

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

*Зубатый А.Л., Журавлев А.А., Шит М.Л.
Институт Энергетики Академии Наук Молдовы*

ВВЕДЕНИЕ

Республика Молдова не обладает собственным ископаемым топливом, и поэтому энергоресурсы импортируются в Республику Молдова практически полностью. Прогнозируется постоянный рост потребления энергии. В 2010 г. общий расход первичных энергоресурсов, рассчитанный на основании показателей социально-экономического развития Р.Молдова, даже при прогнозируемом сокращении удельных расходов энергии, составит 116-145 PJ (2,8-3,5 млн. т.н.э. или 4,0-5,0 млн. т.у.т).

Проведенные Институтом Энергетики АН РМ исследования по анализу работы основных поставщиков энергии в рамках разработки Стратегии теплоснабжения г. Кишинева [1] показали, что основным потребителем импортируемого природного газа в городе (более 40%) являются предприятия энергетики: теплоэлектроцентрали и районные котельные. При этом значительное количество теплотворной способности топлива недоиспользуется и в виде низкопотенциального тепла поступает в атмосферу, одновременно ухудшая экологическую обстановку и способствуя «глобальному потеплению».

Использование теплотворной способности топлива даже на наиболее оснащенной теплоэлектроцентралей СЕТ №2 составляет в отопительный сезон, когда она работает в теплофикационном режиме, 66%, а в межотопительный сезон, когда она работает, в основном, в конденсационном режиме менее 40%. Анализ показал, что потребитель получает из 100% теплотворной способности топлива приблизительно 25% теплотворной способности топлива в виде тепловой энергии и 17% в виде электрической энергии. При нынешней стоимости природного газа стоимость электроэнергии, вырабатываемой даже в отопительный период на ТЭЦ, значительно превышает стоимость покупной электроэнергии из Украины. Это позволяет рассматривать

альтернативные способы поставки тепловой энергии потребителю.

На XXXIII конгрессе Международной ассоциации экспертов ЕС по теплоснабжению "Euroheat and Power", прошедшем в 2007 году, были приведены основные направления развития теплоснабжения в ЕС:

- Комбинированная выработка электроэнергии и централизованное теплоснабжение и холодоснабжение;
- использование сбросного тепла и возобновляемых источников энергии в целях повышения энергоэффективности;
- создание международных консорциумов для увеличения внедрения инноваций и дальнейшего развития теплофикации.

Директивой ЕС 8-9 марта 2007 г. (<http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/127064.htm>) предписано увеличение энергоэффективности (уменьшение удельного потребления энергии на 20% к 2020 г.), уменьшение выбросов парниковых газов (уменьшение выбросов CO₂ на 20-30% к 2020 г.), увеличение доли возобновляемых источников энергии на 20% к 2020 г.

В г. Кишиневе для поставки потребителям тепла применяются системы централизованного теплоснабжения (СЦТ). Такие системы широко используются в СНГ и во многих странах Восточной Европы, а также и в некоторых странах Западной Европы. Централизованная система теплоснабжения наряду с другими преимуществами позволяет переходить и использовать любые виды топлива, что, как показала ситуация января 2009 года, повышает энергетическую безопасность при различных политических и энергетических кризисах.

В то же время при работе децентрализованной и автономной систем отопления, в которых наряду с отсутствием потерь при транспортировании тепловой энергии от источника до потребителя, потребитель сам осуществляет менеджмент системы и определяет параметры отопления в необходимом диапазоне. В результате в мун. Кишинэу конкуренцию между менеджментом

ЦТ и менеджментом автономного отопления (АО - ДЦТ) централизованное отопление проигрывает.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Известно, что применение ЦТ, наряду с большими известными преимуществами, особенно при использовании когенерации, из-за высоких температур теплоносителя (сетевой воды) и качественного регулирования подачи тепла приводит к существенным его потерям. Настоящее исследование посвящено повышению эффективности работы ЦТ и получению дополнительных преимуществ потребителями с помощью тепловых насосов (ТН), что повысит ее конкурентоспособность при сравнении с другими системами теплоснабжения.

Обосновывается это тем, что коэффициент преобразования ТН всегда больше коэффициента преобразования котла $\mu_m \gg \mu_k$ и это дает определенный энергетический эффект.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Коэффициент трансформации тепла

Непосредственное сжигание какого-либо топлива для целей отопления, с точки зрения термодинамики, является процессом с необратимыми потерями. Это связано с тем, что тепло, выделяемое при сгорании, имеет значительно более высокую температуру, чем теплоноситель, используемый для отопления. В случае, если это тепло с температурой, выделяемой при горении (T_g), будет передано теплоносителю с температурой, применяемой для отопления зданий (T_{om}) без совершения работы и возникают вышеуказанные потери.

Работа, совершенная между теплом с температурой T_g и теплом с температурой T_{om} равна той, которая потребовалась бы для переноса тепла обратно с низкого на высокий температурный уровень. Такую работу и выполняет тепловой насос (ТН).

В термодинамической системе, в которой используются прямой и обратный цикл Карно существует соотношение для термодинамического коэффициента отопления, названного авторами [2] коэффициентом трансформации

тепла M . Коэффициент M можно выразить через температуры:

$$M = \frac{T_g - T_c}{T_g} \cdot \frac{T_{om}}{T_{om} - T_c} \quad 1)$$

где T_c – температура среды, к которой отводится тепло в цикле.

Первая часть дроби характеризует работу теплового двигателя, а вторая - теплового насоса. Из этого уравнения следует, что M для теплового двигателя может быть максимально равным 1, а M теплового насоса всегда выше 1, его минимальная величина равна 1. M системы равно 1 при $T_g = T_{om}$, а если $T_g > T_{om}$, то такая система с ТН имеет $M > 1$.

В общем случае совмещение обратимых циклов (прямого и обратного) делают систему наиболее эффективной (2). Для такой системы коэффициент трансформации:

$$M_0 = \eta_0 \cdot \mu_0 \quad 2)$$

где η_0 - термический коэффициент полезного действия прямого обобщенного цикла;
 μ_0 - коэффициент обратного обобщенного цикла.

Полный термодинамический эффект системы будет выражен действительным коэффициентом M_d .

$$(M_d) = \eta_0 \cdot \mu_0 \cdot \eta_n \cdot \eta_m \cdot \eta_x \quad (3)$$

Следовательно, действительный коэффициент трансформации тепла M_d будет равен M_0 , умноженному на коэффициенты потерь, где η_n – коэффициент потерь прямого кругового цикла,

η_m – коэффициент потерь при передаче энергии от прямого к обратному циклу,
 η_x – коэффициент потерь обратного цикла.

Отопление с использованием теплового насоса, работающего по обратному круговому циклу эффективно только при коэффициенте трансформации тепла M_d больше, чем коэффициент потерь при обычном отоплении.

В настоящей работе рассматривается возможность возвращения к полезному

использованию части тепла, уходящего в окружающую среду и теряемого при передаче от «горячих» источников «холодным» с помощью теплонасосных технологий.

1.2. Использование тепловых насосов в системе централизованного отопления

На теплоэлектростанции для получения электрической и тепловой энергии осуществляется прямой паросиловой цикл, в результате которого вырабатывается электрическая энергия и осуществляется теплофикация. Нами с использованием параметров температурного режима работы теплоэлектростанции №2 г. Кишинева показано качественное изменение величины коэффициента трансформации тепла M в прямом и обратном круговом идеальных циклах Карно (рис.1 и рис.2), также результат совмещения этих циклов в одной системе отопления (рис.3).

Таким образом, можно предположить, что и в действительном цикле со снижением температуры отопления во всем диапазоне наружных температур в районе г. Кишинева при сжигании топлива в топке котельного агрегата, выработке электрической энергии турбогенератором и использовании теплового насоса коэффициент трансформации тепла будет расти. Это позволяет в принципе использовать схему с размещением теплового насоса в системе. Известно, что температура воздуха в замкнутом помещении зависит от изменения множества факторов [3], в том числе и регулирования количества тепловой энергии, подаваемой в приборы отопления. На рис. 2 и 3 – сплошная линия: $T_{om} = 105^{\circ}C$, пунктирная линия: $T_{om} = 95^{\circ}C$, точечная линия: $T_{om} = 70^{\circ}C$. $T_g = 800^{\circ}C$.

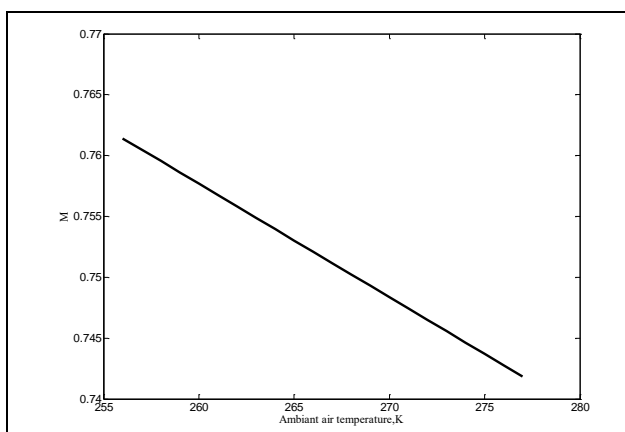


Рисунок 1. Изменение коэффициента трансформации M в прямом цикле

Карно при T горячего источника 1073 K .

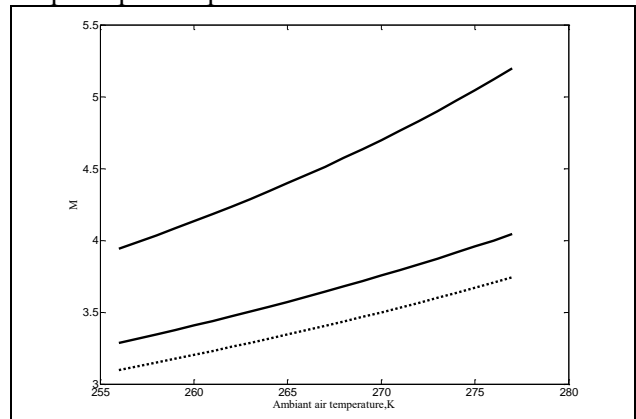


Рисунок 2. Изменение коэффициента трансформации M в обратном цикле Карно.

В этом смысле система ЦТ характеризуется некоторыми особенностями, которые могут быть улучшены в системах с применением ТН:

- при централизованном теплоснабжении (ЦТ), в котором сетевая вода используется не только для отопления, но и для горячего водоснабжения, приходится поддерживать повышенный температурный режим;
- качественное регулирование температуры сетевой воды создает дополнительное неудобство потребителю, который не может сам регулировать температуру в своем помещении, а зависит от централизованного регулирования диспетчером системы, работы множества приборов, ухудшающих надежность получения комфортных условий в конкретном помещении конкретным потребителем.

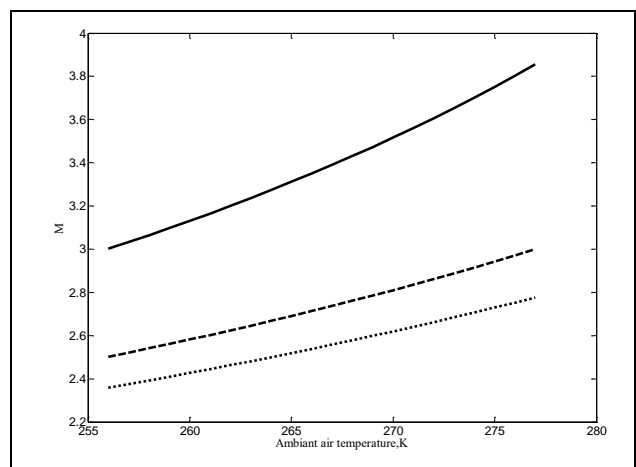


Рисунок 3. Изменение коэффициента трансформации M при совмещении идеальных прямого и обратного цикла Карно.

Эти неудобства устраняются при переходе на количественное регулирование, характерное и для автономного отопления.

3. Использование ТН в отопительном контуре потребителя

Для повышения эффективности и конкурентно-способности системы централизованного отопления предлагается установка ТН у потребителя (на один или несколько домов). Это позволяет перейти к прогрессивной системе регулирования расхода тепла самим потреби-телем, т.е. получить эффект «автономного отопления» и снизить значительно температуру теплоносителя, что снижает расход топлива в прямом цикле сжигания. При этом ТН устанавливается таким образом, чтобы отбиралось тепло от обратной ветви теплоносителя на магистральной линии, а подогрев осуществляется на прямой подаче непосредственно в дом или группу домов.

Разработана схема включения теплового насоса (ТН) в систему центрального теплового пункта (ЦТП) на группу домов, который может обеспечить необходимый подогрев воды в отопительном контуре и на теплообменнике горячего водоснабжения (ГВС) [7...13]. Это решение предназначено для зависимой схемы теплоснабжения с учетом ГВС в отдельном теплообменнике и позволяет использовать в качестве источника низкопотенциальной теплоты тепло сетевой воды в магистрали, возвращающей обратную воду на циркуляцию в систему теплоэлектроцентрали через конденсатор турбины. Снижение температуры этой воды способствует некоторому увеличению выработки электроэнергии турбогенератором и снижению выбросов тепла на градирне при определенных температурах окружающей среды.

В качестве рабочего тела в ТН предлагается использовать CO_2 . При этом тепловой насос работает по сверхкритическому циклу при разных температурах кипения. Тепло передается при помощи вспомогательного теплоносителя, переносящего тепло от магистрали сетевой воды к испарителю теплового насоса. Это позволяет регулировать тепловую нагрузку, передаваемую ТН, и размещать ТН на достаточном удалении от места отбора низкопотенциальной теплоты. Принципиальная схема включения ТН показана на рис.4.

Уравнения, определяющие зависимость температуры прямой и обратной сетевой воды и

воды, циркулирующей в контуре отопления здания, известны [4] и здесь не приводятся. Для сетевой воды, поступающей от ТЭЦ, принят температурный график 70/30, а для отопительной сети зданий – 78/35. Расчетная температура наружного воздуха принята равной минус 16°C , а температура, при которой заканчивается отопительный сезон, принята равной 6°C . Данный график осуществим при использовании горизонтальной разводки по квартирам при двухтрубной разводке внутридомовых сетей отопления, в которой температура воды одинакова для всех отопительных приборов.

Как показали результаты расчетов, сверхкритические циклы теплового насоса (рис.4) в координатах «энтальпия – давление» (h [kJ/kg] – P [MPa]), при наружной температуре -9°C , $+6^\circ\text{C}$ имеют вид, см. рис.5.

где: 1 – регулирующий клапан квартальной тепловой сети,

2 – нагрузка (отапливаемые здания),

3 – газоохладитель,

4 – компрессор,

5 – испаритель ТНУ,

6 – циркуляционный насос ЦТП,

7 – дроссельный клапан ТНУ,

8 – рекуперативный теплообменник ТНУ.

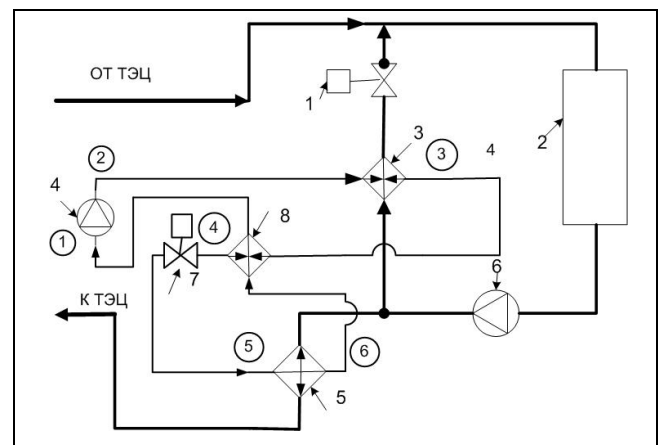


Рисунок 4. Принципиальная схема включения теплового насоса.

Термодинамические циклы ТНУ при работе на сетевой воде при температурном графике, рекомендуемом для наружных температур воздуха $t_H = -9^\circ\text{C}$ (цикл 1-2-3-4-5-6-1), при $t_H = 6^\circ\text{C}$ (цикл 1'-2'-3'-4'-5'-6'-1')

На рис.5 знаком штрих отмечены точки соответствующие температуре наружного воздуха 6°C . Значения температур, давлений и энтальпий в точках, 1-6 ТНУ, (рис.4) приведены в таблице 1. Температуры прямой и обратной сетевой воды при графике 70/30 – 78-35.

Теоретическое значение COP (Coefficient of Performance or COP) ТНУ равно 4,26 при

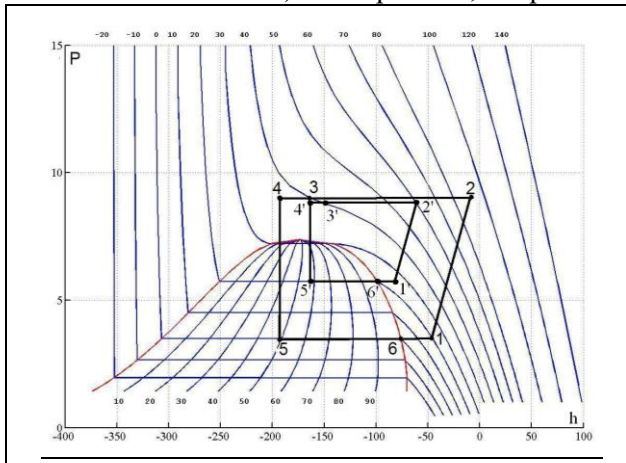


Рисунок 5. Термодинамические циклы ТНУ

температуре окружающей среды $t_H = -9^{\circ}C$ и, соответственно, 5,54 при $t_H = 6^{\circ}C$.

Таблица 1. Значения температур, давлений и энтальпий в точках, 1-6 ТНУ(см. рис.5)

№ точки	T(°C)	P(MPa)	H(kJ/kg)
1(1')	20(25)	3,5(5,73)	-45,5 (-81,87)
2(2')	90(60)	9 (9,0)	-9,47 (-64,04)
3(3')	40(40)	9(9,0)	-162,87(-162,87)
4(4')	37,2(37)	9 (9,0)	-192,38(-194,01)
5(5')	0(20)	3,47 (5,73)	-192,38 (-94,01)
6(6')	0(20)	3,47 (5,73)	-75,82 (-98,70)

Таблица 2. Температуры прямой и обратной

$t_H (^{\circ}C)$	-9	6
$t_{СЕТ_ПРЯМАЯ} (^{\circ}C)$	38,97	60,5
$t_{СЕТ_ОБРАТНАЯ} (^{\circ}C)$	24,85	28,72
$t_{КВАРТ_ПРЯМАЯ} (^{\circ}C)$	43,11	68,72
$t_{КВАР_ОБР} (^{\circ}C)$	27,23	32,98

сетевой воды в магистрали и в квартальной сети при температурах воздуха $-9^{\circ}C$ и $6^{\circ}C$

Расчеты показывают, что с падением наружной температуры возрастает отношение тепловой мощности ТНУ по отношению к расчетной тепловой мощности ЦТП. Так, при температуре наружного воздуха $6^{\circ}C$ это

отношение равно 0,13, при $-9^{\circ}C$ это отношение равно 0,39. Среднее значение за сезон для климатической зоны города Кишинева составляет около 0,24.

Как показали расчеты экономических показателей внедрения ТНУ на ЦТП, простой срок окупаемости в зависимости от величины COP составляет 3...6 лет.

4. Тепловые насосы и холодильные машины на источнике производства электрической и тепловой энергии

На исследуемой теплоцентрали ТЭЦ №2, как на всех подобных источниках производства тепловой энергии для теплоснабжения городов в постсоветских странах, производство электрической энергии осуществлялось как побочный продукт при когенерации в отопительный период для повышения энергетической эффективности станции. В межотопительный период станция используется с целью теплоснабжения только для централизованного подогрева воды на центральных тепловых пунктах у потребителя. Потребление тепловой энергии при этом сокращается в 10 раз. Работа станции в конденсационном режиме при необходимости в производстве электроэнергии происходит с огромными энергетическими потерями или приводит к остановке части станции (на ТЭЦ № 2 останавливают 2 блока из 3-х). Станция в межотопительный период при отсутствии теплового потребления работает с убытками, что влияет на рост тарифов на электрическую и тепловую энергию, и снижает конкурентоспособность централизованного теплоснабжения. Как показали некоторые работы [5], возможность увеличения выработки электроэнергии имеются при использовании абсорбционных холодильных машин и тепловых насосов.

Нами проведены расчеты для ТЭЦ №2 при работе одного блока «котел – турбогенератор» (номинальной мощностью 80 МВт электроэнергии и 180 Гкал/час тепловой энергии) на потребление тепловой энергии в летний период в 60 Гкал/час для горячего водоснабжения города. В системе водоохлаждения турбогенераторов данной ТЭЦ циркулирует 8000 м³ воды и снижение температуры при расчетных параметрах составляет $9^{\circ}C$. С водяными парами в атмосферу выбрасывается 72 Гкал /час низкопотенциальной тепловой энергии. При

установке абсорбционной бромистолитиевой холодильной установки на промышленном отборе пара, неиспользуемом в летний период, и потреблении для привода термокомпрессора 23,2 Гкал /час пара с параметрами 13 ати, можно получить для дополнительного охлаждения конденсатора турбины 20 Гкал /час холода. Включение в контур водоохлаждения конденсатора турбины теплообменника с циркуляцией охлажденной воды, полученной в холодильной установке, позволяет повысить выработку электроэнергии, сократить выбросы низкопотенциальной теплоты в атмосферу, получив и экологический эффект. Снижение температуры и давления в конденсаторе ограничено характеристикой турбины.

Предложенная схема позволит повысить энергетическую, экономическую и экологическую эффективность теплоэлектростанций в летний (межотопительный) период.

5. Тепловые насосы в децентрализованном производстве электрической, тепловой энергии и холода

Использование абсорбционного теплового насоса будет эффективно и при производстве электрической и тепловой энергии на мини-ТЭЦ, работающей на дизель-генераторных установках. Такая теплоэлектростанция построена в г. Кишиневе на городских очистных сооружениях. В Кишиневе с целью сокращения расхода природного газа разработан проект реконструкции городских очистных сооружений. Проектом предусмотрена переработка канализационных стоков и отходов в биогаз с последующим сжиганием его для производства электрической и тепловой энергии на мини ТЭЦ. При утилизации отходов и стоков объем биогаза, по расчетам, составит до 30 тыс. м³ в сутки. Мини-ТЭЦ включает в себя дизельную электростанцию мощностью 2 МВт и может включать группу тепловых насосов для трансформирования низкопотенциальной теплоты водоохлаждающей системы электростанции и поступающих стоков в полезное тепло, используемого для собственных нужд комплекса станции очистки стоков, в том числе кондиционирования воздуха (тригенерация энергии).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа расширяет сферу эффективного применения тепловых насосов для модернизации существующих и строящихся систем централизованного теплоснабжения. Согласно прогнозам Мирового энергетического комитета (МИРЭК) к 2020 г. 75% коммунального теплоснабжения в развитых странах будет осуществляться с помощью тепловых насосов(б).

Сокращение сжигания органического топлива требует вовлечение возобновляемых источников энергии.

Неистощимость и экологическая чистота этих энергоресурсов обуславливают необходимость их интенсивного использования. Но так как эти ресурсы имеют, как правило, низкий потенциал энергии и этим предопределяется сложность их использования, тепловая энергия данных источников может быть успешно преобразована с помощью тепловых насосов в энергию с более высокими температурными характеристиками для использования в бытовых и производственных целях.

Ожидаемое использование энергии возобновляемых источников в Р.Молдова к 2010 году составит 6% от общего потребления.

Это составит в общем энергетическом балансе Р.Молдова за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ) расход энергии к 2010 году 7,0-8,7 PJ (168-210 тыс. т.н.э. или 240-300 тыс. т.у.т).

ВЫВОДЫ

1. Приведенные результаты свидетельствуют о повышении коэффициента трансформации тепла при снижении температуры в магистральных трубопроводах сетевой воды и использовании совмещенных прямого и обратного кругового процесса при централизованном отоплении с применением тепловых насосов в диапазоне осеннее - зимних температур климата Р.Молдова. Это позволяет получить теоретически снижение затрат топлива на 6-7% при температурах окружающей среды от минус 16⁰С до 0⁰С.

2. В системе централизованного теплоснабжения установка ТН у потребителя позволяет в автоматическом режиме получить заданные потребителем параметры. Таким образом, потребитель получает наряду с энергетической экономией и потребительские

преимущества, имеющиеся при децентрализованном отоплении.

3. Приведены технические решения использования тепловых насосов и холодильных установок, осуществляющих обратный круговой процесс, для повышения эффективности централизованного теплоснабжения в межотопительный период.

4. Рассмотрена возможность использования тепловых насосов для тригенерации энергии на дизельэлектростанции, работающей на возобновляемых источниках энергии (биогазе).

Литература

1. **Зубатый, А.Л.** Стратегия теплоснабжения города Кишинева // Отчет Института энергетики Академии наук РМ, рукопись, 1999-2000гг.
2. **Розенфельд, Л.М., Ткачев, А.Г.** Холодильные машины и аппараты, Москва, 1955г.
3. **Чумак, И.Г., Зубатый, А.Л.** Расчет равновесной температуры камеры охлаждения продуктов, Сборник трудов, выпуск 9, изд. Техника, Киев, 1970, стр. 102-105
4. **Соколов, Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергоиздат, 360 с., 1982.
5. **Галимова, Л.В., Попов, А.А.** Система ТЭЦ – абсорбционная холодильная машина. Холодильная техника №10, 1998г.
6. **Калнинь, И.М., Савицкий, И.К.** Тепловые насосы: вчера, сегодня, завтра. Холодильная техника, №10, 2000г.
7. **Juravlev, A., Sit, M., Sit, B., Poponova, O., Timcenco, D.** The use of heat pump systems in district heating. *Analele Universității din Craiova, Seria: Inginerie Electrica, nr.31, Vol.II, p.229-232.* 2007.
8. **Шит, М.Л., Журавлев, А.А., Попонова, О.Л., Шит, Б.М., Тимченко, Д.В.** Применение теплонасосных установок в квартальных тепловых сетях // III Международная конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». СПбГУНиПТ. с.117-124. 13-15 ноября 2007 г.
9. **Шит, М.Л., Журавлев, А.А., Попонова, О.Л., Шит, Б.М., Тимченко Д.В.** Применение теплонасосных установок в квартальных тепловых сетях централизованного теплоснабжения // IV Международная конференция «Возобновляемая и малая энергетика», Москва. Тезисы докладов, с. 57...61. 24-25 октября 2007 г.

10. **Журавлев, А.А., Шит, М.Л., Шит, Б.М.** Управление теплонасосной установкой на диоксиде углерода в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки". *Наукові праці Одеської Національної Академії Харчових Технологій, Том.32, VI, 2008.*

11. **Журавлев, А.А., Шит, М.Л., Шит, Б.М., Попонова, О.Б., Зубатый, А.Л.** Система регулирования газоохладителя теплонасосной установки в комбинированной системе теплоснабжения в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки. *Проблемы региональной энергетики, N2, 2008, http://ieasm.webart.md/data/m71_2_67.doc.*