

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И КОГЕНЕРАЦИОННЫМ ПРИВОДАМИ

Проанализирована энергетическая эффективность парокомпрессионных тепловых насосов (ТН) с электрическим и когенерационным приводами. Определены эффективные действительные режимы работы тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, тепловой насос, коэффициент преобразования, электрический привод, когенерационный привод.

Введение

Современное развитие энергетики характеризуется значительным увеличением стоимости энергоносителей, а также ухудшением состояния окружающей среды и осложнением её охраны от действия теплогенерирующих установок. Энерго- и ресурсосбережение, а также охрана окружающей среды являются приоритетными направлениями развития фундаментальных исследований в области потребления топливно-энергетических ресурсов [1]. В промышленном комплексе Украины доля потребления природного газа все еще остается значительной. Больше половины энергетических проблем страны решаются за счет сжигания природного газа. В свете энергетического кризиса актуальной становится проблема эффективного потребления энергоносителей и внедрения новейших энергосберегающих технологий [2]. Использование парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами будет способствовать экономии природного газа и защите окружающей среды за счет снижения теплового загрязнения и количества вредных выбросов продуктов сгорания.

В последние годы вопросам энергетической эффективности тепловых насосов посвящено немало публикаций [1 – 7]. В работе [1] автором выполнены исследования по повышению эффективности, 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 парокомпрессионного 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 [3 – 4] не учтены потери энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии от электростанций разных типов. Авторами [5] выполнен анализ ТН с электрическим и когенерационным приводами для ограниченного количества вариантов. В работе [6] проведена оценка эффективности разных вариантов тепловых насосов по коэффициенту использования первичной энергии. Автором [7] выполнен термодинамический анализ разных типов ТН.

В работах [1 – 7] авторами не проведена оценка энергетической эффективности парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Целью исследования является определение энергетической эффективности парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами, определе-

ние эффективных действительных режимов работы ТН с электрическим и когенерационным приводами с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

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 имеет преимущества сравнительно с электрическим, поскольку 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 уходящих газов после газового двигателя, что обеспечивает лучшую энергетическую эффективность.

Энергетическую эффективность тепловых насосов можно оценивать несколькими критериями эффективности. 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.

Энергетическая эффективность ТН может быть оценена коэффициентом преобразования, теоретическое значение которого 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

$$\varphi_o = \varphi_m \cdot \eta_{mn}, \quad (2)$$

где η_{mn} – 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 и на практике эффективность использования ТН оценивают преимущественно по действительному коэффициенту преобразования. Для эффективной работы ТН с электрическим приводом считается приемлемой величина $\varphi_o \geq 2,5 \dots 3,0$; высокая энергетическая эффективность ТН обеспечивается при $\varphi_o = 3,5 \dots 4,0$. Такие значения коэффициентов преобразования подтверждены статистическими данными по действительным коэффициентам преобразования ТН, которые выпускают фирмы LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, "Энергия", "Тритон-ЛТД" [4].

Высокая энергетическая эффективность ТН с когенерационным приводом обеспечивается при $\varphi_d \geq 2,0$, что обусловлено учитыванием дополнительной тепловой мощности от утилизационного оборудования когенерационного привода ТН [6].

Проанализируем энергетическую эффективность системы "Источник приводной энергии ТН – ТН – потребитель теплоты от ТН" на примере парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводом. Преимуществом такого подхода является учет потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТН с целью определения эффективных действительных режимов работы ТН с

электрическим и когенерационным приводом.

Электроэнергия в Украине производится тепловыми (ТЭС), атомными электростанциями (АЭС) и гидроэлектростанциями (ГЭС). В состав украинской энергетики входит 44 тепловых, 8 гидравлических и 4 атомных электростанции. На тепловые электростанции приходится до 46,3% всего объема производства электроэнергии, на атомные – 47%, на гидравлические – около 7% [8, 9].

Проведем расчет энергетической цепи от ТЭС, АЭС и ГЭС к потребителю электрической энергии.

Коэффициент полезного действия ТЭС по производству электроэнергии зависит от КПД основных элементов – парового котла, турбоустановки, а также соединяющих их трубопроводов пара и воды [9, 10].

При генерировании электрической энергии часть выработанной энергии (4 – 6%) расходуется на подготовку топлива, подачу котельного воздуха, отведение дымовых газов из котлов, подачу охлаждающей воды, отведение конденсата и другие нужды. Если принять затраты электроэнергии на собственные нужды ТЭС в размере 5%, то окончательный КПД ТЭС (энергоблока) по производству электроэнергии можно определить

$$\eta_{ТЭС} = \eta_{нк} \cdot \eta_{мп} \cdot \eta_{мы} (1 - 0,05), \quad (3)$$

где $\eta_{нк}$ – КПД парового котла, $\eta_{мп}$ – КПД трубопроводов, $\eta_{мы}$ – КПД турбоустановки.

Наибольшее влияние на КПД электростанции имеет КПД турбоустановки, который учитывает значительную потерю тепловой энергии в конденсаторе турбины (45 – 50% от выработанного количества тепловой энергии). Остальные потери энергии на электростанции являются значительно меньшими. Принимая $\eta_{нк} = 0,9$; $\eta_{мп} = 0,99$; $\eta_{мы} = 0,5$, получим из формулы (3) значение $\eta_{ТЭС} = 0,423$, которое соответствует номинальной мощности электростанции. В случае неполной нагрузки ТЭС значение КПД уменьшается.

Если на АЭС как первичный источник энергии рассматривать ядерный реактор, то значение КПД АЭС будет зависеть от КПД турбогенераторной установки. В состав турбогенераторной установки входит паровая турбина, КПД которой η_{nm} (с учетом всех потерь тепловой энергии в ядерном реакторе, в теплообменнике, в конденсаторе, в трубопроводах) будет составлять около 33 – 34%. КПД генератора приблизительно равно 98,5%. Тогда значение КПД АЭС можно определить так:

$$\eta_{АЭС} = \eta_{nm} \cdot \eta_{г} = 0,33 \cdot 0,985 = 0,325. \quad (4)$$

На ГЭС для выработки электрической энергии используют энергию водных потоков. Первичными двигателями для ГЭС являются гидротурбины, которые приводят во вращение синхронные гидрогенераторы. КПД ГЭС составляет $\eta_{ГЭС} = 90 - 93 \%$, и по этому показателю они являются наиболее экономичными электростанциями [9, 10].

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:

$$\eta_{ЭС} = \frac{\alpha_{ТЭС} + \alpha_{АЭС} + \alpha_{ГЭС}}{\frac{\alpha_{ТЭС}}{\eta_{ТЭС}} + \frac{\alpha_{АЭС}}{\eta_{АЭС}} + \frac{\alpha_{ГЭС}}{\eta_{ГЭС}}}, \quad (5)$$

где $\alpha_{ТЭС}$, $\alpha_{АЭС}$, $\alpha_{ГЭС}$ – доли электрической энергии, которые генерируются соответствующими электростанциями.

Учитывая, что $\alpha_{ТЭС} = 0,463$; $\alpha_{АЭС} = 0,47$ и $\alpha_{ГЭС} = 0,07$, из формулы (5) можно получить усредненное значение КПД электростанций $\eta_{ЭС} = 0,383$.

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:

$$\eta_{ЭС} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum (\alpha_i / \eta_i)}, \quad (6)$$

где α_i – доли электрической энергии, которые генерируются соответствующими электростанциями; 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, которая поступила в сеть. Следовательно, КПД распределительных сетей в Украине будет составлять

$$\eta_{ЛЭП} = 1 - \beta_{ном} = 1 - 0,125 = 0,875. \quad (7)$$

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 $\eta_{ЭП} = 80-85\%$. КПД электрического двигателя большой мощности будет составлять $\eta_{ЭП} = 90 - 95\%$.

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

$$\eta_{ЭЛ} = \eta_{ЭС} \cdot \eta_{ЛЭП} \cdot \eta_{ЭП}, \quad (8)$$

значения которого будут составлять:

– для тепловых насосов малой мощности (до 1 МВт)

$$\eta_{ЭЛ} = 0,383 \cdot 0,875 \cdot 0,8 = 0,268;$$

– для тепловых насосов большой мощности (свыше 1 МВт)

$$\eta_{ЭЛ} = 0,383 \cdot 0,875 \cdot 0,9 = 0,302.$$

Уравнение энергетического баланса для системы "Источник приводной энергии ТН – ТН – потребитель теплоты от ТН" на примере парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим приводом:

$$Q_{mn} = Q_m \cdot \eta_{ЭЛ} \cdot \varphi_m \cdot \eta_{mn}, \quad (9)$$

где Q_{mn} – тепловая мощность ТН, Q_m – мощность, затраченная на электростанции для выработки электрической энергии для привода ТН, $\eta_{ЭЛ}$ – общий КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии по формуле (8), η_{mn} – КПД теплового потока, который учитывает потери энергии и рабочего агента в трубопроводах и оборудовании ТН.

Для оценки энергетической эффективности ТН с электроприводом используем безразмерный показатель

$$Q_{mn} / Q_m = \eta_{ЭЛ} \cdot \varphi_m \cdot \eta_{mn}. \quad (10)$$

При условии $Q_{mn} / Q_m = 1$ тепловой насос передает к потребителю такую же тепловую мощность, которая была затрачена для выработки электроэнергии для привода ТН. Чем большее значение этого показателя, тем более эффективным и конкурентоспособным будет тепловой насос.

Для ТН с когенерационным приводом уравнение энергетического баланса для системы "Источник приводной энергии ТН – ТН – потребитель теплоты от ТН" будет иметь вид (9). Однако в этом случае общий КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии будем определять по формуле: $\eta_{эл} = \eta_{эд} \cdot \eta_{эл}$, где $\eta_{эд}$ – эффективный КПД газопоршневого двигателя. Для ТН с когенерационным приводом значение φ_m в уравнении (9) будем определять с учетом мощности утилизационного оборудования когенерационного привода $\varphi_m = \frac{Q_{ми} + \Sigma Q_{ум}}{N_{км}}$, где $N_{км}$ – теоретическая мощность компрессора ТН, $\Sigma Q_{ум}$ – мощность утилизационного оборудования когенерационного привода ТН.

Энергетическую эффективность ТН с когенерационным приводом будем оценивать таким безразмерным показателем

$$Q_{ми}/Q_m = \eta_{эд} \cdot \eta_{эл} \cdot \varphi_m \cdot \eta_{ми}. \quad (11)$$

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 [11].

На рис. 1 показаны значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с электроприводом для тепловых насосов малой мощности 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. Пунктирной линией на рис. 1 показано граничное значение показателя энергетической эффективности ТН. Как отмечалось ранее, для случаев $Q_{ми}/Q_m > 1$ использование ТН является целесообразным.

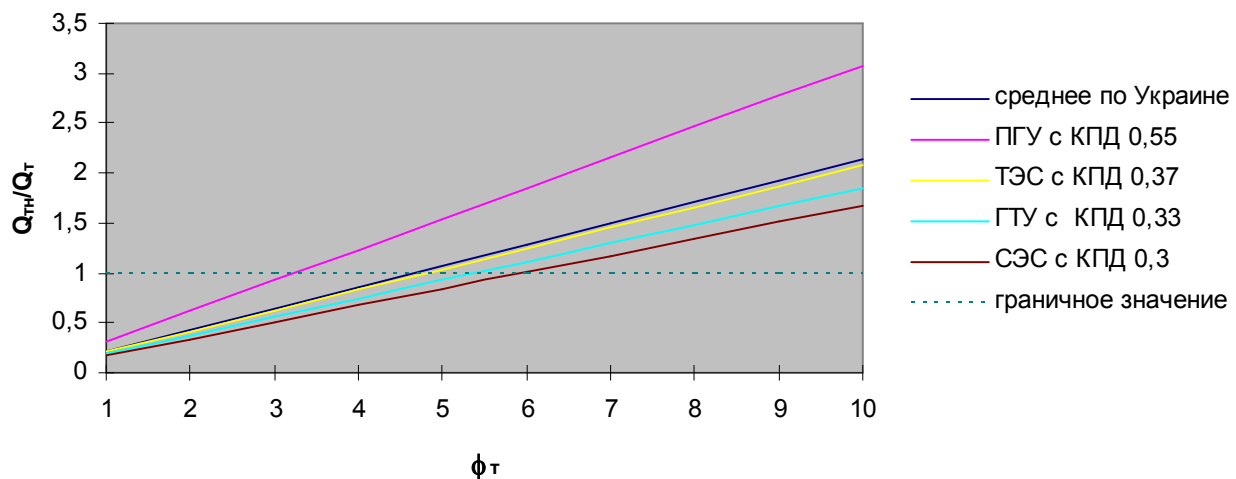


Рис. 1. Значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с электроприводом для тепловых насосов малой мощности в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования

На рис. 2 показаны значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с электроприводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования. Как и в предыдущем случае, исследование проводили для случаев использования в ТН электроэнергии от электростанций разных типов, а также для усредненных значений КПД электростанций в Украине. Выше пунктирной линии определена область эффективного использования таких ТН.

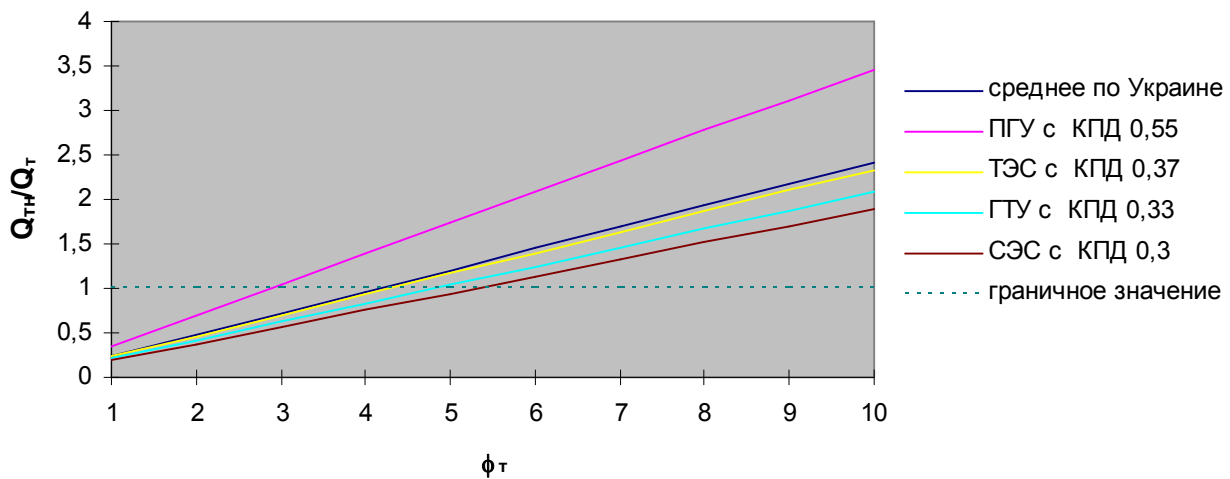


Рис. 2. Значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с электроприводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования

Зависимости, показанные на рис. 1 и 2, позволяют определить минимальные теоретические значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида ТН является целесообразным.

На рис. 3 показаны значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с электроприводом для тепловых насосов малой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования. Как и в предыдущих случаях, на рис. 3 выше пунктирной линии определена область эффективного использования таких ТН.

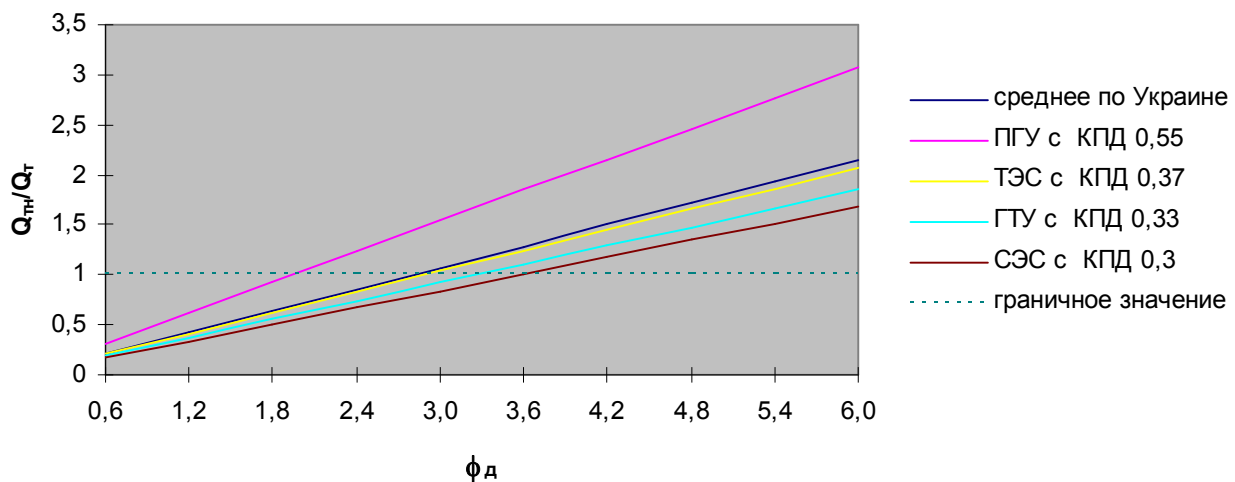


Рис. 3. Значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с электроприводом для тепловых насосов малой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования

На рис. 4 показаны значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с электроприводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования. Выше пунктирной линии определена область эффективного использования таких ТН.

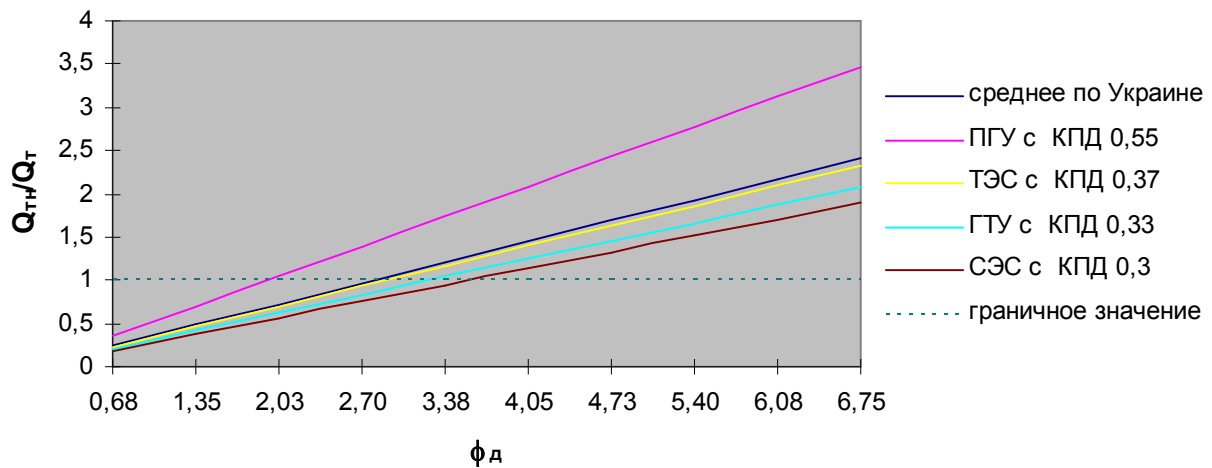


Рис. 4. Значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с электроприводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования

Зависимости на рис. 3 и 4 позволяют определить минимальные действительные значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида ТН является целесообразным.

На рис. 5 показаны значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов малой и большой мощности в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования. Как и в предыдущих случаях, пунктирной линией на рис. 5 показано граничное значение показателя энергетической эффективности ТН, выше которого определена область эффективного использования таких ТН.

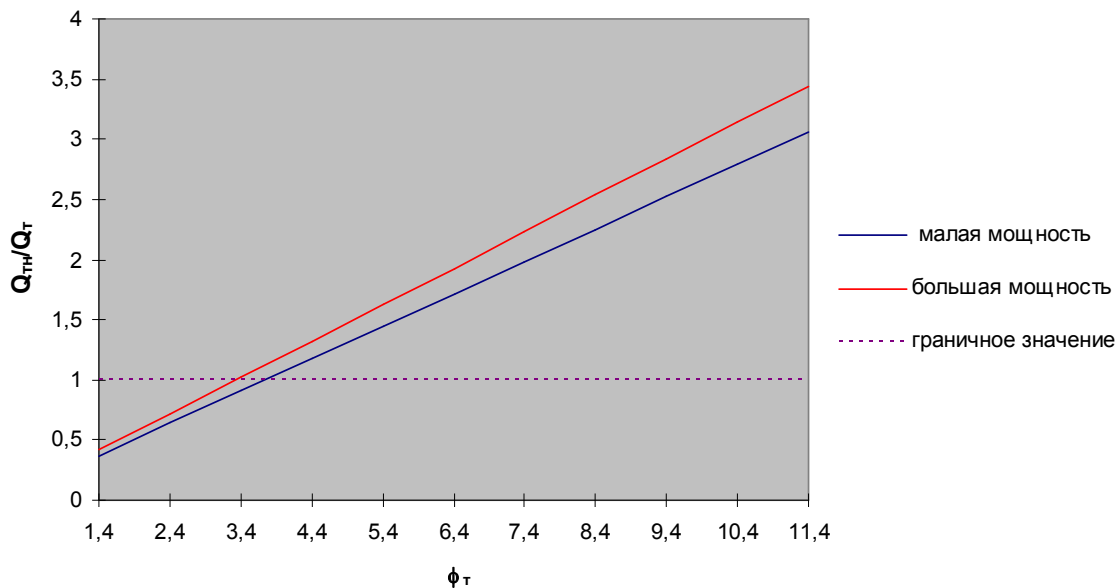


Рис. 5. Значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов малой и большой мощности в зависимости от теоретических значений коэффициента преобразования

Зависимости, показанные на рис. 5, позволяют определить минимальные теоретические значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида ТН является целесообразным.

На рис. 6 показаны значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов малой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования. Выше пунктирной линии определена область эффективного использования таких ТН.

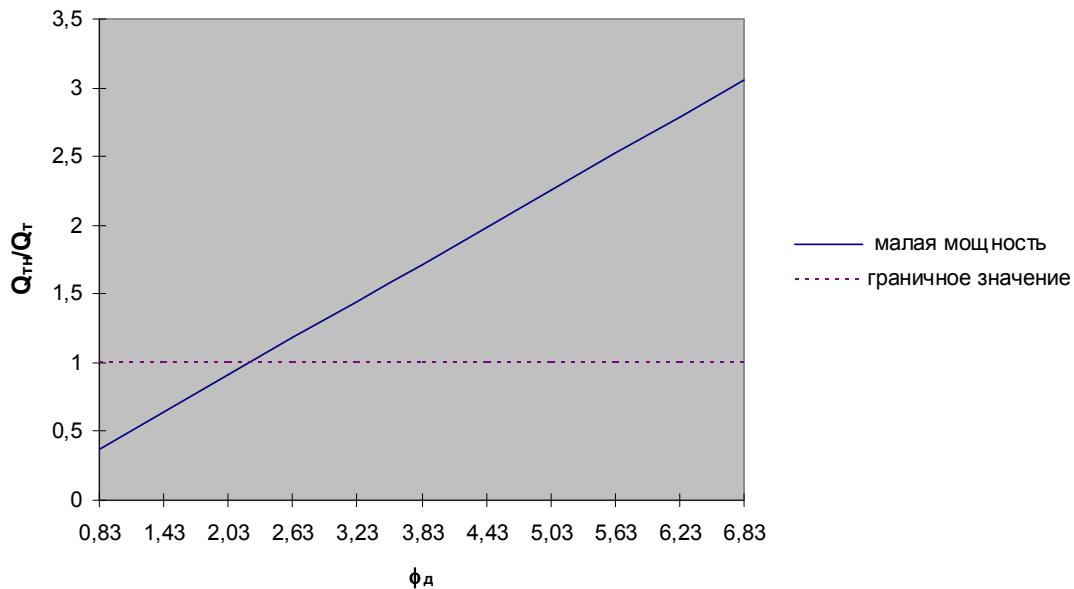


Рис. 6. Значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов малой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования

Значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования показаны на рис. 7. Как и в предыдущих случаях, пунктирной линией на рис. 7 показано граничное значение показателя энергетической эффективности ТН, выше которого определена область эффективного использования таких ТН.

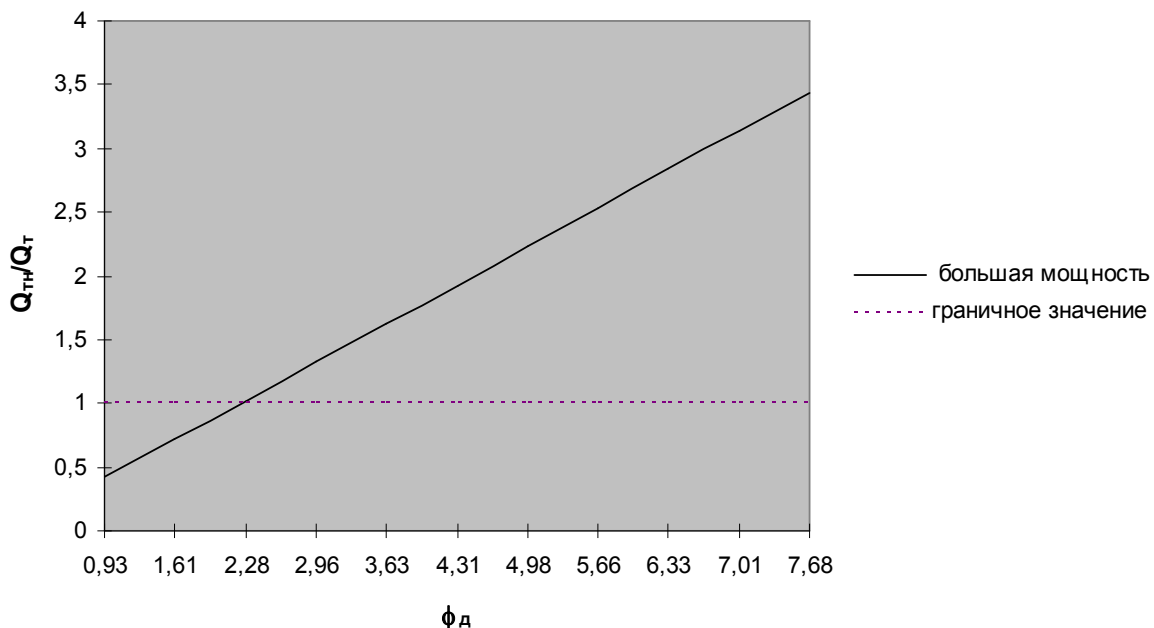


Рис. 7. Значения безразмерного показателя энергетической эффективности ТН с когенерационным приводом для тепловых насосов большой мощности в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования

Зависимости, показанные на рис. 6 и 7, позволяют определить минимальные действительные значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида ТН является целесообразным.

Выводы

Проведена оценка энергетической эффективности парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводом, определены эффективные действительные режимы работы ТН с электрическим и когенерационным приводом с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Проанализирована энергетическая эффективность системы "Источник приводной энергии ТН – ТН – потребитель теплоты от ТН" на примере парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами. Преимуществом такого подхода является учет потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии от электростанций разных типов к ТН с целью определения эффективных действительных режимов работы ТН с электрическим и когенерационным приводами.

Для парокомпрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами определены области их эффективного использования по безразмерному показателю энергетической эффективности. Анализ проведен для парокомпрессионных ТН малой и большой мощностей.

Предложенные на рис. 1 – 7 зависимости позволяют определить минимальные теоретические и действительные значения коэффициента преобразования ТН, выше которых применение определенного вида ТН является целесообразным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исанова А. В. Повышение эффективности и выбор рациональных параметров и режимов работы теплонасосных станций для систем отопления и горячего водоснабжения : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : спец. 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» / А. В. Исанова. – Воронеж, 2011. – 18 с.
2. Денисова А. Є. Аналіз парокомпресійного циклу теплонасосних станцій теплопостачання / А. Є. Денисова, В. Ю. Бірюк // Тр. Одес. політехн. ун-та. – 2012. – Вып. 1 (38). – С. 125 – 128.
3. Безродний М. К. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання / М. К. Безродний, Н. О. Притула // Вісник ВПІ. – 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. Петин Ю. М. Тепловые насосы / Ю. М. Петин, В. Е. Накоряков // Российский химический журнал. – 1999. – Т. 41, № 6. – С. 107 – 111.
6. Калнинь И. М. Техника низких температур на службе энергетики / И. М. Калнинь // Холодильное дело. – 1996. – № 1. – С. 26 – 29.
7. Елистратов С. Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов : дисс. ... доктора техн. наук : 01.04.14 / Елистратов Сергей Львович. – Новосибирск, 2010. – 383 с.
8. Енергетична стратегія України на період до 2030 року (Схвалена розпорядженням Кабінету міністрів України від 15 березня 2006 р.). Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. – Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog>.
9. Войтенко В. А. Порівняльний енергетичний аналіз впливу на навколишнє середовище транспортних засобів на електричній і бензиновій тязі / В. А. Войтенко // Електротехн. та комп'ютер. системи: наук.-техн. журн. – 2011. – №03 (79). – С. 116 – 118.
10. Тепловые и атомные электрические станции. Справочник / [Абрамов В. И., Бартоломей Г. Г., Бисярин А. Н. и др.] ; под. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
11. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

Остапенко Ольга Павловна – кандидат технических наук, доцент, 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.