

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; В. В. Лещенко; Р. О. Тихоненко

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И КОГЕНЕРАЦИОННЫМ ПРИВОДАМИ

Проанализированы энергетические преимущества применения парокompрессионных тепловых насосов (ТН) с электрическим и когенерационным приводами. Представленные результаты исследований позволяют оценить экономию условного топлива в случае применения парокompрессионных ТН с электрическим и когенерационным приводами для разных режимов работы ТН и осуществить выбор эффективных режимов работы парокompрессионных ТН с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных ТН с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Ключевые слова: энергетические преимущества, парокompрессионный тепловой насос, коэффициент преобразования, электрический привод, когенерационный привод, экономия условного топлива.

Введение

В Украине современное развитие энергетики характеризуется значительным увеличением стоимости энергоресурсов и ухудшением состояния окружающей среды. Решение проблем энерго- и ресурсосбережения, а также охраны окружающей среды являются приоритетными направлениями исследований в области потребления топливно-энергетических ресурсов [1]. Доля потребления природного газа в промышленном комплексе Украины поныне остается большой. Значительную часть энергетических проблем страны решают за счет сжигания природного газа. В свете энергетического кризиса актуальным становится вопрос эффективного потребления энергоресурсов и внедрения новейших энергосберегающих технологий [2]. Использование парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами будет способствовать экономии природного газа и улучшению состояния окружающей среды за счет снижения теплового загрязнения и количества вредных выбросов продуктов сгорания.

Вопросам оценки энергетической эффективности тепловых насосов за последние годы посвящено немало публикации [1 – 6]. В работе [1] автором выполнены исследования по повышению эффективности и выбору рациональных параметров и режимов работы теплонасосных станций для систем отопления и теплоснабжения по расходу условного топлива. В [2] проведен термодинамический и эксергетический анализ эффективности парокompрессионного цикла теплонасосной станции теплоснабжения. Авторы в исследовании [3] анализируют термодинамическую эффективность теплонасосных станций теплоснабжения. В исследовании [4] предложен новый подход к оценке эффективности тепловых насосов. Однако в исследованиях [1 – 4] не учтены потери энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии от электростанций разных типов. Автором [5] проведен термодинамический анализ разных типов ТН. В работе [6] определены эффективные действительные режимы работы ТН с электрическим и когенерационным приводами с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных тепловых насосов и потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТН.

В работах [1 – 6] авторами не проведена оценка объемов экономии энергоресурсов от вне-

дрения парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Целью исследования является определение энергетических преимуществ применения парокompрессионных ТН и оценка объемов экономии энергоресурсов от внедрения парокompрессионных ТН с электрическим и когенерационным приводами с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных ТН с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии; определение эффективных режимов работы парокompрессионных ТН с электрическим и когенерационным приводами.

Основная часть

В парокompрессионных ТН повышение температурного уровня низкотемпературной теплоты происходит при механическом сжатии хладагента в компрессоре. Тепловые насосы могут иметь электрический и когенерационный приводы (от газопоршневого двигателя). Когенерационный привод тепловых насосов позволяет избежать дополнительных потерь электроэнергии при транспортировке. Кроме того применение ТН с когенерационным приводом компрессора от газовых двигателей может рассматриваться как одно из важных направлений энерго- и ресурсосбережения, поскольку предусматривает утилизацию теплоты отходных газов после газового двигателя, что обеспечивает лучшую энергетическую эффективность.

Чаще всего энергетическую эффективность преобразования энергии в тепловом насосе оценивают коэффициентом преобразования энергии φ , который равен отношению энергии, поступившей к потребителю, к энергии, использованной для реализации цикла.

Теоретическое значение коэффициента преобразования ТН определяют по формуле:

$$\varphi_m = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \quad (1)$$

где T_1 и T_2 – соответственно температуры высокотемпературного теплоносителя на выходе и низкотемпературного теплоносителя на входе в ТН, К.

Следует отметить, что коэффициент преобразования не учитывает все потери энергии, связанные с выработкой теплоты в ТН. В реальных условиях, кроме дросселирования, происходят потери энергии в трубопроводах и оборудовании ТН.

Действительный коэффициент преобразования ТН будет составлять

$$\varphi_d = \varphi_t \cdot \eta_{тн}, \quad (2)$$

где $\eta_{тн}$ – энергетический КПД ТН, который учитывает все потери энергии в тепловом насосе. Величина энергетического КПД современных ТН находится в пределах 0,65 – 0,7 [4].

В отечественной, зарубежной литературе, а также на практике эффективность использования ТН оценивают преимущественно по действительному коэффициенту преобразования. Для эффективной работы ТН с электрическим приводом считают приемлемой величину $\varphi_d \geq 2,5 \dots 3,0$; высокую энергетическую эффективность ТН обеспечивают при $\varphi_d = 3,5 \dots 4,0$. Такие значения коэффициентов преобразования подтверждают статистические данные по действительным коэффициентам преобразования ТН, которые выпускают фирмы LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, "Энергия", "Тритон-ЛТД" [4].

Высокую энергетическую эффективность ТН с когенерационным приводом обеспечивают при $\varphi_d \geq 2,0$ что обусловлено учётом дополнительной тепловой мощности от утилизационного оборудования когенерационного привода ТН [7].

В нашем исследовании проанализирована энергетическая эффективность системы "Источник приводной энергии ТН – ТН – потребитель теплоты от ТН" на примере парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами. Преимуществом

такого подхода является учёт потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТН с целью определения эффективных режимов работы ТН с электрическим и когенерационным приводами и оценки объемов экономии энергоресурсов от внедрения пароконденсационных ТН.

Электроэнергию в Украине производят тепловые (ТЭС), атомные электростанции (АЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС). Зная значения КПД ТЭС, АЭС и ГЭС, а также доли электрической энергии, которую они генерируют, можно определить средний КПД генерирования электроэнергии в Украине.

Усредненное значение КПД электростанций будет составлять:

$$\eta_{ЭС} = \frac{\alpha_{ТЭС} + \alpha_{АЭС} + \alpha_{ГЭС}}{\frac{\alpha_{ТЭС}}{\eta_{ТЭС}} + \frac{\alpha_{АЭС}}{\eta_{АЭС}} + \frac{\alpha_{ГЭС}}{\eta_{ГЭС}}}, \quad (3)$$

где $\alpha_{ТЭС}$, $\alpha_{АЭС}$, $\alpha_{ГЭС}$ – доли электрической энергии, которые генерируют соответствующие электростанции.

Учитывая, что $\alpha_{ТЭС} = 0,463$; $\alpha_{АЭС} = 0,47$ и $\alpha_{ГЭС} = 0,07$, из формулы (3) можно получить усредненное значение КПД электростанций $\eta_{ЭС} = 0,383$ [6].

В случае вовлечения в энергетический баланс Украины альтернативных видов электростанций (на базе парогазовых установок (ПГУ) и газотурбинных установок (ГТУ), солнечных электростанций термодинамического цикла (СЭС), ветроэнергетических электростанций (ВЭС)), усредненное значение КПД электростанций будем определять так:

$$\eta_{ЭС} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum (\alpha_i / \eta_i)}, \quad (4)$$

где α_i – доли электрической энергии, которые генерируют соответствующие электростанции; η_i – КПД соответствующей электростанции.

От электростанций электрическая энергия через распределительные сети поступает к потребителю. КПД функционирования распределительных электрических сетей определяют уровнем потерь энергии при ее транспортировке. По данным годового отчета НКРЭ за 2010 год, величина общих технологических потерь электроэнергии в Украине составила 12,5% от объема электроэнергии, поступившей в сеть. Следовательно, КПД распределительных сетей в Украине будет составлять $\eta_{ЛЭП} = 0,875$ [6].

В конце энергетической цепи находится потребитель электрической энергии – электрический двигатель ТН. КПД электрического двигателя мощностью 55 – 100 кВт, с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем, будет составлять $\eta_{ЭП} = 80\text{--}85\%$. КПД электрического двигателя большой мощности будет составлять $\eta_{ЭП} = 90\text{--}95\%$ [6].

Таким образом, проанализировав цепь генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии, получим значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТН

$$\eta_{ЭЛ} = \eta_{ЭС} \cdot \eta_{ЛЭП} \cdot \eta_{ЭП}. \quad (5)$$

Для ТН с когенерационным приводом общий КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии будем определять по формуле: $\eta_{ЭЛ} = \eta_{Эд} \cdot \eta_{ЭП}$, где $\eta_{Эд}$ – эффективный КПД газопоршневого двигателя.

Для ТН с когенерационным приводом теоретическое значение коэффициента преобразования определяют с учетом мощности утилизационного оборудования когенерационного

привода $\varphi_T = \frac{Q_{ТН} + \Sigma Q_{ут}}{N_{км}}$, где $N_{км}$ – теоретическая мощность компрессора ТН, $\Sigma Q_{ут}$ – мощность утилизационного оборудования когенерационного привода ТН.

Эффективная интеграция парокompрессионных ТН с электрическим и когенерационным приводами в промышленность и энергетику обоснована обеспечением экономии условного топлива от внедрения.

Экономию условного топлива (в процентах) в случае применения парокompрессионных ТН с электрическим и когенерационным приводами определяют так:

$$\Delta B_y = \left(1 - \frac{\eta_{и.т.}^H}{\varphi \cdot \eta_{ЭЛ}} \right) \cdot 100, \quad (6)$$

где $\eta_{и.т.}^H$ – КПД-нетто замещаемого источника теплоты, $\eta_{ЭЛ}$ – общий КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии.

Эффективное внедрение парокompрессионных ТН с электрическим и когенерационным приводами в промышленность и энергетику будет достигнуто при условии:

$$\varphi_d > \frac{\eta_{и.т.}^H}{\eta_{ЭЛ}}, \quad (7)$$

где φ_d – действительный коэффициент преобразования ТН из формулы (2).

Исследование энергетической эффективности ТН проводили методом математического моделирования работы ТН с использованием программы в Excel. Исследовали энергетическую эффективность ТН с электроприводом и когенерационным приводом компрессора от газопоршневого двигателя (ГПД). Схемы указанных ТН приведены в работе [8].

В исследовании проведена оценка экономии условного топлива от внедрения парокompрессионных ТН малой (до 1 МВт) и большой мощностей с электрическим и когенерационным приводами (от ГПД). Исследование проводили для случаев использования в электроприводных ТН электроэнергии от электростанций разных типов, а также для усредненных значений КПД электростанций в Украине. В исследовании учтено, что КПД-нетто замещаемого источника теплоты $\eta_{и.т.}^H = 0,8$.

На рис. 1 и 2 показаны значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокompрессионных ТН с электроприводом для тепловых насосов малой и большой мощностей соответственно, в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования. Исследование проводили для случаев использования в ТН электроэнергии от электростанций разных типов, а также для усредненных значений КПД электростанций в Украине. Зависимости, показанные на рис. 1 и 2, позволяют определить минимальные теоретические значения коэффициента преобразования электроприводных ТН, выше которых применение определенного вида ТН обеспечивает экономию условного топлива и является целесообразным.

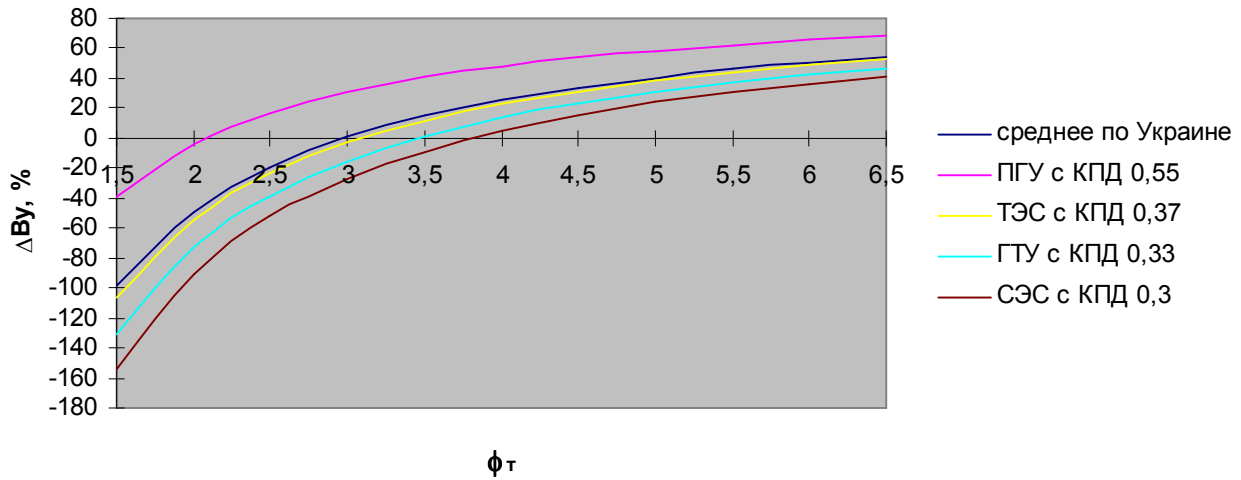


Рис. 1. Значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокомпрессионных ТН с электроприводом для тепловых насосов малой мощности в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования

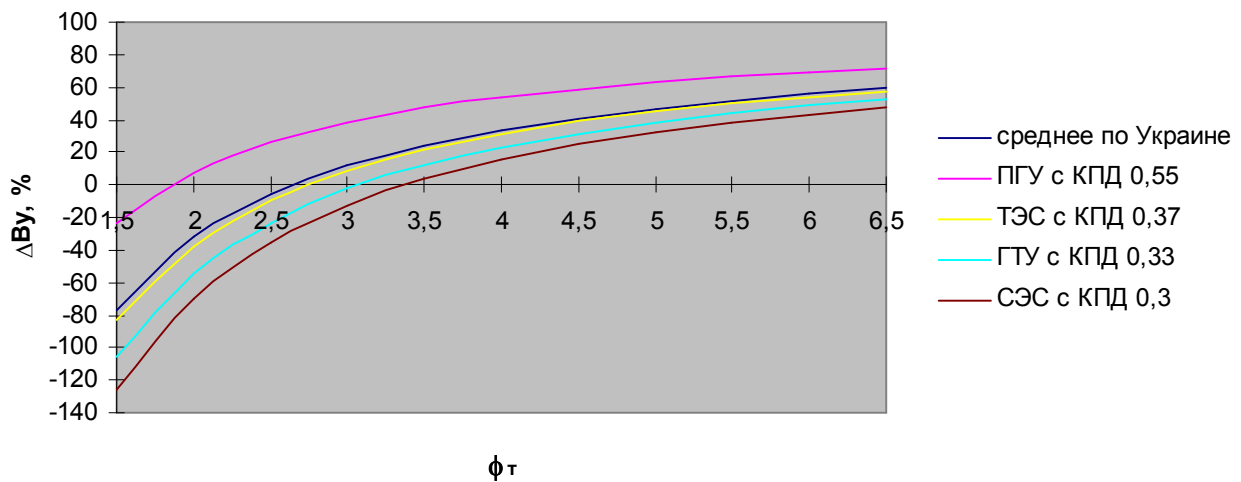


Рис. 2. Значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокомпрессионных ТН с электроприводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования

На рис. 3 и 4 показаны значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокомпрессионных ТН с электроприводом для тепловых насосов малой и большой мощностей соответственно, в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования. Исследование проводили для случаев использования в ТН электроэнергии от электростанций разных типов, а также для усредненных значений КПД электростанций в Украине. Эти зависимости позволяют определить минимальные действительные значения коэффициента преобразования электроприводных ТН, выше которых применение определенного вида ТН обеспечивает экономию условного топлива и является целесообразным.

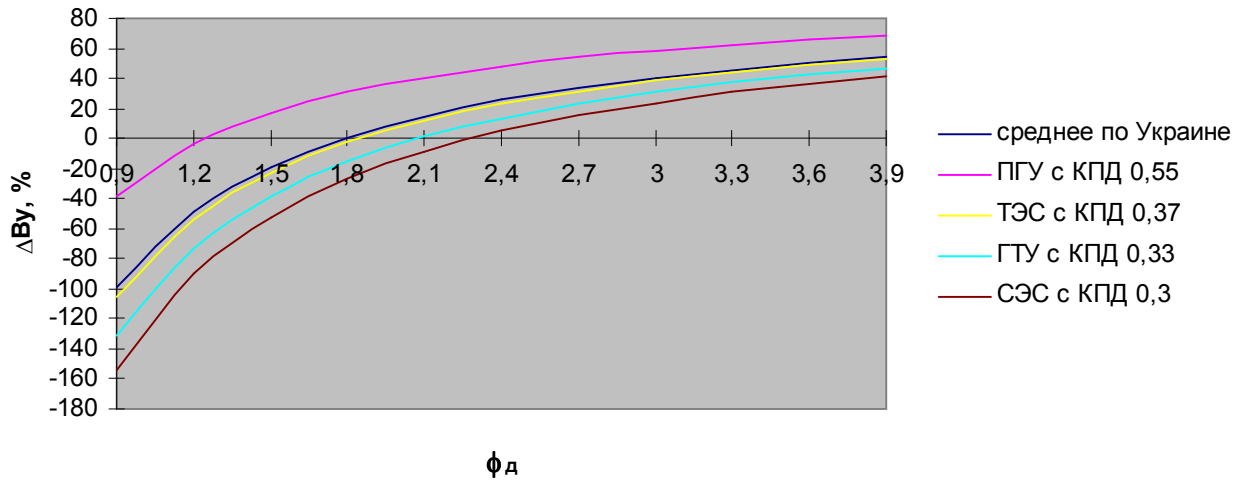


Рис. 3. Значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокompрессионных ТН с электроприводом для тепловых насосов малой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования

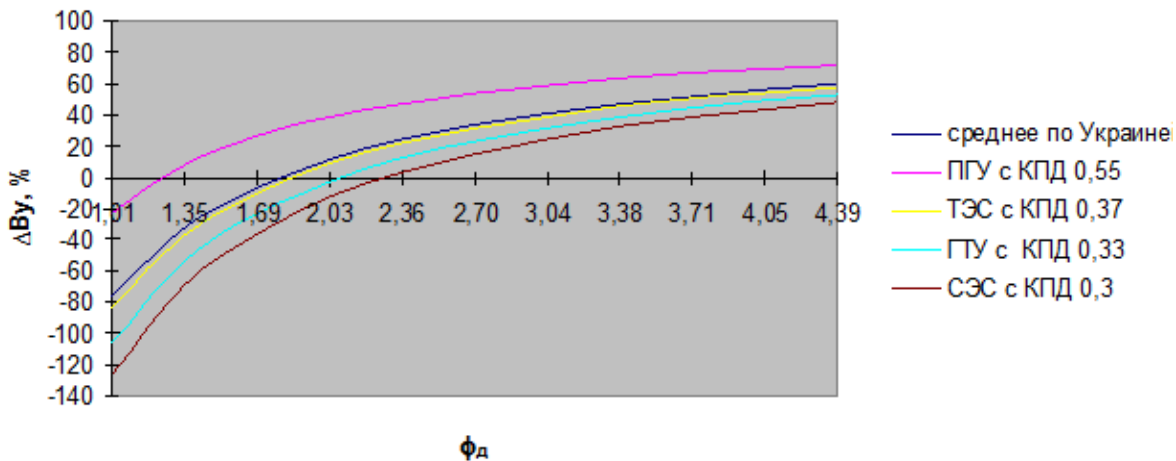


Рис. 4. Значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокompрессионных ТН с электроприводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования

Предложенные на рис. 1 – 4 зависимости определяют энергетические преимущества применения парокompрессионных ТН с электроприводом и позволяют оценить экономию условного топлива в случае применения парокompрессионных ТН с электроприводом для разных режимов работы ТН и использования электроэнергии от электростанций разных типов, а также для усредненных значений КПД электростанций в Украине.

На рис. 5 показаны значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокompрессионных ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов малой и большой мощностей в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования. Предложенные на рис. 5 зависимости позволяют определить минимальные теоретические значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида когенерационных ТН обеспечивает экономию условного топлива и является целесообразным.

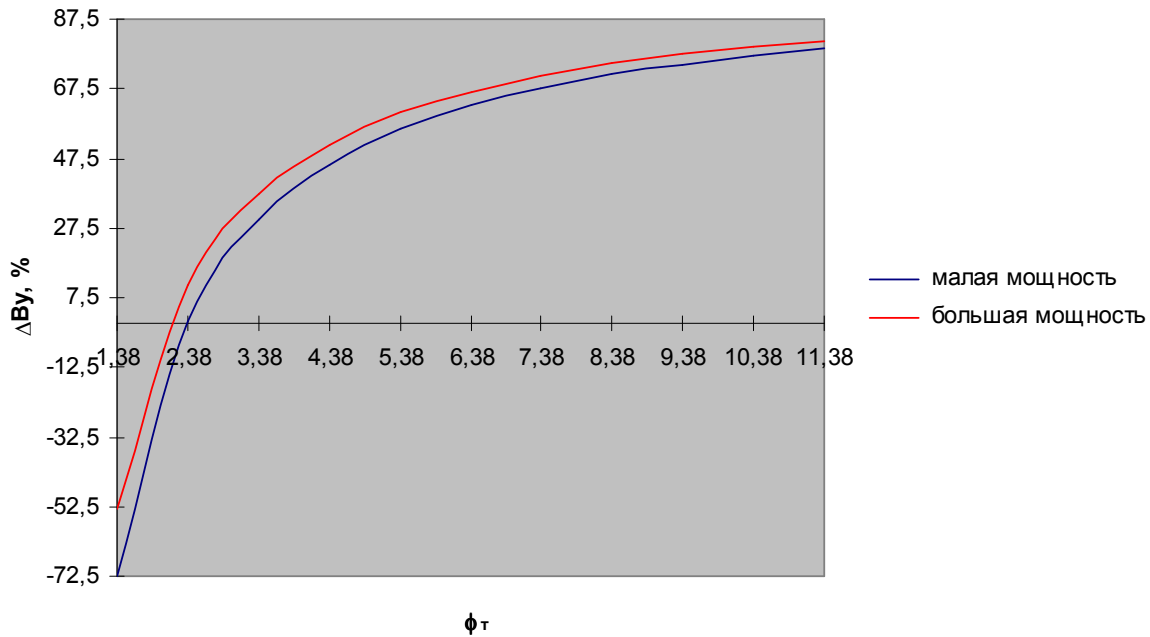


Рис. 5. Значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокомпрессионных ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов малой и большой мощностей в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования

На рис. 6 и 7 показаны значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокомпрессионных ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов малой и большой мощностей соответственно, в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования. Эти зависимости позволяют определить минимальные действительные значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида когенерационных ТН обеспечивает экономию условного топлива и является целесообразным.

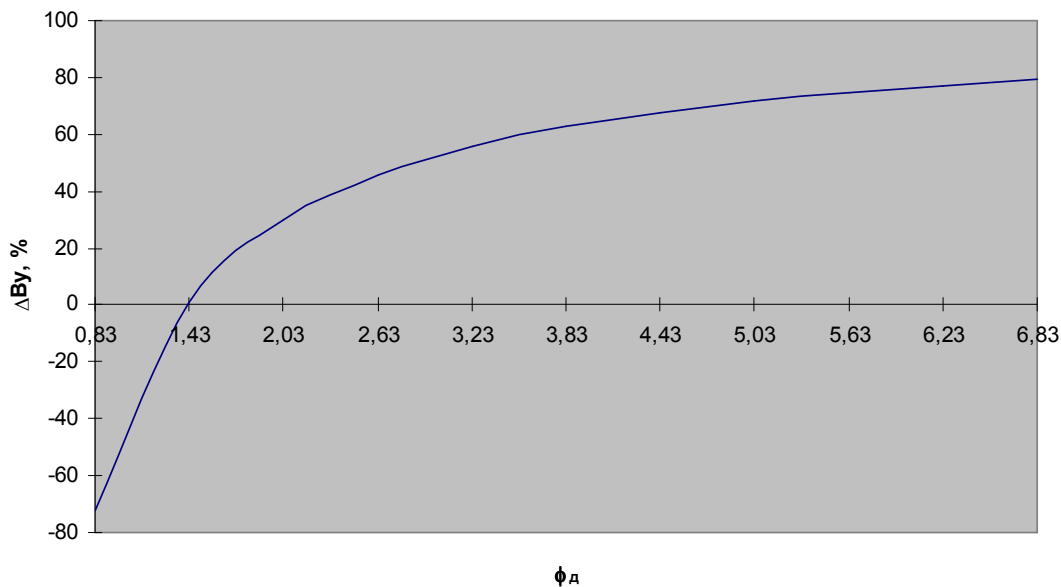


Рис. 6. Значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокомпрессионных ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов малой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования

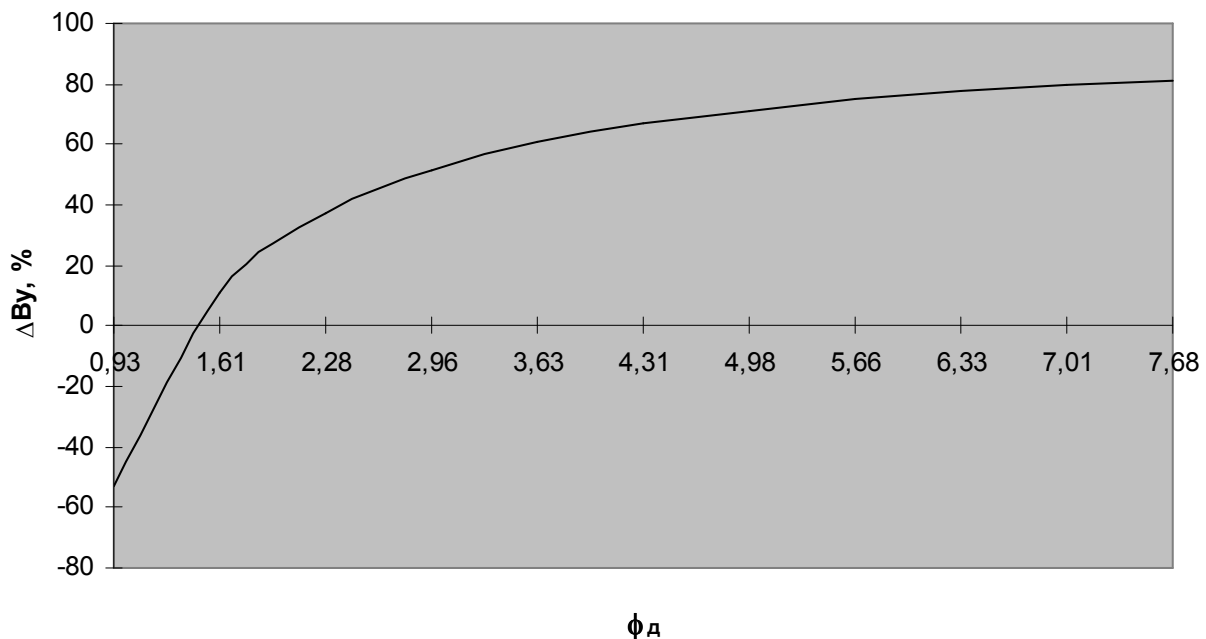


Рис. 7. Значения экономии условного топлива (в процентах) в случае применения парокompрессионных ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования

Предложенные на рис. 5 – 7 зависимости определяют энергетические преимущества применения парокompрессионных ТН с когенерационным приводом и позволяют оценить экономию условного топлива в случае применения парокompрессионных ТН с когенерационным приводом для разных режимов работы ТН.

Предложенные в исследовании зависимости (рис. 1 – 7) позволяют определить минимальные теоретические и действительные значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида ТН обеспечивает экономию условного топлива и является целесообразным.

На основании результатов исследования определено, что достаточную энергетическую эффективность ТН с электрическим приводом для разных источников приводной энергии парокompрессионных ТН с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии обеспечивают при $\phi_d \geq 2,5$. Высокую энергетическую эффективность ТН с электрическим приводом для разных источников приводной энергии парокompрессионных ТН, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии обеспечивают при $\phi_d \geq 3,5$. Эти значения коэффициентов преобразования хорошо согласуются со статистическими данными из исследования [4] относительно действительных коэффициентов преобразования ТН, которые выпускают фирмы LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, "Энергия", "Тритон-ЛТД".

Определено, что высокую энергетическую эффективность ТН с когенерационным приводом с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТН обеспечивают при $\phi_d \geq 2,0$, что хорошо согласуется с данными из исследования [7].

Представленные результаты исследований позволяют оценить экономию условного топлива в случае применения парокompрессионных ТН с электрическим и когенерационным приводами для разных режимов работы ТН и осуществить выбор эффективных режимов ра-

боты парокompрессионных ТН с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных тепловых насосов и с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Выводы

Проанализирована энергетическая эффективность системы "Источник приводной энергии ТН – ТН – потребитель теплоты от ТН" на примере парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами. Преимуществом такого подхода является учёт потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТН с целью определения эффективных режимов работы ТН с электрическим и когенерационным приводами и оценки объемов экономии энергоресурсов от внедрения парокompрессионных ТН.

Предложенные в исследовании зависимости (рис. 1 – 7) определяют энергетические преимущества применения парокompрессионных ТН и позволяют определить минимальные теоретические и действительные значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида ТН обеспечивает экономию условного топлива и является целесообразным.

На основании результатов исследования определено, что достаточную энергетическую эффективность ТН с электрическим приводом для разных источников приводной энергии парокompрессионных ТН с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии обеспечивают при $\varphi_d \geq 2,5$. Высокую энергетическую эффективность ТН с электрическим приводом для разных источников приводной энергии парокompрессионных ТН с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии обеспечивают при $\varphi_d \geq 3,5$. Определено, что высокую энергетическую эффективность ТН с когенерационным приводом с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТН обеспечивают при $\varphi_d \geq 2,0$. Эти значения коэффициентов преобразования хорошо согласуются со статистическими данными относительно действительных коэффициентов преобразования ТН, которые выпускают фирмы LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, "Энергия", "Тритон-ЛТД".

Представленные результаты исследований позволяют оценить экономию условного топлива в случае применения парокompрессионных ТН с электрическим и когенерационным приводами для разных режимов работы ТН и осуществить выбор эффективных режимов работы парокompрессионных ТН с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных тепловых насосов и потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исанова А. В. Повышение эффективности и выбор рациональных параметров и режимов работы теплонасосных станций для систем отопления и горячего водоснабжения : автореферат дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.03 / Исанова Анна Владимировна. – Воронеж, 2011. – 18 с.
2. Денисова А. Є. Аналіз парокompресійного циклу теплонасосних станцій теплопостачання / А. Є. Денисова., В. Ю. Бірюк // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2012. – Вып. 1 (38). – С. 125 – 128.
3. Безродний М. К. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання / М. К. Безродний, Н. О. Пригула // Вісник ВПШ. – 2013. – № 3. – С. 39 – 45.
4. Ильин Р. А. Новый подход к оценке эффективности тепловых насосов / Р. А. Ильин, А. К. Ильин // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2010. – № 2. – С. 83 – 87.
5. Елистратов С. Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов : дисс. ... докт. техн. наук : 01.04.14 / Елистратов Сергей Львович. – Новосибирск, 2010. – 383 с.
6. Энергетическая эффективность парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тихоненко // Научные труды ВНТУ. – № 4. – 2014. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3821/5563>.
Наукові праці ВНТУ, 2015, № 1

7. Калнинь И. М. Техника низких температур на службе энергетики / И. М. Калнинь // Холодильное дело. – 1996. – № 1. – С. 26 – 29.

8. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

Остапенко Ольга Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики.

Лещенко Вадим Владимирович – студент института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Тихоненко Роман Олегович – студент института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.