

УДК 621.577:536

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П.

ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

Наиболее важной задачей современного теплоснабжения в Украине является снижение затрат потребления топлива (первичной энергии) за счет более рационального его использования. В настоящее время интенсивно развиваются способы получения тепла при помощи тепловых насосов (ТН). В первую очередь это объясняется высокой эффективностью производства тепла путем использования низкопотенциальных источников, которые имеют естественное или технологическое происхождение с температурой до 40 °С. При этом, независимо от типа ТН и его комплектации, на единицу потраченного исходного топлива можно получить в 1,5–4,5 больше тепла, чем при его традиционном сжигании.

Развитие ТН за рубежом и в странах Советского Союза достаточно полно изложено в монографиях [1,2] и работе [3], в которых отражено состояние и достижения на конец 80-х годов прошлого столетия. В настоящее время в большинстве развитых стран речь идет уже не о локальном применении ТН, а об их промышленном использовании в качестве источников теплоснабжения. Так, согласно данным [4,5], масштабы внедрения ТН в мире составляют:

- в Швеции 50 % отопления осуществляется за счет использования ТН;
- в Германии была предусмотрена дотация государства на установку ТН за каждый кВт установленной мощности;
- в Японии ежегодно производится около 3 млн. ТН;
- в США ежегодно производится около 1 млн. ТН;
- в Стокгольме 12 % отопления города обеспечивается ТН общей мощностью 320 МВт, которые используют теплоту сточных вод.

Интенсивное внедрение ТН, прежде всего, в системах отопления и кондиционирования привело не только к увеличению их сбыта [6], но и к значительному прогрессу в создании высокоэффективных теплонасосных установок (ТНУ). Достаточно сказать, что по расчетам швейцарской компании *Fordergemeinschaft Wärmepumpen (FWS)* использование ТН в стране экономит ежегодно ~ 140 млн. л легкого мазута, что составляет примерно 2 % общего потребления этого топлива в Швейцарии. Сбыт ТН в Германии и Австрии составил, например, в 1999 г. соответственно 4,7 тыс. и 1,9 тыс. шт., в Швейцарии – 6,5 тыс. Проведенный в [7] анализ рынка ТН в Германии показывает, что потребность в отоплении жилых и производственных помещений, составляющая 60 % от общей потребности в энергии, покрывается на 85 % за счет твердого топлива. В 2001 г. было продано 8125 ТН и утверждается, что с учетом требований к охране окружающей среды рынок ТН будет серьезно расширяться.

Согласно данным, объявленным на совещании по проекту Европейского сообщества *SHERPHA (Sustainable Heat and Energy for Heat Pumps Applications)*, европейские достижения в области внедрения ТН составляют:

- 4,5 млн. ТН установлено в Европе;
- ежегодный европейский рост сбыта ТН в среднем составляет 10-15%;
- установлено порядка 3 млн. обратимых ТН (нагревание / охлаждение):

- Греция, Испания и Италия обладают более чем 3 млн. обратимых ТН;
- в тех же странах число грунтовых ТН не превышает 500 единиц;
- 0,5 млн. грунтовых ТН установлено в Европе, в том числе:
- 176 тыс. единиц в Швеции (в среднем 3,27 ед. ТН /1000 жителей);
- 340 тыс. единиц в Австрии (0,37 ед./1000 жителей);
- 1 тыс. единиц в Польше.

Состояние рынка и перспективы его развития в азиатско-тихоокеанском регионе представлены в [8], где показано, что основной тенденцией в развитии ТН является совершенствование и наращивание выпуска обратимых ТН, работающих как для охлаждения, так и для отопления помещений.

Обзор и перспективы развития сорбционных ТН приведен в работе [9]. Подробно изложено состояние как фундаментальных исследований по термодинамическим циклам, так и практическое использование сорбционных ТН. Представлены данные о возможности повышения экономичности систем при использовании низкотемпературного отработанного тепла, особенно автомобильного. Указывается, что перспективными могут быть системы, работающие на парах $H_2O/LiBr$ и NH_3/H_2O . Для малых мощностей возможно создание компактных малогабаритных теплообменников, а для промышленных целей – системы с реверсивным режимом работы (теплотрансформеры).

Согласно прогнозам Мирового энергетического комитета (МИРЭК) к 2020 г. 75 % теплоснабжения (коммунального и производственного) в развитых странах будет осуществляться при помощи тепловых насосов. Разработка и производство ТН в мире достигло уже такого уровня, когда становится возможной реализация теплонасосного теплоснабжения в крупных городах с повышенной плотностью застройки, где нет мощных локальных источников низкопотенциального тепла типа промышленных стоков. В этих случаях может быть использовано тепло канализационных систем и вентиляции многоквартирных домов, либо другое бытовое тепло [10,11].

Безусловно, для успешного внедрения и эксплуатации ТН необходимо наличие постоянно действующих источников дешевой низкопотенциальной теплоты. Помимо природных источников в настоящее время как никогда актуален вопрос экономии топлива за счет использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), который на Украине принял формы общегосударственной проблемы. К ВЭР относят отходы технологических циклов промышленных предприятий, коммунальных, бытовых, жилых и других объектов.

Наиболее доступным источником низкопотенциальной теплоты является атмосферный воздух, который широко используется для малых квартирных ТН. Однако для крупных теплонасосных станций его применение не целесообразно и экономически невыгодно, так как требует использования в испарителе достаточно больших тепловых потоков. Другим естественным источником низкопотенциальной теплоты служат незамерзающие водоемы, например, Черное море, а также солнечная энергия, геотермальные воды и т.д. Теплонасосные установки, работающие на этих источниках, имеют достаточно широкое распространение за рубежом, а в странах, входивших в состав СССР, также имеются отработанные схемы и конструкции таких ТНУ.

Однако для крупных ТНУ главным источником низкопотенциальной теплоты служат тепловые отходы жизнедеятельности человека. При этом происходит истощение природных энергоресурсов и одновременно тепловое загрязнение биосферы. Так, по данным [12] до 1991 г. АЭС сбрасывали вместе с охлаждающей водой до 50–55 % энергии топлива, для чего их строили возле крупных водоемов, способных воспринять бросовую теплоту. Кроме этого, существует огромный поток оборотной воды с кругло-

годовой температурой 20–40 °С, которая не используется напрямую, а охлаждается в градирнях или других испарительных охладителях.

Главной целью настоящей статьи является попытка проанализировать возможности применения теплонасосных установок в сложившейся системе централизованного теплоснабжения и по мере возможности определить перспективные направления внедрения ТН в коммунальном хозяйстве страны и промышленности.

Значительная часть существующих в нашей стране систем централизованного теплоснабжения в качестве источников тепла используют теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), осуществляющие комбинированное производство тепловой и электрической энергии. Комбинированное производство тепла и электроэнергии, обеспечивая существенную экономию топлива, является одним из основных способов повышения эффективности систем энергоснабжения. Если имеется избыток электроэнергии от ГЭС, нежелателен дополнительный расход топлива или существует неблагоприятная экологическая обстановка, то комбинированное производство электроэнергии и тепла нецелесообразно. Тогда одним из наиболее рациональных способов повышения энергетической эффективности систем централизованного теплоснабжения является использование теплонасосных установок, которые отбирают тепло от низкопотенциального источника, например, от промышленных или бытовых стоков, и передают его более горячему теплоносителю, например, сетевой воде [13]. При этом затрачивается определенное количество механической или какой-либо другой высокопотенциальной энергии. Причем затраты топлива на производство этой энергии могут быть ниже затрат топлива в котельной, отпускающей такое же количество тепла.

Наиболее перспективными для эффективного использования ТНУ являются отопительная нагрузка и нагрузка горячего водоснабжения, когда тепло отпускается в виде горячей воды, имеющей относительно низкую температуру (например, по температурному графику 95/70 °С). В этих условиях ТНУ обеспечивает значительную экономию топлива. Однако нагрузка отопления зависит от температуры наружного воздуха и существенно изменяется во времени. Использование дорогостоящей ТНУ для покрытия пиковой части графика тепловой нагрузки, имеющей, как правило, малую продолжительность, является нерациональным. Эту часть тепла целесообразно производить с помощью более дешевого, хотя энергетически и менее эффективного, теплового источника [13].

Для привода компрессоров ТНУ компрессионного типа, работающих в системах централизованного теплоснабжения и имеющих достаточно большую механическую мощность (порядка нескольких мегаватт), целесообразно использовать газотурбинную установку (ГТУ), позволяющую плавно менять производительность компрессоров за счет равномерного изменения числа оборотов. При этом тепло уходящих газов газовых турбин используется для подогрева сетевой воды. Таким образом, весьма перспективной представляется комбинированная теплопроизводящая установка (КТУ), включающая газотурбинный агрегат, выхлопные газы которого поступают в дополнительную камеру сгорания (использующую в качестве окислителя кислород, содержащийся в этих газах, а при необходимости и кислород дополнительно нагнетаемого в камеру воздуха), водогрейный котел-утилизатор и компрессионный тепловой насос. Причем в котел-утилизатор поступает вода, нагретая в конденсаторе теплового насоса [13].

В литературе имеются противоречивые данные по оценке эффективности использования ТНУ в системах теплоснабжения [14]. Экономия топлива, например, в системах централизованного теплоснабжения коммунально-бытового сектора, оценивается от 25-35 % в [15,16] и до 70 % в [17,18]. Такое различие, как правило, объясняется

неодинаковыми условиями исследований, а именно, температурами подведенного к ТНУ и отведенного от него теплоносителя, а также температурой окружающей среды.

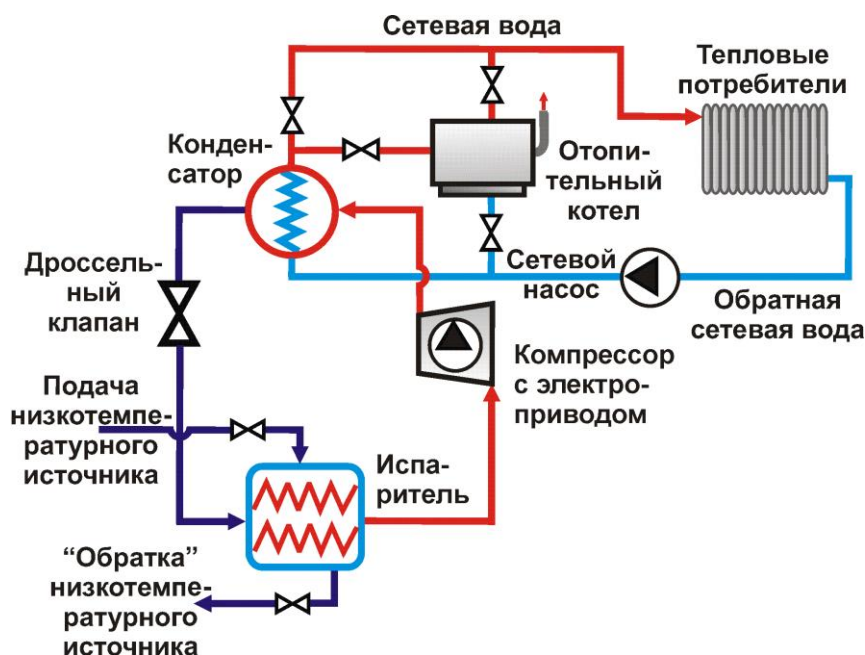


Рисунок 1 – Схема теплонасосной станции с водогрейным котлом

Проблеме адаптации и возможности использования ТН в системах централизованного теплоснабжения посвящены работы специалистов литовского энергетического института [19–21]. Отмечается, что для создания крупных ТНУ централизованного теплоснабжения необходимо иметь крупные источники низкопотенциального тепла и мощные источники электроэнергии для привода компрессора. Все это требует больших капитальных вложений, в том числе в тепловые передающие сети и систему электрообеспечения потребителей. По данным [20,21] производство теплоты компрессорными ТН составило бы 20–25 % от всей теплоты в зимнее время и до 85 % в летнее. При этом отмечается, что для сокращения срока окупаемости компрессорных ТН обязателен льготный тариф на электроэнергию порядка 50 %. В результате испытаний на стенде ТН «воздух-вода» с компрессором КХГ-14.-1 было выявлено, что замена теплоносителя R22 на озонобезопасный R134a позволяет ТН работать в широком диапазоне температур. Однако при этом наблюдается уменьшение тепловой производительности и потребляемой компрессором мощности до 20 %, с неизменным коэффициентом преобразования. Использование R407C позволяет работать ТН при низких температурах.

Как свидетельствует опыт стран с централизованным теплоснабжением (Швеции, Дании) наибольший эффект от внедрения ТНУ можно получить, применяя установки мощностью от 50 до 150 МВт. Фактически на таких станциях ТНУ заменяют некоторую долю работы водогрейных котлов, экономя при этом чуть ли не половину тепловой энергии сжигания топлива [22]. Рассмотрим схему теплонасосной станции, работающей совместно с водогрейным котлом в системе централизованного теплоснабжения, рис. 1.

Водогрейный или отопительный котел включается последовательно с конденсатором ТНУ. При этом теплонасосная станция обеспечивает нагрев заданного потребления сетевой воды в теплофикационной системе от температуры обратной сетевой воды

до температуры прямой сетевой воды. Распределение подогрева воды сети между ТНУ и подогревателем определяет общую эффективность работы теплонасосной станции. Очевидно, что для каждого температурного режима работы тепловой сети (для каждого соотношения температуры прямой и обратной сетевой воды), существует оптимальное распределение подогрева воды. Такая задача для ТНУ мощностью 60 МВт при значениях температур сетевой воды: 90, 100, 130 и 150 °С и температуры обратной воды от 40 до 70 °С была рассмотрена в [23]. В состав ТНС входили три водогрейных котла КВ-ГМ-10 с максимальной единичной мощностью 11,6 МВт и три аммиачных ТНУ на базе турбокомпрессорного агрегата АТФТ-10 [24] и испарительно-конденсационных агрегатов АИКТ-10 [24] с максимальной мощностью 11,6 МВт. В качестве низкотемпературного источника тепла использовалась сточная вода промышленного предприятия с температурой 25 °С, которая охлаждалась в испарителе до 17 °С. В результате математического моделирования и решения поставленной задачи авторы пришли к следующим выводам:

- применение ТНС на базе водогрейных котлов обеспечивает до 15 % экономии топлива, уменьшает затраты электроэнергии и количество вредных выбросов в атмосферу;
- оптимальные температуры подогрева сетевой воды в ТНУ зависят от температурного графика работы теплофикационной системы и составляют 73–80 °С;
- оптимальными режимами работы ТНС можно считать режимы с практически одинаковым распределением нагрузки между ТНУ и водогрейными котлами.

Разработка схем применения ТНУ в системах централизованного теплоснабжения проводилась достаточно давно как для открытой схемы теплоснабжения [25], так и для закрытой схемы [26]. В дальнейшем часть предложенных схем была частично реализована в той или иной мере в СССР, как единичные экспериментальные проекты.

Например, принципиальная схема ТНУ для закрытой системы теплоснабжения, которая составлена с учетом соответствующих схем водогрейных котельных, рис. 2, была предложена еще в монографии [1]. Совместное функционирование системы, с учетом работы водогрейных котлов, происходит следующим образом. Сетевая вода из обратной линии поступает в бак-аккумулятор обратной сетевой воды 12. Назначение этого бака состоит в выравнивании суточных колебаний температуры обратной воды из-за неравномерности потребления тепла на ГВС. Далее насосом 15 вода подается в охладители конденсата 3 и конденсаторы 2 тепловых насосов, которые подключены параллельно. После подогрева в конденсаторах вода поступает в бак-аккумулятор 13, с нагретой в ТНУ водой. Работа ТНС происходит по принудительному графику, смысл которого состоит в выравнивании суточного графика нагрузки энергосистемы. В бак-аккумулятор обратной сетевой воды 12 вода подается в течение нерабочего времени ТНУ, а в бак 13 закачивается горячая вода, которая получена на использовании «пропальной» или внепиковой электроэнергии.

Из бака накопителя горячей воды 13 вода сетевыми насосами 14 подается в пиковые котлы 6 и далее в подающую магистраль тепловой сети. От источника низкопотенциальной теплоты к испарителям 5 вода подается насосом 16.

Работа ТНС осуществляется на химически подготовленной воде. Подпиточная вода, компенсирующая утечки в тепловой сети, получается подготовкой сырой воды. Водопроводная (сырая) вода подается насосом 17, подогревается в водо-водяном теплообменнике 9, очищается в химводоочистке 10, затем, перед поступлением в вакуумный деаэратор 7, нагревается до максимально возможной температуры. Для этого поток химически подготовленной воды подается на теплообменники 11, последний из кото-

рых снабжается водой, нагретой в ТНУ. Другая часть очищенной воды нагревается в охладителе выпара 8. Деаэрированная вода, пройдя через теплообменник 11, поступает в бак-аккумулятор 12, куда также подается и греющая вода из теплообменника 9. Сетевая вода, которая поступает в котельные агрегаты, нагрета в ТНУ выше точки росы дымовых газов (50–60 °С при сжигании природного газа), что создает условия для предотвращения наружной коррозии поверхностей нагрева котлов. Поэтому рециркуляционные контуры с насосами 18 и регуляторами 19, предназначенные для поддержания минимально допустимой температуры на входе в котлы, при нормальной работе ТНС не используются. Они включаются в двух случаях: при автономной работе без ТНУ или при сжигании высокосернистого мазута, когда вода на входе в котлы должна иметь температуру не менее 100 °С.

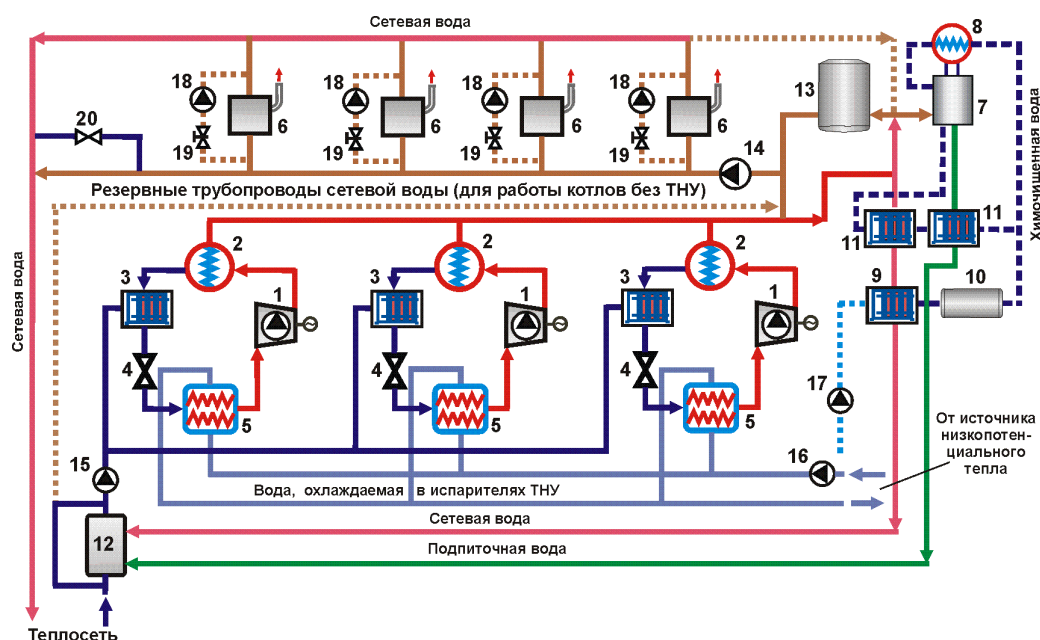


Рисунок 2 – Принципиальная тепловая схема ТНС для закрытой системы теплоснабжения:
 1 – компрессор теплового насоса с электроприводом; 2 – конденсатор; 3 – охладитель конденсата рабочего тела; 4 – дроссельный клапан; 5 – испаритель; 6 – водогрейный котел (пиковая водогрейная котельная); 7 – вакуумный деаэратор; 8 – охладитель выпара; 9 – подогреватель сырой воды; 10 – химводоочистка; 11 – подогреватель химводоочищенной воды; 12 – бак-аккумулятор обратной сетевой воды; 13 – бак-аккумулятор нагретой в ТНУ воды; 14 – сетевой насос; 15 – насос нагреваемой в ТНУ воды; 16 – насос охлаждаемой в ТНУ воды; 17 – подпиточный насос; 18 – рециркуляционный насос; 19 – регулятор температуры воды на входе в котел; 20 – регулятор температуры воды в подающей магистрали

Сам принцип действия теплового насоса, передающего больше полезной энергии, чем затрачивается на его привод, предполагает наличие дополнительного источника теплоты. Наибольший интерес применительно к тепловым насосам представляют такие источники теплоты, которые при помощи обычных средств утилизации тепловой энергии использовать очень трудно, дорого или вообще невозможно. Обычно такие источники энергии имеют температуру менее 40 °С. Для коммунального теплоснабжения городов с массовой застройкой, реально в качестве таких источников может быть использована обратная сетевая вода при температуре срезки графика (~30 °С), нагретый воздух жилых и бытовых помещений и канализационные сточные воды. Температура

обратной сетевой воды регламентирована поставщиком сетевого теплоносителя, а устройство тепловых насосов, работающих на отходящем нагретом воздухе, в настоящее время невозможно технически и экономически. Поэтому в системах централизованного теплоснабжения наиболее перспективным и выгодным является устройство крупных теплонасосных установок, использующих тепло сточных вод. Для микрорайонов массовой застройки такое решение в сочетании с пиковыми котельными будет технически и экономически оправданно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта SHERHRA, контракт № COLL-СТ-2004-500229.

Литература

1. Янтовский Е.И., Пустовалов Ю.В. Парокомпрессионные теплонасосные установки. – М.: Энергоиздат, 1982.– 143 с.
2. Янтовский Е.И., Левин Л.А. Промышленные тепловые насосы. – М.: Энергоатомиздат, 1989.– 124 с.
3. Проценко В.П. Тепловые насосы в капиталистических странах. Современное состояние и направление развития // Теплоэнергетика, 1988.– №3.– С.70–74.
4. Петин Ю.М., Накоряков В.Е. Тепловые насосы // Российский химический журнал, 1997.– XLI, №6.– С. 107–111.
5. Петин А.Ю. Тепловые насосы в теплоснабжении // Новости теплоснабжения, 2001.– 11.– С.42–49.
6. Сбыт тепловых насосов в Швейцарии, Германии и Австрии в 1998–1999 гг. // Heizungswärmepumpen-Markt. TAB: Techn. Ban.2000, №10. – P. 33–35.
7. Laue H.-J. Stand und Zukunft der Heizungswärmepumpe // Kalte- und Klimatechn., 2002.– 55, №9.– P. 56–61.
8. Тепловые насосы – состояние и тенденции развития в Азии и Тихоокеанском регионе / Heat pumps – status and trends in Asia and the Pacific. T. Machida // Int. J. Refrig., 2002. – 25, №4. – P.405–413.
9. Ziegler F. State of the art in sorption heat pumping and cooling technologies // Int. J. Refrig., 2002. – 25, №4. – P. 450–459.
10. Niewman M.E. Build. Syst. Des., 1977. – v.74,N8.– P. 36–40.
11. Dessagne J. Rev.gen.Froid., 1990.–v.80,N8.– P. 50–55.
12. Технологии и системы использования низкотемпературных и возобновляемых источников теплоты // Новости теплоснабжения, 2001.– №11.– С. 24–32.
13. Клер А.М., Маринченко А.Ю. Оптимизационные исследования комбинированной теплопроизводящей установки с тепловым насосом // Теплофизика и аэромеханика, 2003.– Т.10, №3.– С. 465–476.
14. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й., Куть Т.П., Федун А.Ю. Аналіз впливу температур на ефективність роботи теплонасосних установок // Вісник ВПІ, 2001.– №4. – С. 53–56.
15. Проценко В.П., Петров С.И., Ларкин Д.К. Анализ энергетической эффективности комбинированного источника теплоснабжения с теплонасосной установкой // Изв. вузов. Энергетика, 1991.–№7.– С. 81–87.
16. Пустовалов Ю.В. Исследование эффективности парокомпрессионных теплонасосных станций в системах энергоснабжения городов.– М.: ВНИИцентр, 1989.– 179 с.

17. Везиришвили О.Ш. Тепловые насосы и экономия топливно-энергетических ресурсов // Изв. вузов. Энергетика, 1984.– №7.– С. 61–65.
18. Везиришвили О.Ш. Энергетические характеристики парокомпрессионных теплонасосных установок // Изв. вузов. Энергетика, 1989.– №3.– С. 92–95.
19. Марцинаускас К., Бубялис Э., Шкема Р. Возможности использования тепловых насосов в системах централизованного теплоснабжения в крупных городах Литвы // Пром. теплотехника, 1999.– Т.21, №6.– С. 81–88.
20. Бубялис Э., Марцинаускас К., Шкема Р. Возможности и перспектива применения тепловых насосов в производстве низкопотенциальной теплоты // Пром. теплотехника, 2000.– Т.22, №3.– С. 53–56.
21. Бубялис Э., Шкема Р. Перспектива ретрофита R22 и энергетические характеристики теплового насоса на базе компрессора КХГ-14.-1 // Пром. теплотехника, 2001.– Т.23, №1–2.– С. 79–83.
22. Winkens H.P. Der Einsatz von Wärmepumpen in Fernwärmeversorgung // Fernwärme International. – 1984. – В.13.–№12.– S. 73–78.
23. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Аналіз енергетичної ефективності застосування тепло насосних установок у системах централізованого теплопостачання // Вісник ВПІ. Енергетика та електротехніка, 2002.– №4.– С. 52–55.
24. Методические указания по применению теплонасосных установок в системах теплоснабжения. – М.: ВНИПИЭНЕРГОПРОМ.– 1985.– 52 с.
25. Янговский Е.И., Пустовалов Ю.В., Янков В.С. Теплонасосные станции в энергетике // Теплоэнергетика, 1978.– №4.– С. 13–19.
26. Пустовалов Ю.В., Янков В.С., Янговский Е.И. Оптимизация работы теплонасосной станции по температуре воды после конденсаторов // Теплоэнергетика, 1979.– №6.– С. 69–71.

УДК 621.577:536

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Хавін Г.Л., Арсеньєва О.П.

ТЕПЛОВІ НАСОСИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Наведено огляд стану розвитку теплових насосів у промисловій і комунальній теплоенергетиці. Розглянута можливість використання теплових насосів у наявній структурі централізованого теплопостачання. Показано, що найбільш перспективним в умовах України, є сумісне використання теплонасосних установок з піковими котельними.