часть такого тепла непригодна для непосредственного использования в системах отопления, поэтому её необходимо сбрасывать посредством градирен или брызгательных бассейнов. Однако с помощью тепловых насосов можно преобразовать такое тепло в полезное [13, 14].

Эффективность работы ТЭЦ повышается с понижением температуры обратной сетевой воды по сравнению с уровнем, заданным температурным графиком. Следовательно, повышение эффективности работы тепловых сетей с помощью тепловых насосов можно осуществить за счёт понижения температуры обратной сетевой воды [15].

Наконец, повышение эффективности теплоснабжения может происходить не только за счёт совершенствования ТЭЦ и сети, но и за счёт того, каким образом расходуется произведённое и доставленное тепло. Поэтому применение тепловых насосов целесообразно не только в плане повышения эффективности работы энергетических объектов, но и в целях повышения эффективности объектов, потребляющих тепло [16].

Необходимо отметить, что практически каждый объект неэнергетической категории является источником сбросного тепла. Как правило, такое тепло содержится в воде, сбрасываемой в канализационные стоки или непосредственно в водоём, а также в отработанном воздухе [17, 18].

Экспериментальная часть

В настоящем исследовании была разработана расчётная методика, которая позволяет оценить эффективность утилизации сбросного тепла при внедрении тепловых насосов в существующую систему централизованного теплоснабжения, состоящую из источника (ТЭЦ), транспортировщика (тепловые сети) и потребителей тепла (неэнергетические объекты). Здесь под термином «эффективность» понимается способность компонентов системы теплоснабжения производить, транспортировать и потреблять тепловую энергию при минимальной затрачиваемой энергии, при этом в качестве «затрачиваемой» принимается энергия топлива, сжигаемого на ТЭЦ.

В данном случае была выбрана условная теплоэлектроцентраль (УТЭЦ) с установленной электрической и тепловой мощностью 100 МВт и 150 МВт (129,1 Гкал/ч) соответственно. Сообразно со значениями мощности были выбраны потребители, снабжаемые условной теплоэлектроцентралью. При этом все потребители тепловой энергии были разделены на три группы объектов: жилые, общественные и промышленные [19, 20]. Каждая из этих групп нуждается как в покрытии отопительных нужд, так и в горячем водоснабжении. Кроме того, потребители промышленных объектов нуждаются в тепловой мощности для покрытия производственных нужд (рис. 2).

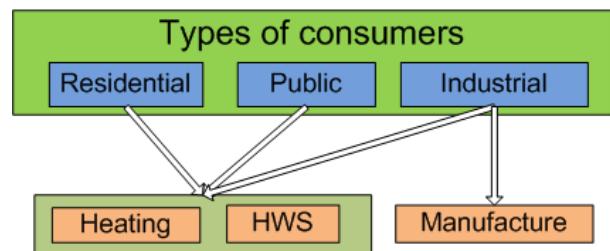


Рис. 2 – Классификация потребителей тепловой энергии и виды тепловых нужд

Fig. 2 – Classification of the thermal energy consumers and types of thermal needs

Эти данные легли в основу дальнейшего расчёта, позволяющего оценить годовую динамику изменения суммарной потребной тепловой мощности. Расчёт основан на нескольких допущениях. Среднемесячные значения тепловой мощности, необходимой для покрытия производственных нужд и горячего водоснабжения, неизменны в течение года, тогда как среднемесячные значения отопительных нужд варьируются согласно графику регулирования

150/70 [21, 22], то есть зависимы от температуры наружного воздуха. Значения температуры для каждого месяца принимаются равными среднемесячной температуре воздуха в г. Челябинске [23].

Эти допущения позволяют получить формулу, которая выражает зависимость среднемесячного значения тепловой мощности $Q_{res.hs}$, необходимой для покрытия отопительных нужд потребителей жилой группы, от среднемесячной температуры наружного воздуха t_{out} и установленной тепловой мощности ТЭЦ Q_h :

$$\begin{cases} t_{out} < t_{out}^{min} \Rightarrow Q_{res.hs} = Q_h \cdot k_{res.hs}^{max}; \\ t_{out} \in [8^\circ \text{C}; t_{out}^{min}] \Rightarrow Q_h \cdot k_{res.hs}^{max} \cdot \frac{t_{out} - 19,96}{t_{out}^{min} - 19,96}; \\ t_{out} > 8^\circ \text{C} \Rightarrow Q_{res.hs} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Поскольку тепловая мощность, необходимая для покрытия нужд в горячем водоснабжении, была принята постоянной, для нахождения её значения можно ввести безразмерный коэффициент, характеризующий отношение данной мощности к установленной тепловой мощности ТЭЦ. В частности, для потребителей жилой группы тепловой энергии при известном значении данного коэффициента $k_{res.hs}$ выражение для нахождения тепловой мощности принимает следующий вид:

$$Q'_{res.hs} = k_{res.hs} \cdot Q_h \quad (2)$$

Формулы для нахождения среднемесячных значений тепловых мощностей, требуемых для покрытия нужд в отоплении и горячем водоснабжении потребителей общественных и промышленных групп, выражаются аналогично формулам (1) и (2) с помощью соответствующих коэффициентов. Наконец, с помощью коэффициента $k_{mnf.mnf}$, который характеризует отношение мощности, необходимой для покрытия производственных нужд, к установленной тепловой мощности ТЭЦ, получаем выражение, которое позволяет получить значение искомой мощности:

$$Q'_{mnf.hs} = k_{mnf.mnf} \cdot Q_h \quad (3)$$

Далее, условная ТЭЦ снабжает теплом район, основную территорию которого занимают жилые массивы с сопутствующими им общественными сооружениями, а также ряд промышленных объектов.

Исходя из данных условий и допущений, была рассчитана динамика изменения потребной тепловой мощности для каждой группы потребителей УТЭЦ в течение года. Это позволило рассчитать годовую динамику суммарной потребной тепловой мощности (рис. 3).

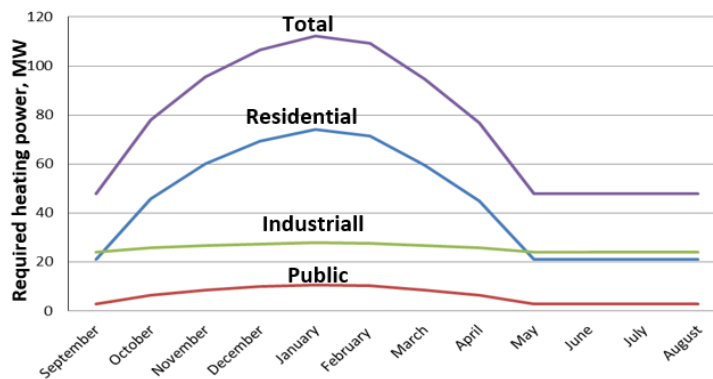


Рис. 3 – Годовой график необходимой мощности потребителей условной ТЭЦ
Fig. 3 – Annual schedule of required powers of consumers of the notional thermal power station

Полученная динамика послужила основой для расчётного исследования самой УТЭЦ, которое также базировалось на некоторых допущениях. Во-первых, среднемесячная электрическая мощность, генерируемая условной ТЭЦ, неизменна на протяжении всего года. Во-вторых, принимались во внимание только ориентировочные коэффициенты, оценивающие первостепенные энергические параметры УТЭЦ без учёта ряда физических и технических аспектов ТЭЦ. Кроме того, предполагалось упрощенное описание работы абсорбционного ТНУ [24–26] – ТНУ осуществляет забор тепла от сбросных вод ТЭЦ, а тепловой энергией привода его снабжает пиковая котельная (затраты электрической энергии на работу ТНУ были приняты несущественными). При этом коэффициент преобра-

зования теплового насоса принимается постоянным и независимым от режима работы ТНУ. Наконец, повышение эффективности работы теплоэлектроцентрали достигается за счёт того, что тепловой насос способен покрыть часть энергии, которую вырабатывают пиковые котельные в отопительный период [19].

Так, согласно принятым допущениям было получено выражение, позволяющее оценить среднемесячные значения мощностных составляющих ТНУ (Q'_{hpi} , Q'_{wst} , Q'_{pbh}), сбросной когенеративной мощности Q'_{wst} и мощности пиковой котельной Q'_{pbh} при совместной работе ТЭЦ и абсорбционного теплового насоса:

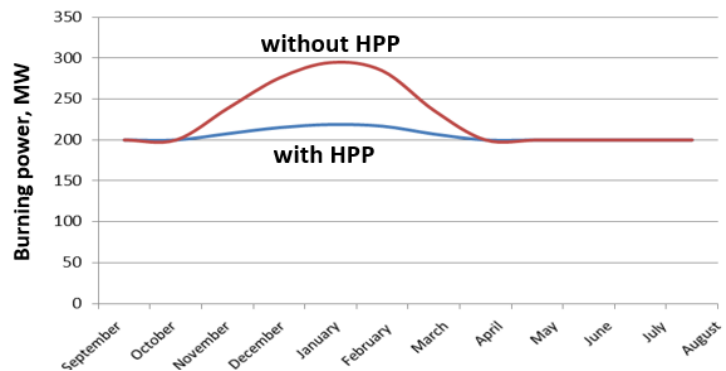


$$\left. \begin{aligned}
 & Q'_{csm} < Q'_{usf}{}^{\max} \Rightarrow \begin{cases} Q'_{hpp} = 0 \\ Q'_{wst} = 0 \\ Q'_{pbh} = 0 \\ Q'_{wst} = Q'_{wst} \\ Q'_{pbh} = 0 \end{cases} \\
 & Q'_{csm} > Q'_{usf}{}^{\max} + Q'_{wst} (1 + k_{drv}) \Rightarrow \begin{cases} Q'_{hpp} = Q'_{wst} (1 + k_{drv}) \\ Q'_{sel} = Q'_{wst} \\ Q'_{drv} = \frac{k_{drv} Q'_{hpp}}{1 + k_{drv}} \\ Q'_{wst} = 0 \\ Q'_{pbh} = Q'_{csm} - Q'_{usf}{}^{\max} - Q'_{hpp} + Q'_{drv} \end{cases} \\
 & Q'_{usf}{}^{\max} \leq Q'_{csm} \leq Q'_{usf}{}^{\max} + Q'_{wst} (1 + k_{drv}) \Rightarrow \begin{cases} Q'_{hpp} = Q'_{csm} - Q'_{usf}{}^{\max} \\ Q'_{sel} = \frac{Q'_{hpp}}{1 + k_{drv}} \\ Q'_{drv} = \frac{k_{drv} Q'_{hpp}}{1 + k_{drv}} \\ Q'_{wst} = Q'_{wst} - Q'_{sel} \\ Q'_{pbh} = Q'_{drv} \end{cases}
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Значения этих составляющих были также вычислены исходя из принятых допущений и помощью соответствующих коэффициентов [19]. Данное выражение позволило получить значения мощностных состав-

ляющих совместной работы условной ТЭЦ с теплонасосной установкой, благодаря которым была рассчитана сравнительная динамика, демонстрирующая работу УТЭЦ без и с использованием на ней ТНУ (рис. 4).

Рис. 4 – Годовой график изменения мощности сжигания топлива на УТЭЦ при различных режимах работы
Fig. 4 – Annual schedule changes of fuel combustion capacity in the notional thermal power plants at different operation modes



Поскольку в данном исследовании рассчитываются среднемесячные значения мощности (Q , МВт), значения соответствующих им суммарных годовых энергий (W_{year} , ТДж) вычисляются по следующей формуле:

$$W_{year} = \sum_{i=1}^{12} Q_i \cdot n_i \cdot 86,4. \quad (5)$$

В соответствии с формулой (5) были получены данные согласно которым при неизменном количе-

стве суммарной годовой потребной энергии использование ТНУ в целях утилизации сбросного тепла на УТЭЦ позволяет сократить годовую энергию сжигания топлива с 7 164,5 ТДж до 6 479 ТДж, что экономит 23,4 тысяч т.у.т, или 9,6 % [19].

Следующим этапом стала оценка эффективности применения ТНУ на тепловых сетях, которые распределяют тепло, производимое УТЭЦ, к потребителям. На данном этапе было принято, что повышение эффективности работы тепловой сети с помощью ТНУ достигается путём снижения температуры воды



на обратных линиях [25]. Так же как и в предыдущих расчётах, здесь применяется упрощенное описание абсорбционного теплового насоса [27], но забор тепла осуществляется не от сбросных вод, а от тепловых потерь сети, а энергия привода производится путём использования ТЭНов, которые, в свою очередь, получают электричество от УТЭЦ. С учётом этих допущений были получены среднемесячные значения температуры на обратных линиях теплосети УТЭЦ при использовании на ней ТНУ [18].

Далее принимается, что энергией, отобранной ТНУ путём утилизации потерь тепла, можно покрыть некоторую часть тепловых нужд потребителей. Это приводит к потере мощности, которую должна сгенерировать УТЭЦ для покрытия нужд потребителей [19]. Приведённые допущения позволяют получить

формулу, выражающую среднемесячное значение тепловой мощности УТЭЦ при использовании теплонасосной установки на тепловых сетях:

$$Q_{cns} = Q_{hpp} \frac{t_{dir} - t_{rev}}{t_{dir} - t_{rev}^{hpi}} \quad (6)$$

Так же как и в случае расчётного исследования теплоэлектростанции, значения указанных величин были получены в ходе расчётов, основанных на принятых допущениях. Благодаря проведённому исследованию, были получены значения требуемой тепловой мощности УТЭЦ для каждого месяца с и без применения теплового насоса, на основании чего был составлен график (рис 5.).

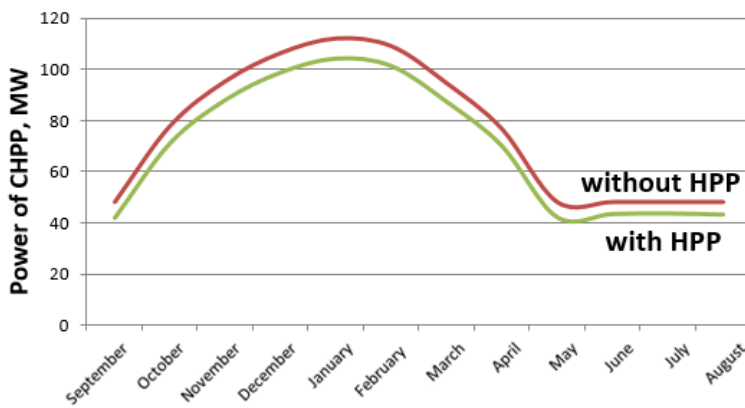


Рис. 5 – Годовой график изменения тепловой мощности, производимой УТЭЦ при различных режимах работы тепловой сети
Fig. 5 – The annual schedule changes of thermal power produced by the notional thermal power plant different operation modes of heating main

Таким образом, утилизация потерь тепла на тепловых сетях с помощью ТНУ позволяет сократить суммарную годовую тепловую энергию УТЭЦ с 2 330,6 ТДж до 2 192,3 ТДж, что эквивалентно 6,9 тысячам т.у.т, или 8,5 % [19].

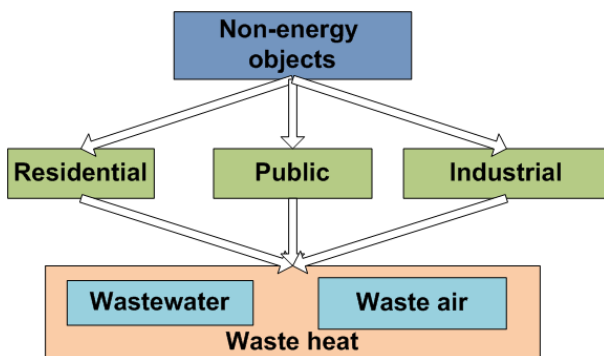


Рис. 6 – Классификация неэнергетических источников сбросного тепла
Fig. 6 – Classification of non-energy sources of waste heat

Следующим пунктом стала оценка энергии, которую можно извлечь путём утилизации тепла, сбрасываемого неэнергетическими объектами (потребителями УТЭЦ).

Жилые, общественные и производственные городские объекты могут быть не только потребителями тепловой энергии, производимой теплоэлектростанцией, но и сами выступать в роли источников низкопотенциальной тепловой энергии (рис. 6).

На данном этапе были также приняты некоторые допущения. Количество сточных вод и отработанного воздуха, сбрасываемого жилыми объектами, было принято пропорциональным количеству жителей, проживающих на территории, отапливаемой УТЭЦ, а сбросная мощность общественных и промышленных объектов – пропорциональной потребной мощности тех же объектов [19]. Принятые допущения позволили вычислить среднемесячные значения тепловой мощности, которые можно получить с помощью ТНУ путём утилизации сбросного тепла неэнергетических объектов, отапливаемых УТЭЦ. Следует отметить, что, поскольку принятые допущения не учитывают сезонных изменений объема сточных вод и отработанного воздуха, суммарная среднемесячная мощность всех неэнергетических объектов получилась неизменной на протяжении всего года. Эту мощность можно пустить на покрытие тепловых нужд этих же объектов (рис. 7).

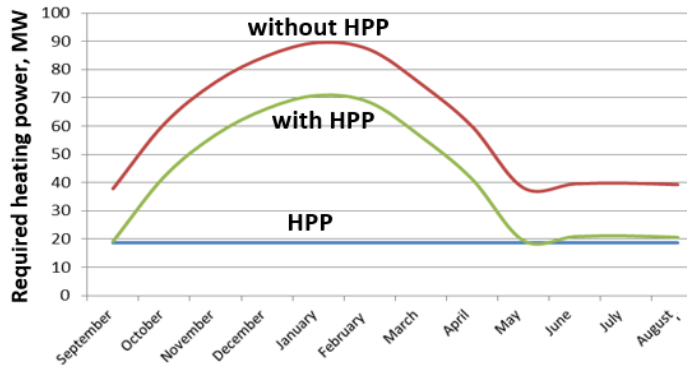


Рис. 7 – Годовой график изменения потребной мощности потребителей УТЭЦ без/с утилизацией сбросного тепла с помощью ТНУ
Fig. 7 – Annual schedule of changes of required consumers power of notional power plant with / without utilization of waste heat using heat pumps

Таким образом, утилизация сбросного тепла неэнергетических городских объектов, снабжаемых теплом УТЭЦ, позволяет сократить годовую потребную тепловую энергию этих же объектов с 1 906,7 ТДж до 1 318 ТДж, что эквивалентно 20,1 тысячам т.у.т, или 30,9 % [19].

Завершающим этапом данного исследования стал возвратный расчёт, суть которого заключается в повторении проведённых ранее расчётов УТЭЦ и её теплосети при изменении некоторых начальных параметров (рис. 7).

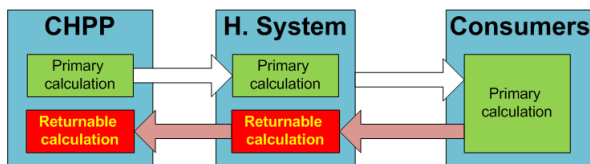


Рис. 7 – Схема возвратного расчёта
Fig. 7 – Scheme of return calculation

Проведённые расчёты эффективности использования тепловых насосов в целях утилизации сбросной теплоты городских объектов по большей части не учитывают прямой взаимосвязи между собой. Это не позволяет в полной мере оценить эффективность утилизации тепла городских объектов, поскольку данная оценка должна учитывать отопительную схему в целом, включая все три уровня: источник (ТЭЦ), транспортировка (тепловые сети) и потребители (неэнергетические объекты). Возвратный расчёт призван устранить этот недостаток. Как уже отмечалось, проведённые расчёты не учитывали изменения начальных параметров расчёта теплосети и ТЭЦ, поэтому возвратный расчёт будет производиться только для данных источников низкопотенциальной тепловой энергии (см. рис. 6).

По сути, возвратный расчёт ТЭЦ позволит определить, какую эффективность даст применение ТНУ в системе централизованного теплоснабжения. В данных расчётах первоисточником тепловой энергии в любом случае является ТЭЦ, то есть тепловой насос не может полностью заменить ТЭЦ, а только повышает эффективность её работы и работы системы теплоснабжения в целом. При этом вся экономия при повышении эффективности теплоснабжения в

конечном итоге сводится к понижению количества сжигаемого топлива на ТЭЦ.

Итак, возвратный расчёт УТЭЦ привёл к следующим результатам: годовое сжигание топлива при использовании ТНУ снижается с 7 164,5 ТДж до 5 922,9 ТДж, что эквивалентно 42,4 тыс. т.у.т, или 17,3 % [19].

Оценка эффективности предлагаемого метода

Проведённые теоретические исследования позволили получить расчётную методику, позволяющую оценить эффективность использования низкопотенциальной сбросной энергии в системе теплоснабжения при варьируемых начальных параметрах ТЭЦ, сети и потребителей. Другими словами, данная методика подходит для оценки эффективности внедрения тепловых насосов в любую централизованную систему теплоснабжения, в том числе, систему теплоснабжения г. Челябинска.

Так же как и в случае с УТЭЦ, начальными параметрами проведённых расчётов являются установленные электрические и тепловые мощности челябинских ТЭЦ. Каждая такая ТЭЦ снабжает тепловой энергией определённое число потребителей той или иной группы. Доля тепловой и энергетической мощности, которая уходит на покрытие тепловых нужд потребителей жилых, общественных и производственных объектов, оценивалась исходя из численности населения, наличия общественных сооружений и производственных предприятий на территории, находящейся в зоне покрытия определённой ТЭЦ [28, 29]. Такой подход позволил оценить годовую динамику изменения тепловой мощности, необходимой для покрытия тепловых нужд потребителей, получающих энергию от каждой из ТЭЦ.

Затем с учётом особенностей магистральных тепловых сетей г. Челябинска по той же отработанной методике были оценены тепловые потери при транспортировке энергии от челябинских ТЭЦ к их потребителям, а также эффект от утилизации этих потерь с помощью ТНУ [30].

Далее уже учтённые ранее особенности потребителей челябинских ТЭЦ позволили оценить, какое количество энергии можно извлечь при утилизации сбросного тела, источником которого являются неэнергетические объекты г. Челябинска [31].



Наконец, возвратный расчёт показал, насколько эффективна утилизация низкопотенциального сброс-

ного тепла в г. Челябинске. На рис. 8 представлен график, иллюстрирующий полученные результаты.

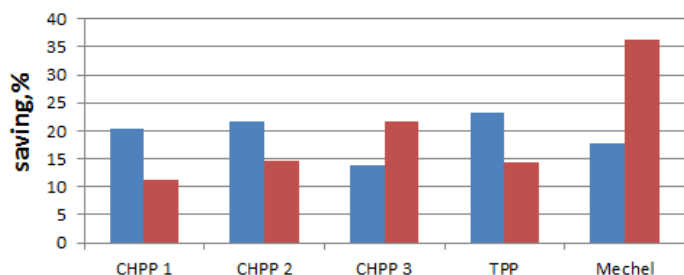


Рис. 8 – Итоги возвратного расчёта челябинских ТЭЦ
Fig. 8 – The results of the return calculation of thermal power stations of Chelyabinsk

Таким образом, проведённая расчетная оценка показала, что утилизация сбросного тепла в условиях г. Челябинска позволит снизить годовую энергию сжигания топлива на 2,2 млн. т.у.т (24,9 %). При этом тепловое загрязнение снизится на 1,5 млн. т.у.т. Такой эффект возможен при использовании тепловых насосов общей производимой тепловой мощностью 1 145 МВт [19].

Заключение

Результаты, полученные в ходе данной работы, говорят о целесообразности применения утилизации низкопотенциальной сбросной энергии с помощью тепловых насосов в целях повышения эффективности централизованного теплоснабжения в г. Челябинске и других городах России. Применение тепловых насосов помогает повысить эффективность теплоснабжения как на уровне производства и транспортировки тепловой энергии, так и на уровне потребителей, которые в данном случае относятся к неэнергетической категории.

Применение тепловых насосов на челябинских ТЭЦ позволяет сократить мощность пиковых котельных, что, следовательно, приводит к снижению мощности сжигаемого топлива. Использование тепловых насосов в тепловых сетях позволяет снизить температуру обратной воды, что приводит не только к сокращению потерь, но и к снижению тепловой нагрузки на ТЭЦ. Наконец, утилизация тепла сбросной воды и отработанного воздуха неэнергетических объектов г. Челябинска позволяет покрыть существенную часть энергии, необходимую для обеспечения тепловых нужд тех же объектов.

Однако необходимо отметить тот факт, что утилизация сбросной энергии в городах создаст более значимый эффект в случае комплексного подхода, направленного на улучшение системы теплоснабжения в целом. Так, повышение электрического КПД на ТЭЦ позволит применять тепловые насосы с более высокой мощностью, а совершенствование системы регулирования на тепловых сетях – получать большую пользу при применении тепловых насосов.

Поскольку применяемая в данном исследовании расчётная методика является максимально упрощённой и не учитывает многие аспекты работы как теплоэнергетических систем, так и теплонасосных уста-

новок, в ходе дальнейшей работы планируется создание более совершенной методики с применением компьютерного математического моделирования. Компьютерная модель позволит получить более корректные и приближенные к реальным условиям результаты в плане исследования эффективности утилизации сбросного тепла в централизованной системе энергоснабжения. Кроме того, такой подход является более гибким и может применяться для исследования интеграции в разрабатываемую схему объектов солнечной, ветровой и водородной энергетики.

Список литературы

- [1] Наумов, А.Л. Тенденции развития теплоснабжения в России [Электронный ресурс] / А.Л. Наумов // «АВОК». – 2001. – № 6. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=446. – (Дата обращения: 05.05.2016).
- [2] Булыгина, О.Н. Анализ изменчивости климата на территории России в последние десятилетия / О.Н. Булыгина [и др.] // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2000. – Вып. 167. – С. 315
- [3] Байтингер, Н.М. Современный взгляд на некоторые проблемы централизованного теплоснабжения [Электронный ресурс] / Н.М. Байтингер, В.В. Бурцев // СОК №10 | 2005. – Режим доступа: <http://www.c-ok.ru/articles/sovremennyy-vzglyad-na-nekotorye-problemy-centralizovannogo-teplosnabzheniy>. – (Дата обращения: 07.05.2016).
- [4] Хрилев, Л.С. Оптимизация систем теплофикации и централизованного теплоснабжения / Л.С. Хрилев, И.А. Смирнов. – М.: Энергия, 1978. – 264 с.
- [5] Стафиевская, В.В. Методы и средства энерго- и ресурсосбережения / В.В. Стафиевская, А.М. Велентеенко, В.А. Фролов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 430 с.
- [6] Цейзер, Г.М. Оценка эффективности применения теплонасосных установок в целях утилизации сбросного тепла в условиях г. Челябинска // Сб. мат. II Всерос. (с международным участием) молодёжной науч.-практ. конф. «Введение в энергетику», Кемерово, 2016.
- [7] Цейзер, Г.М. Оценка эффективности применения теплонасосных установок в целях утилизации сбросного тепла в условиях г. Челябинска // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всерос. на-



уч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием), Екатеринбург, УрФУ, 2016. – С. 703–705.

[8] Богданов, А.Б. Проблемы энергосбережения в России / А.Б. Богданов // Профессиональный журнал. – 2005. – Т. 06(19). – С. 52–56.

[9] Цейзер Г.М. Оценка эффективности применения теплонасосных установок в целях утилизации сбросного тепла в условиях г. Челябинска // Материалы докладов XII Межд. молодёжной науч. конф. «Тинчуринские чтения», Казань, 3017. – С. 253–255.

[10] Соколов, Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.

[11] Хайнрих, Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения / Г.Хайнрих, Х. Найорк, В. Нестлер. – М.: Стройиздат, 1985 – С. 351.

[12] Аникина И.Д. Применение тепловых насосов для повышения энергоэффективности паросиловых ТЭС/ И.Д. Аникина, В.В. Сергеев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – Т. 3(178). – С. – 56–61.

[13] Молодкина, М.А. Применение теплового насоса в схеме теплофикационной установки ТЭЦ на базе парогазовой установки с котлом утилизатором на примере Северо-Западной ТЭЦ / М.А. Молодкина, В.М. Боровков // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: материалы Всерос. межвуз. науч. 16 конф. студентов и аспирантов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 111–112.

[14] Девянин, Д.Н. Разработка и испытание на ТЭЦ- 28 ОАО «Мосэнерго» лабораторного стенда по апробации схем использования тепловых насосных установок в энергетике [Электрон. ресурс] / Д.Н. Девянин, Ю.Н. Соколов // ЭСКО Электронный журнал энергосервисной компании «Экологический системы». – 2007. – № 10. – С. 79–85.

[15] Канина, Л.П. проблемы и пути решения комплексной защиты оборудования систем теплоснабжения в аварийных переходных гидравлических режимах в тепловых сетях / Л.П. Канина// Материалы конф. «Тепловые сети. Современные решения» 17 по 19 мая 2005 г. НП «Российское теплоснабжение». – С. 84–90.

[16] Васильев, Г.П. Эффективность и перспектива использования тепловых насосов в городском хозяйстве Москвы / Г.П. Васильев // Энергосбережение. – 2007. – № 8. – С. 63–65

[17] Шилкин, Н. В. Утилизация тепла канализационных стоков / Н. В. Шилкин // Энергосбережение в системах промышленного энергоснабжения. – «Опыт проектов утилизации сбросного тепла в промышленности. Выпуск 2». – С. – 9–14.

[18] Слесаренко, В.В. Перспективы применения тепловых насосов при утилизации теплоты городских стоков / В.В. Слесаренко, В.В. Князев, В.В. Вагнер // «Энергосбережение и водоподготовка». – 2012. – № 3 (77). – С. 28–34.

[19] Цейзер, Г.М. Использование низкопотенциальной сбросной тепловой энергии для целей теплоснабжения в условиях г. Челябинска: ВКР, 2016.

[20] Фролов, В.П. Эффективность использования тепловых насосов в централизованных системах теплоснабжения / В.П. Фролов [и др.] // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 7. – С.50–55

[21] Дегтяренко, А.В. Теплоснабжение: учеб. пособие / А.В. Дегтяренко. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. 185 с

[22] Маслов, Е.А. Автоматическое регулирование тепло- и парогенерирующих установок / Е.А. Маслов. – Томск, 2009. 74 с.

[23] Климат Челябинской области. – Режим доступа: <http://chel.pogoda.ru/pages/490.php> – (05.12.2006).

[24] Филатова, О.С. Сорбционные тепловые насосы на твердых сорбентах для выработки тепла и холода/ О.С. Филатова [и др.] // Тепло- и массоперенос. 2007: сб. науч. тр. Минск : ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2007. – С. 275–281.

[25] Галимова, Л.В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы / Л.В. Галимова. – Астрахань: АГТУ, 1997. – С. 226

[26] Хромченков, В.Г. Определение потерь тепла в тепловых сетях / В.Г. Хромченков, Г.В. Иванов, Е.В. Хромченкова // Журнал «Новости теплоснабжения». – 2006. – № 6 (70). – С. 32–36.

[27] Талцис, Н. Опыт утилизации низкопотенциального тепла с использованием абсорбционного теплового насоса / Н. Талцис // Журнал «Новости теплоснабжения». – 2011. – № 5 (129). – С. 112–117.

[28] Челябинск – промышленность города, предприятия и заводы Челябинска. – Режим доступа: <http://www.metaprom.ru/regions/chelyabinsk.html> – (Дата обращения: 01.02.2017).

[29] Экономика Челябинской области. – Режим доступа: http://chelindustry.ru/left_prom2.php?tr=1 – (Дата обращения: 05.02.2017).

[30] Проект схемы теплоснабжения Челябинского городского округа до 2029 года. – Режим доступа: https://cheladmin.ru/sites/default/files/pz_ot_26.12.13._s_n_ovum_titulom_0.pdf – (Дата обращения: 01.02.2017).

[31] Административное деление. – Режим доступа: <http://cheladmin.ru/ru/gorod-chelyabinsk/administrativnoedelenie>. – (Дата обращения: 17.02.2017).

References

[1] Naumov A.L. Trends in the development of heat supply in Russia (Tendentsii razvitiya teplosnabzheniya v Rossii) [E-resource] “AVOK” #6 2001. Available on: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=446 (05.05.2016) (in Russ.).

[2] Bulygina O.N., Korshunova N.N., Kuznetsova V.N., Razuvaev V.N. Analiz izmenchivosti klimata na territorii Rossii v poslednie desyatiletija. *Trudy VNIIGMI-MTsD*, 2000;167:315 (in Russ.).

[3] Baytinger N.M., Burtsev V.V. *Sovremennyiy vzglyad na nekotorye problemy tsentralizovannogo*



teplosnabzheniya. SOK, 2005, No. 10. Available on: <http://www.c-o-k.ru/articles/sovremenny-vzglyad-na-nekotorye-problemy-centralizovannogo-teplosnabzheniya> (07.05.2016) (in Russ.).

[4] Hrilev L.S., Smirnov I.A. Optimizatsiya sistem teplofikatsii i tsentralizovannogo teplosnabzheniya. Moscow: Energiya, 1978 (in Russ.).

[5] Stafievskaya V.V., Velenteenko A.M, Frolov V.A. Metody i sredstva energo - i resursoberezheniya. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2008 (in Russ.).

[6] Tseyzer G.M. Otsenka effektivnosti primeneniya teplonasosnykh ustanovok v tselyakh utilizatsii sbrosnogo tepla v usloviyakh g. Chelyabinska. *Sbornik materialov II Vseros. (s mezhdunarodnyim uchastiem) molodyozhnoy nauch.-prakt. konf. «Vvedenie v energetiku»*, Kemerovo, 2016 (in Russ.).

[7] Tseyzer G.M. Otsenka effektivnosti primeneniya teplonasosnykh ustanovok v tselyakh utilizatsii sbrosnogo tepla v usloviyakh Chelyabinska. *Energo- i resursoberezhenie. Netraditsionnyye i vozobnovlyayemye istochniki energii: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchyonnykh s mezhdunarodnyim uchastim*, Ekaterinburg, UrFU, 2016, pp. 703–705 (in Russ.).

[8] Bogdanov, A.B. Problemy energosberezheniya v Rossii. *Professionalnyy zhurnal*, 2005;06(19):52–56 (in Russ.).

[9] Tseyzer G.M. Otsenka effektivnosti primeneniya teplonasosnykh ustanovok v tselyakh utilizatsii sbrosnogo tepla v usloviyakh g. Chelyabinska. *Materialy dokladov XII Mezhd. molodyozhnoy nauch. konf. «Tinchurinskie chteniya»*, Kazan, 2017, pp. 253–255 (in Russ.).

[10] Sokolov E.Ya., Brodyanskiy V.M. Energeticheskie osnovy transformatsii tepla i protsessov ohlazhdeniya. – Moscow: Energoizdat, 1981 (in Russ.).

[11] Haynrih G., Nayork H., Nestler V. Teplonasosnyye ustanovki dlya otopeniya i goryachego vodosnabzheniya. Moscow: Stroyizdat Publ., 1985 (in Russ.).

[12] Anikina I.D., Sergeev V.V. Primenenie teplovykh nasosov dlya povysheniya energoeffektivnosti parosilovykh TES. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*, 2013;3(178):56–61 (in Russ.).

[13] Molodkina M.A., Borovkov V.M. Primenenie teplovogo nasosa v sheme teplofikatsionnoy ustanovki TETs na baze parogazovoy ustanovki s kotlom utilizatorom na primere Severo-Zapadnoy TETs / M.A. Molodkina. *XXXVII Nedelya nauki SPbGPU: materialy Vseros. mezhvuz. nauch. 16 konf. studentov i aspirantov*. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2008, pp. 111–112 (in Russ.).

[14] Devyanin D.N., Sokolov Yu.N. Razrabotka i ispytanie na TETs- 28 OAO «Mosenergo» laboratornogo stenda po aprobatsii shem ispolzovaniya teplovykh nasosnykh ustanovok v energetike. *ESKO Elektronnyy zhurnal energoservisnoy kompanii «Ekologicheskyye sistemy»*, 2007;10:79–85 (in Russ.).

[15] Kanina L.P. problemy i puti resheniya kompleksnoy zaschity obrudovaniya sistem teplosnabzheniya v avariynnykh perehodnykh gidravlicheskiykh rezhimakh v teplovykh setyakh. *Materialy*

Konferentsii "Teplovyie seti. Sovremennyye resheniya" 17 po 19 maya 2005. NP "Rossiyskoe teplosnabzhenie", 2005, pp. 84–90 (in Russ.).

[16] Vasilev G.P. Effektivnost i perspektiva ispolzovaniya teplovykh nasosov v gorodskom hozyaystve Moskvy. *Energoberezhenie* 2007;8:63–65 (in Russ.).

[17] Shilkin N.V. Utilizatsiya tepla kanalizatsionnykh stokov. *Energoberezhenie v sistemah promyshlennogo energosnabzheniya* – "Opyit proektov utilizatsii sbrosnogo tepla v promyshlennosti. Vyipusk 2", pp. 9–14 (in Russ.).

[18] Slesarenko V.V., Knyazev V.V., Vagner V.V. Perspektivy primeneniya teplovykh nasosov pri utilizatsii teploty gorodskikh stokov. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2012;3(77):28–34 (in Russ.).

[19] Tseyzer G.M. Ispolzovanie nizkopotentsialnoy sbrosnoy teplovykh energii dlya tseyey teplosnabzheniya v usloviyakh Chelyabinska: VKR, Chelyabinsk, 2016 (in Russ.).

[20] Frolov V.P., Scherbakov S.N., Frolov M.V., Shelginskiy A.Ya. Effektivnost ispolzovaniya teplovykh nasosov v tsentralizovannykh sistemah teplosnabzheniya. *Novosti teplosnabzheniya*, 2004;7:50–55 (in Russ.).

[21] Degtyarenko A.V. *Teplosnabzhenie: ucheb. posobie*. Tomsk : Izd-vo Tom. gos. arhit.-stroit. un-ta, 2010 (in Russ.).

[22] Maslov E.A. *Avtomaticheskoe regulirovanie teplo- i parogeneriruyuschiykh ustanovok*. Tomsk, 2009 (in Russ.).

[23] *Klimat Chelyabinskoy oblasti*. Available on: <http://chelpogoda.ru/pages/490.php> (05.12.2006) (in Russ.).

[24] Filatova O.S., Tsitovich A.P., Kovalyova M.N., Tishkevich A.S. Sorbttsionnyye teplovyie nasosy na tverdyykh sorbentakh dlya vyirabotki tepla i holoda. *Teplo- i massoperenos*. 2007: sb. nauch. tr. Minsk : ITMO im. A.V. Lyikova NAN Belarusi, 2007, pp. 275–281 (in Russ.).

[25] Galimova L.V. *Absorbtsionnyye holodilnyye mashiny i teplovyie nasosy*. Astrahan: AGTU, 1997, p. 226 (in Russ.).

[26] Hromchenkov V.G., Ivanov G.V., Hromchenkova E.V. *Opredelenie poter tepla v teplovykh setyakh*. *Zhurnal «Novosti teplosnabzheniya»*, 2006;06(70):32–36 (in Russ.).

[27] Taltsis N. Opyit utilizatsii nizkopotentsialnogo tepla s ispolzovaniem absorbtsionnogo teplovogo nasosa. *Zhurnal «Novosti teplosnabzheniya»*, 2011;05(129):112–117 (in Russ.).

[28] Chelyabinsk - promyshlennost goroda, predpriyatiya i zavody Chelyabinska. Available on: <http://www.metaprom.ru/regions/chelyabinsk.html> (01.02.2017) (in Russ.).

[29] *Ekonomika Chelyabinskoy oblasti*. Available on: http://chelindustry.ru/left_prom2.php?rr=1 (05.02.2017) (in Russ.).

[30] *Proekt shemy teplosnabzheniya Chelyabinskogo gorodskogo okruga do 2029*. Available on: https://cheladmin.ru/sites/default/files/pz_ot_26.12.13._s_n_ovym_titulom_0.pdf (01.02.2017) (in Russ.).

[31] *Administrativnoe delenie*. Available on: <http://cheladmin.ru/ru/gorod-chelyabinsk/administrativnoe-delenie> (17.02.2017) (in Russ.).

Транслитерация по BSI

