

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Кандидаты техн. наук, доценты **ЧЕПУРНОЙ М. Н., РЕЗИДЕНТ Н. В.**

Винницкий национальный технический университет (Украина)

E-mail: rezidentnv@mail.ru

Рассмотрена сравнительная эффективность работы низкотемпературных систем теплоснабжения с теплонасосными установками и водогрейными котлами. Показано, что коэффициент трансформации (отопительный коэффициент) и коэффициент использования теплоты топлива в теплонасосных установках не могут быть использованы для энергетической оценки эффективности альтернативных систем теплоснабжения. Однако коэффициент трансформации входит в формулы, характеризующие эффективность работы теплонасосных установок. Получена обобщенная формула для определения коэффициента трансформации. Предложено эффективность работы систем теплоснабжения оценивать при помощи индикаторов, характеризующих относительное увеличение эксергетических коэффициентов полезного действия, экономию топлива и экономию затрат на энергоносители. Получены формулы и построены номограммы для определения этих индикаторов. Сравнительный анализ эффективности работы низкотемпературных систем теплоснабжения с теплонасосными установками и водогрейными котлами показал, что эффективность работы систем с теплонасосными установками повышается при увеличении коэффициентов трансформации, цен на топливо, а также при низких ценах на электроэнергию. Отмечено, что при низких ценах на топливо предельные значения коэффициентов трансформации, при которых эффективность работы теплонасосных установок увеличивается, возрастают, а повышение энергетической эффективности теплонасосных установок не всегда может быть гарантией повышения их экономической эффективности. Полученные результаты справедливы лишь для систем отопления, для систем горячего водоснабжения потребуются дополнительный нагрев воды из конденсатора теплонасосных установок до нормативной температуры от другого источника теплоты, что снижает эффективность использования теплонасосных установок.

Ключевые слова: котел, теплонасосная установка, системы теплоснабжения.

Ил. 3. Библиогр.: 10 назв.

COMPARATIVE EFFICIENCY OF HEAT-PUMPS APPLICATION IN LOW TEMPERATURE HEAT SUPPLY SYSTEMS

CHERPURNOY M. N., RESIDENT N. V.

Vinnitsa National Technical University (Ukraine)

The article considers comparative operation-efficiency of the low-temperature heat-supply systems with heat pumping plants (HPP) and with hot-water boilers. The paper shows that for energy evaluation of the alternative heat-supply systems effectiveness one cannot employ the transformation ratio (heating coefficient) and the fuel heat-utilization factor in the HPP. Nonetheless the transformation ratio enters the formulae designating the efficiency of HPP operation. The authors obtain a generalized formula for ascertainment of transformation ratio and suggest evaluating the operation efficiency of the heat-supply systems by means of indicators specifying relative gain in the exergy-efficiency factor, fuel savings and saving expenditures connected with fuel and utilities. They attain formulae and build nomographic charts for those indicators ascertainment. The operation-efficiency comparative analysis of the low-temperature heat supply systems with HPP and with hot-water boilers shows that the HPP systems increase their effectiveness with transformation ratio, fuel price increase as well as with low electric-energy prices. The article specifies that with fuel low prices, the transformation-ratios limiting values with which the HPP operation-efficacy gains, grow. Energy-efficiency increase in the HPP does not always guaranty their economic effectiveness. These findings are true only for the heating systems. The hot water-supply systems will require the HPP condenser water additional heating to the assumed temperature from another thermal source, which reduces the effectiveness of the heat pump plants utilizing.

Keywords: boiler, heat pumping plant, heat supply systems.

Fig. 3. Ref.: 10 titles.

Введение. Одним из приоритетных методов экономии топлива и защиты окружающей среды является использование низкотемпературных источников энергии. Из всех видов нетрадиционных источников энергии теплонасосные технологии являются более перспективными для решения проблем энергосбережения. Применение теплонасосных установок (ТНУ) заложено практически во все зарубежные программы энергосбережения. Немаловажный фактор – универсальность ТНУ, которые могут использоваться для выработки теплоты и холода одновременно: теплоснабжения, вентиляции, сушки материалов и пр. Наиболее распространено применение ТНУ для нужд теплоснабжения, где тепловые отходы преобразуются в кондиционную тепловую энергию, нагревая теплоноситель до приемлемой температуры.

Большинство зарубежных и отечественных специалистов считает, что ТНУ будут занимать основное место в низкотемпературных системах теплоснабжения. Ввод ТНУ в тепловой баланс страны позволяет не только сократить расходы первичных энергоресурсов, но и уменьшить загрязнение окружающей среды. В последние десятилетия преимущества теплонасосных технологий и перспективность их практического использования стали предметом активного обсуждения [1–8].

Основная часть. Известно, что энергетическая эффективность ТНУ оценивается при помощи теплового коэффициента (коэффициента трансформации) φ , значение которого больше единицы и равно отношению отводимой из конденсатора ТНУ тепловой мощности Q_0 к мощности привода компрессора N . Для заданной тепловой производительности Q_0 знание φ позволяет подбирать мощность компрессора N или необходимую мощность испарителя $Q_{\text{и}}$:

$$N = Q_0 / \varphi; \quad Q_{\text{и}} = Q_0(\varphi - 1) / \varphi. \quad (1)$$

Однако коэффициент φ не может быть использован для сравнительной оценки энергетической эффективности альтернативных видов теплоснабжения, энергетический КПД которых всегда меньше единицы. Нередко энергетическую эффективность работы энергоустановок оценивают при помощи коэффициента использования теплоты топлива $K_{\text{итт}}$, равного отношению отпущаемой (полезной) мощности к мощности сжигаемого топлива:

$$K_{\text{итт}} = Q_{\text{пол}} / (B_{\text{р}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}) = Q_{\text{пол}} / (B_{\text{у}} Q_{\text{у}}) = Q_{\text{пол}} / Q_{\text{топ}}, \quad (2)$$

где $B_{\text{р}}$, $B_{\text{у}}$ – расход рабочего и условного топлива соответственно; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$, $Q_{\text{у}}$ – теплота сгорания рабочего и условного топлива; $Q_{\text{топ}}$ – мощность сжигаемого топлива.

При работе ТНУ с электроприводом компрессора его электрическая мощность N потребляется из электросети. Этой мощности соответствует эквивалентный расход условного топлива на электростанциях энергосистемы со среднестатистическим КПД $\eta_{\text{эл}}$ и КПД транспорта электроэнергии в энергосетях $\eta_{\text{эс}}$

$$B_{\text{ТНУ}} = N / (Q_{\text{у}} \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{эс}}) = Q_0 / (29,3 \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{эс}} \varphi). \quad (3)$$

Тогда с учетом (1) можно получить

$$K_{\text{итт}} = Q_0 / (B_{\text{ТНУ}} Q_y) = \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{эс}} \varphi. \quad (4)$$

Значения $K_{\text{итт}}$ в (4) при определенных условиях могут быть меньшими или большими единицы. И в этом случае $K_{\text{итт}}$ нецелесообразно использовать в качестве критерия сравнительной оценки эффективности альтернативных установок теплоснабжения. Коэффициенты φ и $K_{\text{итт}}$ не характеризуют качество отпускаемой теплоты, т. е. степени термодинамического совершенства энергоустановок. Последняя, как известно, оценивается эксергетическим КПД. Эксергетические КПД энергоустановок, как правило, представляют собой произведение энергетических КПД и фактора Карно ($\eta_c = 1 - T_0/T$, где T_0, T – абсолютная температура окружающей среды и теплоносителя). В этой связи эксергетический КПД теплового насоса равен

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{тн}} = \varphi \eta_c. \quad (5)$$

При сжигании газообразных топлив отношение теплоты сгорания топлива к его удельной эксергии составляет 0,97. На практике данным отношением пренебрегают. Поэтому эксергетический КПД котла определяется по формуле

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{к}} = \eta_{\text{к}} \eta_c. \quad (6)$$

Поскольку в формулу эксергетического КПД теплового насоса входит коэффициент трансформации, необходимо знать его значение. Теоретические значения φ можно определить по формуле для обратного цикла Карно, а действительные чаще всего определяют, вводя в эту формулу поправки [6, 9]. Обобщая имеющиеся в [6, 10] экспериментальные данные, удалось получить следующую формулу для расчета действительных значений φ :

$$\varphi = \exp(a - bT_{\text{к}})C, \quad (7)$$

где $a = 0,08T_{\text{и}} - 14,54$; $b = 2T_{\text{и}} \cdot 10^{-4} - 0,0366$; $C = 0,4\eta_{\text{км}} + 0,678$; $T_{\text{и}}, T_{\text{к}}$ – абсолютные температуры в испарителе и конденсаторе ТНУ; $\eta_{\text{км}}$ – КПД компрессора.

Эксергетический КПД системы теплоснабжения равен произведению эксергетических КПД отдельных элементов, входящих в эту систему. Для системы теплоснабжения от водогрейной котельной он равен произведению эксергетических КПД котла, тепловой сети и отопительных приборов

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{кот}} = \eta_{\text{ex}}^{\text{к}} \eta_{\text{ex}}^{\text{тс}} \eta_{\text{ex}}^{\text{оп}}. \quad (8)$$

Для системы теплоснабжения от ТНУ этот КПД равен произведению эксергетических КПД: теплового насоса, электростанции, электросетей, отопительных приборов:

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ТНУ}} = \eta_{\text{ex}}^{\text{тн}} \eta_{\text{ex}}^{\text{эл}} \eta_{\text{ex}}^{\text{эс}} \eta_{\text{ex}}^{\text{оп}}. \quad (9)$$

Установлено [7, 8], что эксергетический КПД котлов возрастает при увеличении температуры отпускаемого теплоносителя, а эксергетический КПД ТНУ при этом же условии снижается вследствие уменьшения φ . Эксергетический КПД отопительных приборов увеличивается при умень-

шении температуры теплоносителя. Поэтому сравнение систем теплоснабжения следует производить при условиях, что теплоснабжение осуществляется на одну и ту же тепловую сеть с одинаковыми отопительными приборами, равными температурами теплоносителя и приемника теплоты (помещений). Эти условия выполнимы только для систем теплоснабжения с относительно низкими температурами теплоносителя ($t_{\tau} = 35\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$) и современными эффективными отопительными приборами. В централизованных системах теплоснабжения с радиаторным отоплением температура теплоносителя из котлов, как правило, превышает $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чтобы нагреть до такой же температуры теплоноситель в ТНУ, необходимо иметь температуру в холодном источнике теплоты порядка $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$, что в большинстве случаев невыполнимо.

Сравним эффективность работы систем теплоснабжения от ТНУ и водогрейного котла при указанных выше условиях. После несложных преобразований вместо (8) и (9) можно получить [7]:

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{кот}} = \eta_{\text{к}} \eta_{\text{тс}} \eta_{\text{с}}^{\text{п}}; \quad (10)$$

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ТНУ}} = \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{эс}} \varphi \eta_{\text{с}}^{\text{п}}, \quad (11)$$

где $\eta_{\text{с}}^{\text{п}}$ – фактор Карно при температуре в помещении.

Деление (11) на (10) дает

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ТНУ}} / \eta_{\text{ex}}^{\text{кот}} = \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{эс}} \varphi / (\eta_{\text{к}} \eta_{\text{тс}}). \quad (12)$$

На практике для рассматриваемых систем теплоснабжения с достаточной степенью точности можно считать, что $\eta_{\text{эс}}/\eta_{\text{тс}} \approx 1$. Для сравнительной оценки термодинамического совершенства индикатором термодинамической эффективности может служить величина

$$E_0 = (\eta_{\text{ex}}^{\text{ТНУ}} - \eta_{\text{ex}}^{\text{кот}}) / \eta_{\text{ex}}^{\text{ТНУ}} = 1 - \eta_{\text{к}} / (\eta_{\text{эл}} \varphi) = 1 - \varepsilon. \quad (13)$$

При $E_0 = 0$ термодинамическая эффективность систем одинакова; при положительных значениях E_0 эффективность систем с ТНУ выше эффективности систем с водогрейным котлом, а при отрицательных значениях E_0 – наоборот. С целью упрощения расчетов на рис. 1 построена номограмма для определения комплекса ε .

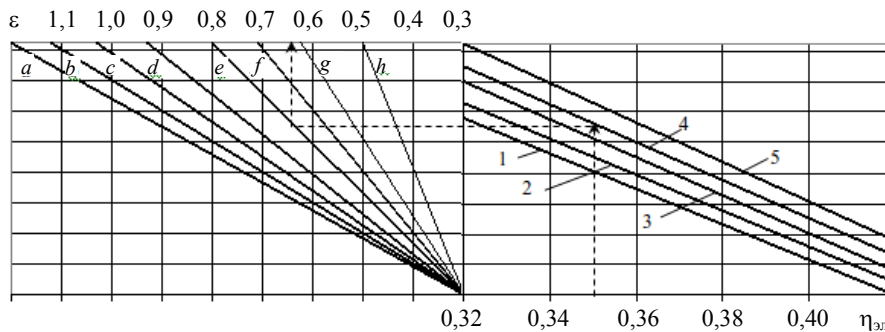


Рис. 1. Номограмма для определения значений ε в формуле (13):

1 – $\eta_{\text{к}} = 0,84$; 2 – $0,86$; 3 – $0,88$; 4 – $0,90$; 5 – $0,92$;
 $a - \varphi = 2,80$; $b - 3,00$; $c - 3,20$; $d - 3,50$; $e - 4,00$; $f - 4,50$; $g - 5,00$; $h - 6,00$

В экономических расчетах топливная составляющая в общей стоимости энергии весьма значительна. Определим расходы условного топлива в рассматриваемых системах теплоснабжения одинаковой мощности Q_0 . На выработку этой мощности в котле требуется начальный расход условного топлива

$$B_{к0} = Q_0 / (29,3\eta_{к0}) = 0,03413Q_0 / \eta_{к0}, \quad (14)$$

где $\eta_{к0}$ – начальный КПД котла.

При наличии тягодутьевых установок (вентилятора и дымососа) с общей мощностью их электроприводов $N_{тд}$ эта мощность потребляется из электросети.

На выработку такой мощности на электростанциях энергосистемы расходуется эквивалентное количество условного топлива

$$B_{тд} = N_{тд} / (29,3\eta_{эл}\eta_{эс}). \quad (15)$$

Поэтому суммарный расход условного топлива в системе должен составлять

$$B_к = B_{к0} + B_{тд}. \quad (16)$$

Расчеты показали, что даже при относительно низких значениях КПД ($\eta_{эл} = 0,33$; $\eta_{эс} = 0,90$) расходы условного топлива на электроприводы тягодутьевых установок не превышают 2 % от начального расхода топлива на котел. Увеличение расхода топлива можно интерпретировать снижением КПД котла на такой же процент, т. е. $\eta_к = \eta_{к0} - 0,02$. Это дает возможность находить расход условного топлива по (14) при $\eta_{к0} = \eta_к$.

Расход условного топлива на электропривод компрессора ТНУ определяется по (3). Сравнительная величина экономии или перерасхода топлива в рассматриваемых системах теплоснабжения будет равна

$$\Delta B = B_к - B_{ТНУ} = Q_0 / 29,3 \left[1/\eta_к - 1/(\eta_{эл}\eta_{эс}\varphi) \right]. \quad (17)$$

Очевидно, что экономия топлива в системе теплоснабжения с ТНУ достигается при условии, что $1/\eta_к > 1/(\eta_{эл}\eta_{эс}\varphi)$. Величина относительного расхода топлива в процентах будет характеризовать относительную топливную эффективность работы систем теплоснабжения

$$B_* = (B_к - B_{ТНУ}) / B_к \cdot 100 = \left[1 - \eta_к / (\eta_{эл}\eta_{эс}\varphi) \right] \cdot 100. \quad (18)$$

Если $B_* = 0$, то расходы топлива в рассматриваемых системах теплоснабжения одинаковы. Положительные значения B_* характеризуют процентную экономию топлива в системах с ТНУ, а отрицательные – перерасход. Значения индикатора топливной эффективности систем B_* можно определить по номограмме на рис. 2.

Рассмотрим эффективность использования денежных средств на энергоносители в системах теплоснабжения. С учетом (14) стоимость условного топлива, сжигаемого в котельной за определенный период времени τ при цене топлива C_τ за тонну, равна

$$S_T = 3,6B\Pi_T\tau = 0,123Q_0\Pi_T\tau/\eta_k. \quad (19)$$

Стоимость электроэнергии, потребляемой из электросети ТНУ за этот же период при цене на электроэнергию Π_0 за 1 МВт/ч:

$$S_0 = M\Pi_0\tau = Q_0\Pi_0\tau/\varphi. \quad (20)$$

Относительная стоимость энергоносителей

$$S_* = \frac{S_T - S_0}{S_0} = \frac{0,123\varphi\Pi_T}{\eta_k\Pi_0} - 1 = \frac{0,123\varphi Z}{\eta_k} - 1 = \Xi - 1, \quad (21)$$

где $Z = \Pi_T/\Pi_0$.

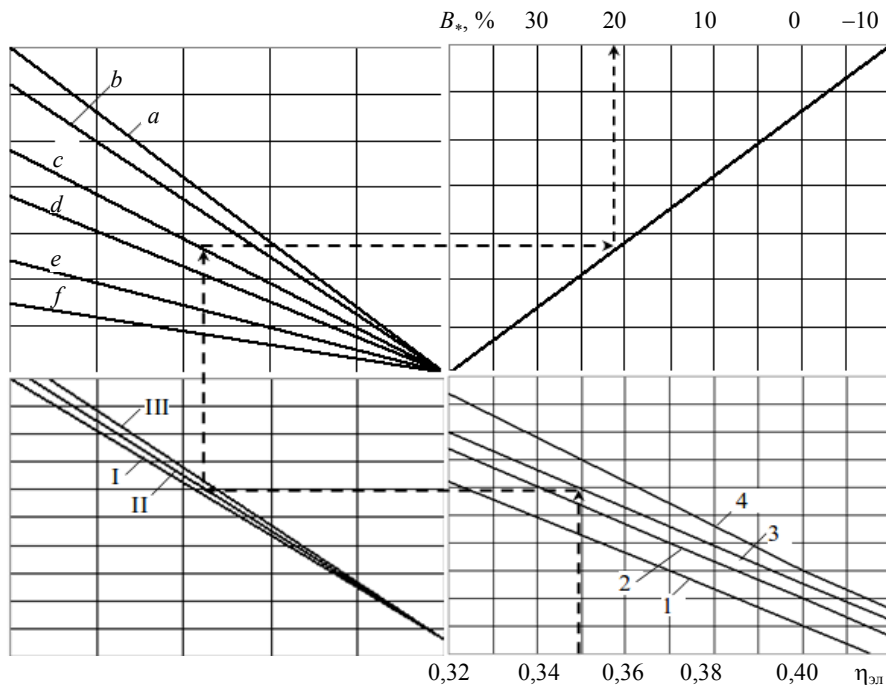


Рис. 2. Номограмма для определения значений B_* :

1 – $\eta_k = 0,84$; 2 – 0,88; 3 – 0,90; 4 – 0,94; I – $\eta_{эс} = 0,88$; II – 0,90; III – 0,94;
 $a - \varphi = 2,60$; $b - 3,00$; $c - 3,50$; $d - 4,00$; $e - 5,00$; $f - 6,00$

Если $S_* = 0$, то расходы на энергоносители в котельной и ТНУ одинаковы. Положительные значения S_* характеризуют перерасход средств в котельной, а отрицательные – в ТНУ. Экономическая эффективность использования денежных средств на энергоносители в ТНУ возрастает при уменьшении КПД котлов и цен на электроэнергию, а также при увеличении φ и цен на топливо. Для удобства оценки стоимостной эффективности работы рассматриваемых систем теплоснабжения на рис. 3 приведена номограмма для определения комплекса Ξ в (21).

В случае низких цен на топливо предельные значения φ , при которых $\Xi > 1$ и $S_* > 1$, возрастают. Величина S_* может рассматриваться как индикатор экономической эффективности использования энергоносителей.

Она является необходимым дополнением к (18). Следует обратить внимание на то, что повышение энергетической эффективности ТНУ не всегда может быть гарантией повышения ее экономической эффективности.

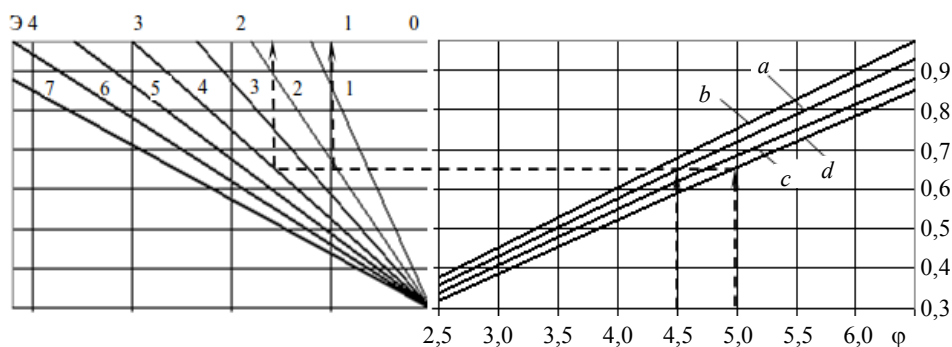


Рис. 3. Номограмма для определения комплекса Э:

$$a - \eta_k = 0,84; b - 0,88; c - 0,90; d - 0,94;$$

$$1 - Z = 1,00; 2 - 1,50; 3 - 2,00; 4 - 2,50; 5 - 3,00; 6 - 3,50; 7 - 4,00$$

В предложенные показатели эффективности работы систем водяного теплоснабжения с ТНУ входит коэффициент трансформации ϕ , с увеличением которого эффективность работы ТНУ повышается. Именно для современных низкотемпературных систем теплоснабжения достигаются высокие значения ϕ . Следует заметить, однако, что вышесказанное справедливо лишь для систем отопления. В системах горячего водоснабжения нормативная температура горячей воды составляет $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это означает, что некоторую часть теплоносителя после ТНУ надо подогревать из другого источника теплоты (электронагрев, нагрев в конденсационных котлах и пр.). В этом случае общая эффективность систем отопления и горячего водоснабжения будет снижаться. Вопрос о количественной оценке такого снижения требует дополнительного изучения.

ВЫВОДЫ

1. Получена удобная для инженерной практики формула для определения коэффициентов трансформации в теплонасосных установках.
2. Сравнительную эффективность работы низкотемпературных систем теплоснабжения с теплонасосными установками и водогрейными котлами удобно оценивать при помощи относительных значений их эксергетических КПД, для определения которых авторами предложены формулы и построены номограммы.
3. Определены условия, при которых использование теплонасосных установок эффективнее, чем отопительных котлов.
4. Представленные результаты являются необходимой предпосылкой для экспресс-оценки эффективности работы низкотемпературных систем теплоснабжения с теплонасосными установками и выбора условий их работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, Л. Л. Перспективы применения тепловых насосов в Республике Беларусь / Л. Л. Васильев // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 23–24.

2. Новожилов, Ю. Н. Применение тепловых насосов в системах теплоснабжения / Ю. Н. Новожилов // *Промышленная теплоэнергетика*. – 2006. – № 5. – С. 24–25.
3. Быстрицкий, Г. Ф. Применение теплонасосных установок в системах отопления и горячего теплоснабжения / Г. Ф. Быстрицкий, А. Г. Спиридонов // *Энергетик*. – 2007. – № 1. – С. 52–59.
4. Долинский, А. А. Альтернативное теплоснабжение на базе тепловых насосов / А. А. Долинский, Б. Х. Драганов, Т. В. Морозюк // *Промышленная теплотехника*. – 2007. – № 6. – С. 67–71.
5. Гершкович, В. Ф. От централизованного теплоснабжения – к тепловым насосам / В. Ф. Гершкович // *Энергосбережение*. – 2010. – № 3. – С. 24–28.
6. Клименко, В. Н. Некоторые особенности применения тепловых насосов для утилизации сбросной теплоты отопительных котлов / В. Н. Клименко // *Промышленная теплотехника*. – 2011. – № 5. – С. 42–48.
7. Безродный, М. К. Энергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання / М. К. Безродний, Н. О. Пригула. – Киев: НТУУ «КПІ», 2012. – 205 с.
8. Чепурной, М. Н. Сравнение энергоэффективности систем теплоснабжения от отопительных котельных и теплонасосных установок / М. Н. Чепурной, О. В. Куцак, И. Н. Дымнич // *Новости теплоснабжения*. – 2014. – № 1. – С. 26–39.
9. Некрасова, О. А. Исследование теплонасосных систем отопления (модельный подход) / О. А. Некрасова, Ю. В. Синяк // *Теплоэнергетика*. – 1986. – № 11. – С. 30–34.
10. Пустовалов, Ю. В. Исследование эффективности парокомпрессионных теплонасосных установок в системах теплоснабжения городов / Ю. В. Пустовалов. – М.: ВНИИцентр, 1989. – 179 с.

REFERENCES

1. Vasi'ev, L. L. (2005) Perspectives of Utilizing Thermal Pumps in the Republic of Belarus. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Journal of Engineering Physics], 78 (1), 23–24 (in Russian).
2. Novozhilov, Yu. N. (2006) Employing Thermal Pumps in Systems of Heat Supply. *Promyshlennaia Teploenergetika* [Industrial Heat Power Engineering], 5, 24–25 (in Russian).
3. Bystritskiy, G. F., & Spiridonov, A. G. (2007) Application of Heat Pump Installations in the Systems of Heating and Heat Supply. *Energetik* [Energetik], 1, 52–59 (in Russian).
4. Dolinskiy, A. A., Draganov, B. H., & Morozjuk T. V. (2007) Alternative Heat Supply Based on the Thermal Pumps. *Promyshlennaia Teplotekhnika* [Industrial Thermotechnics], 6, 67–71 (in Russian).
5. Gershovich, V. F. (2010) From Centralized Heat Supply to Thermal Pumps. *Energosberezhenie*, [Energy Saving], 3, 24–28 (in Russian).
6. Klimenk, V. N. (2011) Certain Peculiarities of Employing Thermal Pumps for Utilization of the Heating Boilers Waste Heat. *Promyshlennaia Teplotekhnika* [Industrial Thermotechnics], 5, 42–48 (in Russian).
7. Bezrodnyi, M. K., & Prytula, N. O. (2012) *Energy Effectiveness of Heat Supply Schemes with the Thermal Pumps*. Kyiv: National Technical University of Ukraine 'Kiev Polytechnic Institute'. 205 p. (in Ukrainian).
8. Chepurnoy, M. N., Kutsak O. V., & Dymnich, I. N. (2014) Energy-Efficiency Comparison of the Heat Supply Systems of the Heating-Boiler Plants and Those of the Heat-Pump Installations. *Novosti Teplosnabzheniia* [Heat Supply News], 1, 26–39 (in Russian).
9. Nekrasova, O. A., & Sinyak, Yu. V. (1986) Investigation of the Thermal Pump Heating Systems (Simulation Approach). *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 11, 30–34 (in Russian).
10. Pustovalov, Yu. V. (1989) *Effectiveness Investigation of the Steam-Compressing Heat-Pump Installations in the Heat Supply Systems of the Cities*. Moscow: VNTI Tsentr. 179 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
теплоэнергетики

Поступила 12.02.2015