

УДК 621.22/.577:697.34

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Родионов Н.Г., Коротков В.В., Шитохина О.Г., Герасимова Н.С.

Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: k2kf@yandex.ru

В представленной статье исследуются вопросы применения законодательно разрешённых хладагентов для создания теплонасосных установок (ТНУ). Во введении отмечается, что потенциал и масштабы энергосбережения в России с помощью ТНУ огромны. И их необходимо рационально использовать, вызвав интерес у бизнеса и потребителей, при соответствующем стимулировании и поддержке государства. В статье приводится сопоставление эффективности циклов тепловых насосов с различными рабочими телами при одинаковых условиях сравнения. Показаны преимущества систем отопления помещений с тёплыми полами в сравнении с традиционными отопительными системами (с радиаторами отопления). Коэффициент трансформации теплоты при этом принципе отопления увеличивается более чем в 2 раза, почти в 3 раза уменьшается требуемая мощность для привода компрессора.

Ключевые слова: энергосбережение, тепловой насос, отопление и горячее водоснабжение зданий

A STUDY OF THE THERMODYNAMICS CHARACTERISTICS OF HEAT PUMPING UNITS FOR HEAT SUPPLY OF RESIDENTIAL AND INDUSTRIAL BUILDINGS AND STRUCTURES IN MODERN CONDITIONS

Rodionov N.G., Korotkov V.V., Shitokhina O.G., Gerasimova N.S.

Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, e-mail: k2kf@yandex.ru

In the presented article the problem of use of legislatively allowed refrigerants in the heat pump units (HPU) is studied. In introduction it is noted that the potential and scale of energy saving in Russia with the help of HPU are great. It needs to be rationally used, provoking interest in business and consumers, with the appropriate stimulation and support of the government. In the article the efficiency of heat pump cycles with different working bodies is compared under the same conditions. It is shown that heating systems for rooms with warm floors have advantages over traditional heating systems (heating radiators). The coefficient of transformation of heat in this heating principle increases by more than 2 times, the power consumption of the compressor is almost 3 times lower.

Keywords: energy saving, heat pump, heating and hot water supply of buildings

Общеизвестно, что тепловые насосные установки (ТНУ) широко используются в мире, в практике энергосбережения для целей отопления и горячего водоснабжения (ГВС) зданий и сооружений жилого и промышленного назначения, систем кондиционирования, технологических нужд предприятий. Суть применяемого принципа энергосбережения сводится к использованию низкопотенциальной энергии от возобновляемых источников энергии – воздуха, воды, земли. Количество действующих ТНУ в мире исчисляется десятками миллионов штук, которые различаются по конструктивному исполнению, мощности, применяемым рабочим телам, источникам низкопотенциальной теплоты и т.д. Особенно широко ТНУ распространены в США, Швеции, Норвегии, Японии, Франции, Германии, Великобритании, в других странах Западной Европы, там, где большое значение приобретают действия жителей и государств по энергосбережению. Ежегодный прирост ТНУ в мире исчисляется величи-

ной около 1 000 000 шт. Россия в этом отношении существенно отстала от технологически развитых стран в области ТНУ, в настоящее время речь идёт лишь о нескольких сотнях действующих ТНУ небольшой и средней мощности, выполненных в основном на базе ТНУ зарубежных производителей. Потенциал и масштабы энергосбережения в стране с помощью ТНУ огромны, особенно применительно к разнообразным климатическим и географическим условиям России. И его необходимо рационально использовать, вызвав интерес у бизнеса и потребителей, при соответствующем стимулировании и поддержке государства.

В статье анализируются основные технические вопросы, которые возникают при создании ТНУ на каких-либо жилых и производственных объектах. В практике наиболее распространены парокомпрессионные тепловые насосы (ТН). В них используют специальные рабочие тела (РТ), которые называют хладагентами. Не существует уни-

версальных РТ для ТНУ, пригодных для любых типов объектов, внешних природных условий, применяемых параметров, соответствующих требованиям пожарной и экологической безопасности для окружающей среды и т.д. [1]. Вероятно, что желаемые универсальные РТ не будут созданы в обозримом будущем. Главным вопросом при создании ТНУ является выбор хладагента для ТН, что определяет состав оборудования, конфигурацию и эксплуатационные характеристики установки. Этот выбор является компромиссным решением при комплексном анализе влияния многочисленных факторов.

Принцип работы ТНУ широко известен и в статье не рассматривается. Основное оборудование ТН: испаритель, компрессор с внешним приводом, конденсатор, дроссель. В герметичном контуре циркулирует хладагент. ТНУ снабжается ТН, теплообменниками – для отбора теплоты от низкотемпературного источника теплоты (НИТ), для отдачи теплоты к высокотемпературному источнику теплоты (ВИТ) потребителя, автоматической системой управления. Образно говоря, ТНУ работает по принципу «холодильник наоборот». ТНУ может работать в качестве кондиционера, при этом реверс потока РТ в ТН переводит ТНУ из режима теплонасосного в холодильный. Последнее качество в техническом отношении проще реализовать для ТНУ типа «воздух – воздух».

В настоящее время на практике применяют разнообразные хладагенты. В зависимости от наличия атомов хлора или фтора в РТ и воздействия на озоновый слой в атмосфере Земли их классифицируют: HCFC (гидрохлорфторуглероды); CFC (хлорфторуглероды); HFC (гидрофторуглероды); (HC) простые углеводороды и природные хладагенты. Основные группы используемых хладагентов [1–5]:

- Хладагенты с высокой озоноразрушающей активностью – это хлорфторуглероды R11, R12, R13, R113, R114, R115, R502, R503, R12B1, R13B1. Их использование в мире запрещено для разработок новых объектов. Они постепенно выводятся из обращения в соответствии с международными соглашениями.

- Хладагенты с низкой озоноразрушающей активностью – это гидрохлорфторуглероды R21, R22, R141b, R142b, R123, R124 и др. Применение их в промышленно развитых странах ограничено сроком до 2020 г., а в развивающихся странах – до 2040 г.

- Хладагенты озонобезопасные, – некоторые фторуглероды (FC), гидрофторуглероды (HFC) и др.: хладагенты R134, R134a,

R152a, R143a, R125, R32, R23, R218, R116, RC318 и др.

- Простые углеводороды (HC) и природные хладагенты озонобезопасные – R290, R600, R600a, R717, R744 и др. Они являются перспективными РТ для применения в холодильной технике и ТНУ, несмотря на недостатки некоторых из них в пожароопасном отношении, токсичности, коррозионном разрушении деталей из меди и её сплавов (последнее касается аммиака R717).

С учётом действующих ограничений на использование хладагентов выбор законодательно разрешённых рабочих тел для ТН существенно ограничен – можно применять только простые углеводороды и природные хладагенты, а также некоторые виды озонобезопасных хладагентов.

Теплофизические характеристики РТ должны быть пригодны для создания ТНУ. Рассмотрим для одинаковых условий сравнения термодинамические показатели ТН, выполняемых с различными РТ. Для анализа выберем хладагенты, либо уже широко применяемые в холодильной технике и для различных видов ТНУ, либо перспективные для новых проектов ТНУ. А именно: бутан R600; пропан R290; фреон 134a (изомеры тетрафторэтана); фреон R152a (дифлюорэтан); переходная смесь – фреон R401A (R22/152a/124 53/13/34%). Распространённый фреон R410a (смесь R32/125 50/50%) широко применяется для ТН типа «воздух – воздух», «воздух – вода», но до температур ВИТ не более 60 °С. Смеси веществ в фреонах (зеотропные и азеотропные) позволяют работать ТН на «скользящих» параметрах, т.е. при различных температурах кипения и конденсации компонент в составе смеси (температурный глайд), что расширяет эксплуатационные возможности ТНУ.

При выборе конкретного РТ необходимо учитывать назначение ТНУ, параметры НИТ и ВИТ, так как это существенно влияет на конструктивные решения ТНУ, а также на коммерческую привлекательность проекта [4, 6]. При применении ТНУ для отопления потребителям необходимо понимать, что ТН в большей степени оправдывает себя в хорошо утепленном здании, с тепловыми потерями не более 80 Вт/м². (Чем теплее дом, тем больше выгода для потребителя, тем меньше «отопливается» атмосферный воздух на улице.)

Назначение ТНУ и виды НИТ

Как известно, в ТНУ происходит процесс переноса теплоты от НИТ к ВИТ, в результате осуществления обратного цикла с потреблением дополнительной энергии (механической работы для привода компрессора) от

внешнего источника. Самое важное свойство ТНУ – за счёт отвода теплоты от НИТ и выполнения обратного цикла к ВИТ поступает значительно большая тепловая энергия, чем энергия, затраченная для привода компрессора. Отношение тепловой энергии, получаемой потребителем в ВИТ, к механической работе привода компрессора оценивается коэффициентом трансформации теплоты в ТНУ, который для реализованных ТНУ может быть в пределах 2...6 и более.

В качестве НИТ могут быть использованы разнообразные природные или техногенные среды: атмосферный воздух, отработанные отводимые газы; вода (подземные воды, поверхностные воды – реки, озёра, моря, термальные воды, производственные сбросы теплоносителей и т.п.); грунты (почва, земля на достаточной глубине и т.п.).

Для ТНУ небольшой мощности в качестве НИТ обычно служит атмосферный или отводимый воздух, почва на сравнительно небольшой глубине, подпочвенные воды.

Диапазон изменения температуры воздуха для работы ТНУ достаточно широк. Серийные ТНУ воздушного типа способны работать при низкой температуре воздуха – около минус 25...30 °С. При более низких температурах воздуха использование ТНУ неэффективно либо технически трудно реализуемо. Требуется иметь дополнительное оборудование для отопительных целей в очень холодное время зимой, например электрообогревательные приборы. Надёжная работа воздушных ТНУ зависит от влажности воздуха. При отрицательных температурах и высокой влажности воздуха может происходить обмерзание теплообменных поверхностей у испарителя ТН, ухудшение теплопередачи от воздуха (НИТ) к РТ в испарителе. ТНУ типа «воздух – воздух» являются наиболее простыми в конструктивном исполнении, наименее дорогими, удобными в эксплуатации, полностью автоматизированными для работы и широко распространёнными в мире. В мире также широко применяют ТНУ типа «воздух – вода», у которых повышена мощность и уменьшены габариты теплообменников ВИТ, по сравнению с типом «воздух – воздух».

Температуры почв и подпочвенных вод зависят от географического расположения региона. На небольшой глубине (не более 5...8 м) в большинстве регионов России температура почвы достаточно стабильна и в зимний период времени составляет + 4...10 °С, что приемлемо для создания ТНУ. С увеличением расстояния от поверхности земли температура почвы возрастает. Конструкция теплообменника НИТ может

быть горизонтального или вертикального типа. Следует учитывать большую стоимость работ по сооружению водозабора, слива подпочвенных вод, а также вопросы получения разрешения на их использование от местной администрации. Охлаждение почвы при горизонтальной схеме размещения теплообменников НИТ снижает её пригодность для произрастания сельскохозяйственных культур, деревьев, кустарников и т.п.

Вода в открытых поверхностных НИТ – реках, озёрах в зимний период имеет довольно низкую температуру, на глубине 4...6 м около + 3...4 °С. В подавляющем большинстве регионов России зеркало поверхности рек и озёр покрывается льдом. Охлаждение воды при работе ТНУ будет приводить к локальному увеличению толщины льда. При неблагоприятных условиях на наружной поверхности теплообменника НИТ может образоваться лёд, что ухудшает теплопередачу от воды к циркулирующему теплоносителю.

В ТНУ средней и большой мощности, как правило, используют воды различных источников и грунты на достаточно больших глубинах. НИТ для мощных тепловых насосов может быть морская вода, грунтовая вода из источника большой производительности, термальные воды, сбросы тёплых промышленных стоков и т.д. Для морских вод в России характерны стабильные температуры порядка + 5...8 °С на глубинах более 25 м. Морская вода, в зависимости от концентрации солей, замерзает при температуре около –4 °С, что упрощает условия для работы теплообменников НИТ. В мощных ТНУ для НИТ используют грунты, теплота к циркулирующему теплоносителю отбирается из скважин глубиной 100...200 м и более. С течением достаточно длительного времени отбор теплоты от грунта стабилизируется и температура НИТ становится практически постоянной. Стоимость буровых работ, обустройства скважин, велика, что увеличивает срок окупаемости инвестиций в проект ТНУ.

Требования к ВИТ

В конденсаторе ТНУ при конденсации паров РТ выделяется теплота, которая передаётся к теплоносителю ВИТ, в качестве которого может быть воздух, вода либо специальные органические жидкости. Отопительные системы в жилых домах, производственных зданиях и сооружениях могут выполняться по различным принципиальным схемам. В многоквартирных домах используют обычно горячую воду от котельных, либо от ТЭЦ. Температура прямой и обратной воды для отопительных целей регулируется в соответствии со специальными

температурными графиками, в зависимости от температуры атмосферного воздуха. Система регулирования температуры сетевой воды в системе теплоснабжения может быть количественной или качественной. (При количественном регулировании расход воды переменный, температура воды постоянная. Качественный принцип регулирования связан с изменением температуры воды, но расход её постоянный.) В России принят качественный принцип регулирования температуры воды для отопления. В большинстве зарубежных стран используют количественное регулирование в системах отопления, так как этот принцип имеет ряд преимуществ для энергосбережения и удобства эксплуатации. В рамках настоящей статьи эти вопросы не рассматриваются.

Существуют нормы для проектирования и эксплуатации систем теплоснабжения, источников теплоты, тепловых сетей для транспортировки горячей воды к потребителям. Для традиционных систем отопления с наружными радиаторами рекомендуется выполнять подачу теплоты с температурой воды по графику 90/70 °С или 115/70 °С. Во многих проектах новостроек могут быть тепловые схемы, выполненные по графику 80/60 °С. Проектная схема теплоснабжения подлежит утверждению в специализированных организациях. В промышленном производстве требования к качеству и температуре горячей воды могут быть разнообразными, в зависимости от вида технологических процессов, температура воды может быть в пределах +10...100 °С и более.

Нормативный режим подачи горячей воды для ГВС не должен превышать 75 °С. Теплосеть централизованной системы ГВС с водоразбором подаёт воду потребителям при температуре 60 °С. Правилами предусмотрено создавать системы ГВС с подачей воды до +37 °С в школы, детдома, детские сады, некоторые виды лечебных и социальных учреждений. Следует специально отметить важное обстоятельство – для уничтожения микробов, развивающихся в воде, требуется периодическая промывка тепловых сетей горячей водой с температурой выше +60 °С, в соответствии с санитарными нормами и правилами.

В последние годы в мировой практике теплоснабжения зданий и сооружений существует тенденция отказа от традиционных радиаторов отопления и переход на обустройство тёплых полов и тёплых стеновых панелей. Ресурс тёплых полов превышает полвека. Этот способ позволяет получить более комфортные условия в части равномерности поля температур в объёме помещения, а также применять греющий тепло-

носитель с температурой порядка 40–50 °С, в зависимости от вида покрытия поверхности теплового пола, а также от назначения помещения. По европейским нормативам, например, комфортная температура теплого водяного пола составляет: 21 °С на ковровом покрытии, на деревянном полу 24 °С, под кафель 26 °С, для паркета 30 °С, для линолеума 27 °С. Допустимая температура воздуха в помещениях различных категорий определена в СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». Максимальная температура водяного теплого пола не должна превышать 26 °С в помещениях с постоянным пребыванием людей.

К температуре теплоносителя в контуре ВИТ предъявляются следующие требования:

- 90/70 °С (115/70 °С, возможно 80/60 °С) для прямой и обратной сетевой воды в традиционных системах отопления объектов, с качественным регулированием по температурному графику;

- 60...75 °С на входе, для типовых систем ГВС, с водоразбором;

- 40...50 °С на входе, для систем отопления объектов с тёплыми полами.

Сопоставление РТ для ТН

Для решения вопросов выбора вида РТ для ТН выполним ориентировочные расчёты, с использованием тепловых диаграмм $i - \lg p$ [3], приняв внешние условия, одинаковые для всех сопоставляемых типов установок. Рассматриваются вышеуказанные хладагенты, применяемые в холодильной технике, которые в принципе могут быть использованы для создания ТНУ. Предварительный анализ показал неприемлемость простых хладагентов R717 (аммиак) и R744 (диоксид углерода) в ТНУ для систем теплоснабжения с качественным регулированием при температуре сетевой воды 90/70 °С в теплообменнике ВИТ, так как процесс конденсации пара РТ происходит в области перегретого пара. (При количественном регулировании системы теплоснабжения, где температура РТ на выходе из конденсатора порядка 20...30 °С, для ряда проектов эти хладагенты могут быть применены.) Принятые условия сопоставления ТН: тип ТНУ «вода – вода»; тепловая мощность, переданная к ВИТ, составляет 5 МВт; температура теплоносителя в теплообменнике НИТ +8 °С (грунт, вода); Вариант 1. Температура теплоносителя в теплообменнике ВИТ на входе/выходе 90/70 °С; Вариант 2. Температура теплоносителя в теплообменнике ВИТ на входе/выходе 45/25 °С; разница температур при теплопередаче между РТ в ТН и в теплообменниках НИТ и ВИТ 5 °С; на входе РТ в компрессор нет перегрева пара

хладагента (если позволяет форма верхней пограничной кривой хладагента, при сжатии паров в компрессоре не должна образовываться жидкая фаза РТ); адиабатный КПД компрессора 0,85; пренебрегаем гидравлическими потерями в теплообменных аппаратах, трубопроводах, в ТН; конструктивные и коммерческие решения ТНУ не рассматриваются, считается, что они могут быть реализованы в проектах.

В табл. 1 приведены оценочные результаты термодинамических расчётов циклов ТН, для варианта 1 (система с традиционными радиаторами), в табл. 2 – для варианта 2 (тёплые полы).

Расчёты при варьировании тепловой мощности (0,2...30 МВт), передаваемой к потребителю в теплообменнике ВИТ приведены только для одного из выбранных РТ. Для наглядности и выявления влияния изменений тепловой мощности ТН, передаваемой в ВИТ потребителю теплоты на

характеристики ТН, в табл. 3 приведены результаты расчётов термодинамических параметров цикла ТН с распространённым рабочим телом R134a, при заданных условиях сопоставления. Параметры РТ в контуре ТН и внешние условия НИТ и ВИТ соответствуют данным в табл. 2, вариант отопления с температурами 45/25 °С (тёплый пол), а также данным в табл. 1, вариант отопления 90/70 °С (радиаторы отопления).

Представляет практический интерес применение ТНУ для низких температур НИТ порядка –10...–30 °С. Для примера в табл. 4 приведены основные результаты расчёта цикла ТН для распространённого в холодильной технике РТ типа R134a, при низких температурах НИТ (например, мёрзлый грунт). В теплообменнике НИТ циркулирует незамерзающая жидкость. ВИТ при этом работает по температурному графику 45/25 °С и обеспечивает потребителю тепловую мощность 5 МВт.

Таблица 1

Вариант 1. (90/70 °С). Термодинамические параметры ТН с различными видами РТ

№ п/п	Параметр, размерность	Тип хладагента				
		R600	R290	R134a	R401A	R152a
1	Критическая температура, °С	150,8	96,67	101,1	108,01	113,5
2	Критическое давление, бар	37,18	42,36	40,67	46,04	44,95
3	Температура РТ в испарителе ТН, °С	+3				
4	Давление РТ в испарителе ТН, бар	1,15	5	3,1	3,05	2,9
5	Давление РТ в конденсаторе ТН, бар	14	29	26,5	21	19
6	Секундный расход РТ, кг/с	15,528	18,727	36,765	32,051	*)
7	Удельная работа компрессора, кДж/кг	124	112	52	51	
8	Мощность компрессора, кВт	1 925	2 097	1 912	1 635	
9	Теплота, отбираемая у НИТ, кВт	3 075	2 903	3 088	3365	
10	Теплота, передаваемая к ВИТ, кВт	5 000				
11	Коэффициент трансформации теплоты	2,597	2,384	2,615	3,058	

Примечание. *) Для температурного графика 90/70 °С цикл не реализуется. Процесс конденсации пара происходит в области перегретого пара. Для варианта 2 с температурным графиком 45/25 °С хладагент R152a используется эффективно.

Таблица 2

Вариант 2. (45/25 °С). Термодинамические параметры ТН с различными видами РТ

№ п/п	Параметр, размерность	Тип хладагента				
		R600	R290	R134a	R401A	R152a
1	Температура РТ в испарителе ТН, °С	+3				
2	Давление РТ в испарителе ТН, бар	1,15	5	3,1	3,05	2,9
3	Давление РТ в конденсаторе ТН, бар	4,99	14	11,5	10,5	8
4	Секундный расход РТ, кг/с	12,987	14,006	26,738	25,252	16,611
5	Удельная работа компрессора, кДж/кг	69	55	28	27	36
6	Мощность компрессора, кВт	896	770	749	682	598
7	Теплота, отбираемая у НИТ, кВт	4 104	4 230	4 251	4 318	4402
8	Теплота, передаваемая к ВИТ, кВт	5 000				
9	Коэффициент трансформации теплоты	5,58	6,494	6,676	7,331	8,361

Таблица 3

Основные параметры работы ТНУ при варьировании тепловой мощности ВИТ

№ п/п	Параметр, размерность	Тепловая мощность для потребителя ВИТ, кВт					
		200	500	1 000	10 000	20 000	30 000
1	Площадь отапливаемых помещений (по нормативу 100 Вт/м²), м²	2 000	5 000	10 000	100 000	200 000	300 000
2	Количество отапливаемых квартир, каждая площадью 100 м²	20	50	100	1 000	2 000	3 000
Вариант отопления с температурным графиком 45/25°C (тёплые полы)							
3	Теплота, отведённая от НИТ, кВт	170	425	850	8 500	17 000	25 500
4	Расход РТ в контуре ТН, кг/с	1,068	2,67	5,34	53,4	106,8	160,2
5	Мощность, требуемая для привода ком-прессора, кВт	30	75	150	1 500	3 000	4 500
6	Коэффициент трансформации теплоты в ТН	6,676					
Вариант отопления с температурным графиком 90/70°C (радиаторы отопления)							
7	Теплота, отведённая от НИТ, кВт	123	308	616	6 160	12 320	18 480
8	Расход РТ в контуре ТН, кг/с	1,471	3,677	7,354	73,54	147,08	220,62
9	Мощность, требуемая для привода ком-прессора, кВт	76,48	191,2	382,4	3 824	7 648	11 472
10	Коэффициент трансформации теплоты в ТН	2,615					

Таблица 4

(45/25 °С). Параметры циклов ТН с R134a при низких температурах НИТ

№ п/п	Параметр, размерность	Температура НИТ, °С		
		–30	–20	–10
1	Температура РТ в испарителе ТН, °С	–25	–15	–5
2	Давление РТ в испарителе ТН, бар	1,1	1,35	2,3
3	Давление РТ в конденсаторе ТН, бар	7,8	9	10,3
4	Секундный расход РТ, кг/с	25,76	25,9	25,91
5	Удельная работа компрессора, кДж/кг	51,01	46,02	37,98
6	Мощность компрессора, кВт	1 314	1 192	984
7	Теплота, отбираемая у НИТ, кВт	3 686	3 808	4016
8	Теплота, передаваемая к ВИТ, кВт	5 000		
9	Коэффициент трансформации теплоты	3,879	4,195	5,081

Выводы

Из анализа результатов расчёта циклов ТН можно сделать следующие выводы.

1. Использование R152a для систем теплоснабжения по температурному графику 90/70 °С неприемлемо из-за окончания процесса конденсации пара в конденсаторе ТН в области перегретого пара. Но оно возможно для систем с температурным графиком 45/25 °С, при этом обеспечивается высокий коэффициент трансформации теплоты до 8,6.

2. При работе традиционных систем отопления по графику 90/70 °С, с наружными радиаторами, обеспечивается коэффициент трансформации теплоты порядка 2,6...3. Применение температурного графика 45/25 °С, для отопления с тёплым полом, позволяет существенно улучшить теплотехнические показатели ТНУ. При этом коэффициент трансформации теплоты увеличивается более чем в два раза (5,6...8,3), почти в три раза снижается потребная мощность

привода компрессора, а также заметно уменьшается расход РТ в контуре ТН.

3. ТНУ с хладагентом R134a обеспечивает высокую эффективность работы, в диапазоне температур –10...–30 °С коэффициент трансформации теплоты составляет 5,1...3,9.

Список литературы

1. Малафеев И.И., Ильин Г.А., Крысанов К.С. Рабочие тела высокотемпературных тепловых насосов. Современное состояние вопроса и направления развития // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 3, № 3 (21). – С. 53–58.
2. Хладагенты и проблемы экологической безопасности окружающей среды // ООО «ИЭТ – Геотерм» [Электронный ресурс]. – URL: www.teplovoy-nasos.com (дата обращения: 18.11.2017).
3. ООО «Ависанко». Термодинамические диаграммы i – lg p для хладагентов. – М.: Ависанко, 2003. – 50 с.
4. Цветков О.Б. Холодильные агенты: Монография. 2-е изд. – СПб.: СПбГУ-НИИТ, 2004. – 216 с.
5. Озонобезопасные хладагенты / О.Б. Цветков, А.В. Бараненко, Лаптев и др. // НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2014. – № 3. – С. 98–111.
6. Васильев Г.П., Шилкин Н.В. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах // ЭСКО. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» [Электронный ресурс]. – URL: http://esco.co.ua/journal/2008_4/art189.htm (дата обращения: 18.11.2017).