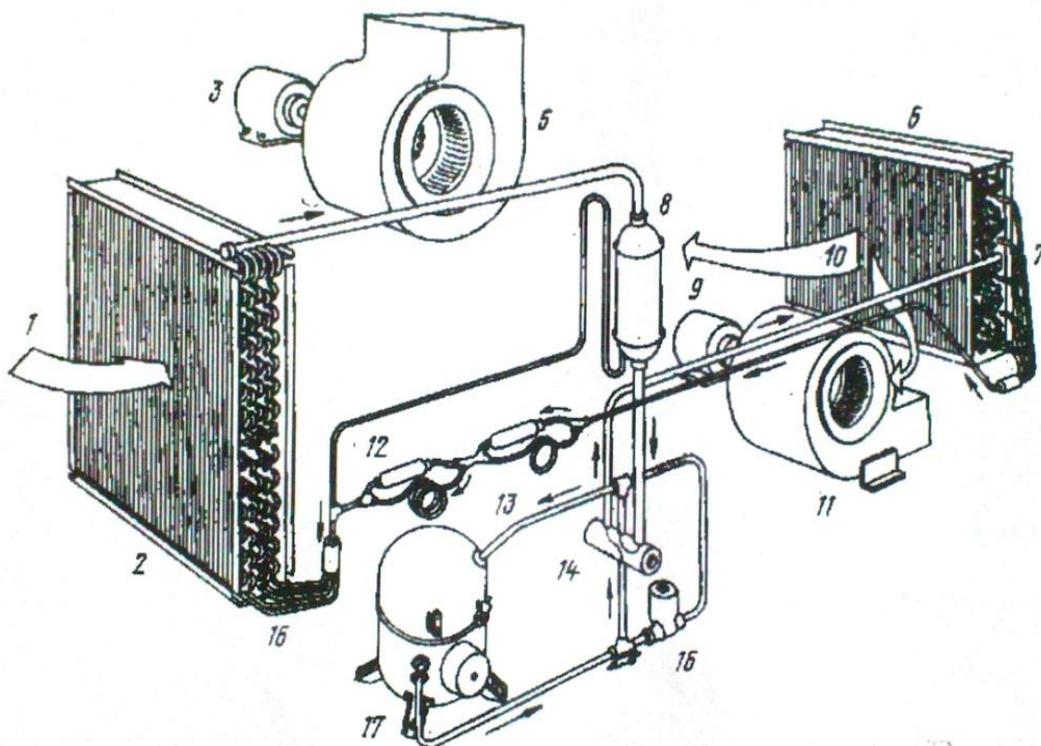


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
(ННГАСУ)

Факультет инженерно-экологических систем и сооружений
Кафедра теплогазоснабжения

**Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии
для получения теплоты в системах теплоснабжения:
использование с применением тепловых насосов**

Методическая разработка для студентов очной и заочной форм обучения
специальностей 140104.65 Промышленная теплоэнергетика и
270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция



Нижегород
ННГАСУ
2013

УДК 621.311.23/26:620.9(0.75.8)

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии для получения теплоты в системах теплоснабжения: использование с применением тепловых насосов [Текст]: Методическая разработка для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 140104.65 Промышленная теплоэнергетика и 270109.65 Теплогазоснабжения и вентиляция. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет:
сост. Г.М.Климов, Е.Н.Цой, М.Г.Климов Ниж.Новгород:ННГАСУ,2013 .- 50с.:ил.

В методической разработке приведены основные сведения о тепловых насосах, их классификация, о процессах происходящих при их работе. Рассмотрены принципиальные схемы теплонасосных установок в системах децентрализованного теплоснабжения. Приведены списки основных и дополнительных источников (включая нормативные). В приложениях более подробно рассмотрены теоретические основы работы тепловых насосов с определением теплотехнических характеристик их работы, приведены краткие указания (с примером) по подбору тепловых насосов и элементов теплонасосной установки в системе децентрализованного теплоснабжения. Приводимая в разработке информация может быть полезной как для студентов указанных специальностей, так и для специалистов-теплотехников.

Рис. 14..... Табл. 5..... Библиография: основная 9.... назв.

дополнительная 23... назв
к приложениям Аи Б 21 назв

Составители: Г.М. Климов, Е.Н. Цой, М.Г. Климов.

Рецензент – доцент каф. ТГС Е.Н. Цой.

Компьютерный набор - Е.Н. Цой, Е.А. Лопаткина гр.ПТ-08

Содержание

	<i>стр</i>
Введение	4
1 Тепловые насосы	4
1.1 Принцип действия теплового насоса	6
1.2 Теплонасосные установки	7
1.3 Энергетические установки на базе тепловых насосов	12
1.3.1 Краткие исторические сведения	12
1.3.2 Классификация теплонасосных установок	13
1.4 Тепловые насосы в системах горячего водоснабжения	13
1.5 Тепловые насосы с использованием воздуха	14
1.6 Энергетические установки, использующие низкотемпературные источники энергии	16
1.6.1 Типы тепловых насосов	17
1.7 Вопросы для самопроверки	20
1.8 Использованные источники	21
1.9 Дополнительные источники	21
1.10 Приложение А (справочное)	22
П.А.1 Основные понятия	22
П.А.2 Коэффициент преобразования энергии	22
П.А.3 Коэффициент преобразования теплоты	23
П.А.4 Паровая компрессионная теплонасосная установка (ТНУ)	24
П.А.5 Коэффициент преобразования энергии (КПЭ) паровой компрессионной теплонасосной установки (ТНУ)	26
П.А.6 Способы повышения (КПЭ) ТНУ	27
П.А.7 Двухцелевые теплонасосные установки	27
П.А.9 Низкотемпературные источники в ТНУ	28
П.А.10 Пароэжекторный ТН	9
1.11 Приложение Б (справочное):	31
П.Б.1 Экономия прежде всего	31
П.Б.2 Почему нужен ТН	31
П.Б.3 Из чего состоит ТНУ	31
П.Б.4 Как рассчитать мощность ТНУ?	31
П.Б.5 Как рассчитать длину трубы?	31
П.Б.6 Как рассчитать площадь земельного участка?	31
П.Б.7 Пример расчёта мощности ТНУ	32
П.Б.8 Источники к приложениям А и Б	33

ВВЕДЕНИЕ

Рост цен на нефть, истощение природных ресурсов, глобальное изменение климата - стоит ли удивляться тому, что возобновляемые источники энергии сегодня и повсеместно находятся в центре всеобщего внимания. К ним следует отнести и теплонасосное оборудование, производство которого растёт невиданными темпами по всей Европе. По прогнозам Мирового Энергетического Комитета (МИРЭК), к 2020г. в развитых странах мира теплоснабжение будет осуществляться с помощью тепловых насосов-**ТН**. Эти устройства уже более четверти века успешно действуют в быту и промышленности как в Америке, так и Европе, их количество исчисляются десятками миллионов. Причём во многих городах работают сотни крупных сооружений, обладающих мощностью, как у средней величины ТЭЦ.

За рубежом **ТН** применяют, чтобы отапливать дома, готовить горячую воду, охлаждать или осушать воздух в комнатах, вентилировать помещения. Конечно, есть отлично действующие котлы, бойлеры, кондиционеры, осушители, которые и выполняют эту работу, но таких приборов нужен целый комплекс, а здесь одна установка может сделать всё или почти всё то же самое, но дешевле.

Тепловой насос использует теплоту, рассеянную в окружающей среде: в земле, воде, воздухе. (Её специалисты называют низкопотенциальной теплотой). Тепловые насосы исправно приносят пользу уже с 1830 г. Но первый бум их популярности пришелся только на годы разрухи после Второй мировой войны, когда топлива в странах Европы катастрофически не хватало. В наши дни истощение мировых нефтяных запасов дало толчок новому всплеску интереса к этим устройствам. И неспроста. Такие машины завоевывают популярность благодаря многим достоинствам. Тепловой котёл использует введённую в него энергию на голову эффективнее любых котлов, сжигающих топливо.

Экономичность работы разных моделей тепловых насосов специалисты сравнивают по особой величине - коэффициенту преобразования теплоты (φ), среди других его названий в буклетах встречаются коэффициенты трансформации теплоты, мощности, преобразования температур.

Он показывает отношение полученной теплоты к затраченной энергии. К примеру, $\varphi_{cp} = 3,5$ означает, что, подведя к машине **1 кВт**, на выходе мы получим **3,5 кВт** тепловой мощности, то есть **2,5 кВт** природа предлагает нам безвозмездно. В среднем 60-75% потребностей теплоснабжения дома **ТН** обеспечивает бесплатно. Цифры настолько завораживающие, что невольно приходит на ум поговорка о бесплатном сыре. На самом деле, затраты на насос и монтаж системы сбора теплоты довольно ощутимы и составляют \$ 300...1200 на 1 кВт потребляемой мощности отопления.

Но капиталовложения окупятся за **4-7** лет только за счёт сберегаемого топлива и электричества. При сложившемся уровне цен на энергоносители **ТН** уступают по экономичности пока только газовым котлам, но заметно выигрывают у жидкотопливных и электрических. Служат они по **15-20** лет до капремонта. В связи с ростом цен на все виды топлива, лидерство **ТН** обеспечено.

1. ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

По сути, тепловой насос - это слегка преобразованный холодильник. В обоих есть испаритель, компрессор, конденсатор и дросселирующее устройство. Цикл работы у холодильника и **ТН** абсолютно одинаков, разнятся только параметры настройки. Даже внешне, по размерам и форме, они похожи друг на друга. Холодильник работает, выкачивая теплоту наружу, а **ТН** работает по такому же принципу только наоборот - он нагнетает теплоту с улицы или из почвы в Вашу гостиную.

В холодильнике почти не ощущаемая теплота продуктов в конечном итоге выделяется в виде довольно горячего потока воздуха, отходящего от трубчатой панели конденсатора ("радиатор" на задней стенке). Поэтому, если из холодильника вытащить испарительную камеру (с трубами) и закопать в землю, мы и получим **ТН**, который будет обогревать комнату теплым воздухом. А если конденсатор холодильника омывать водой, то её, нагретую, можно использовать в радиаторах отопления или в тёплом поле. Таким образом, работа **ТН** схожа с

процессом холодильника. *ТН* перекачивает низкопотенциальную тепловую энергию грунта, воды или даже воздуха в относительно высокопотенциальную теплоту для отопления объекта. Примерно $2/3$ отопительной энергии можно получить бесплатно из природы: грунта, воды, воздуха и только $1/3$ энергии необходимо затратить для работы самого *ТН*.

Иными словами, владелец *ТН* экономит 70% средств которые, при отоплении своего дома, магазина, цеха и т.п. традиционным способом, он бы регулярно тратил на дизельное топливо или электроэнергию.

Применение *ТН* различной тепловой мощности является принципиально новым решением проблемы теплоснабжения и позволяет в зависимости от сезонности и условий работы достигать максимальной эффективности в их работе. *ТН* имеют большой срок службы до капитального ремонта (до 10-15 отопительных сезонов) и работают полностью в автоматическом режиме. Обслуживание установок заключается в сезонном техническом осмотре и периодическом контроле режима работы.

Срок окупаемости оборудования теплонасосной не превышает

2-3 отопительных сезонов.

Если теплоты из внешнего контура все же недостаточно для отопления в сильные морозы, практикуется эксплуатация *ТН* в паре с дополнительным генератором теплоты (в таких случаях говорят об использовании бивалентной схемы отопления). Когда уличная температура опускается ниже расчётного уровня (температуры бивалентности), в работу включается второй генератор теплоты - чаще всего небольшой электронагреватель. Практически во всех моделях *ТН* дополнительно установлен электронагреватель. Дело в том, что при выборе отопительной установки номинальная мощность рассчитывается исходя из максимальной потребности теплоты, т.е. для покрытия тепловой нагрузки в самый холодный зимний день. Для Санкт-Петербурга, минимальная расчётная температура минус 26 градусов Цельсия. Однако, исходя из многолетних наблюдений, длительность такой температуры всего лишь несколько дней в году, а это значит, что при расчёте на максимальную мощность значительная часть потенциала *ТН* будет использоваться очень редко. Для выбора соотношения мощностей *ТН* и электронагревателя существует специальный интегральный график, обладающий свойством универсальности для всех регионов России. (см.рис.1).



Из графика видно, что если источник теплоты системы будет состоять из 2-х источников, один - дорогостоящий, но вырабатывающий «дешёвую» энергию (*ТН*) с номинальной мощностью 60% от расчётной нагрузки, и другой, дешёвый, но вырабатывающий «дорогую» энергию электронагреватель, то за год первый источник выработает приблизительно 92% энергии, а второй около 8% энергии. Такая комбинация снижает стоимость капитальных затрат и уменьшает срок окупаемости *ТНУ*. Причём определяющим фактором является не стоимость самой установки, а стоимость обустройства внешнего контура - скважины, либо земляного контура.

1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Принцип действия *ТН* основан на цикле Карно. Схематично *ТН* представляется в виде системы из *трёх замкнутых контуров*:

- *в первом*, внешнем, циркулирует теплоотдатчик (теплоноситель, собирающий теплоту окружающей среды);
- *во втором* - хладагент (вещество, которое испаряется, отбирая теплоту теплоотдатчика, и конденсируется, отдавая теплоту теплоприёмнику)
- *в третьем* - теплоприёмник (вода в системах отопления и горячего водоснабжения здания), (см. рис. 2).

Внешний контур (коллектор) - это уложенный в землю или в воду (например, полиэтиленовый) трубопровод, в котором циркулирует незамерзающая жидкость - антифриз.

Во второй контур, где циркулирует хладагент, как в бытовом холодильнике, встроены теплообменники – испаритель, конденсатор и устройства, которые меняют давление хладагента -распыляющий его в жидкой фазе дроссель (узкое отверстие) и сжимающий его уже в газообразном состоянии компрессор. Терморегулятор, является управляющим устройством.

Источником низкопотенциальной теплоты может служить грунт, скальная порода, озеро, река, и выход теплого воздуха из системы вентиляции. Охлаждённый теплоноситель, проходя по трубопроводу, уложенному в землю нагревается на несколько градусов. Внутри *ТН* теплоноситель, проходя через теплообменник, называемый испарителем, отдаёт собранную из окружающей среды теплоту во внутренний контур *ТН*.

Хладагент под давлением через капиллярное отверстие поступает в испаритель, где за счёт резкого уменьшения давления происходит испарение. Хладагент отнимает теплоту у внутренних стенок испарителя, а испаритель в свою очередь отбирает теплоту у земляного контура, за счёт этого происходит его постоянное охлаждение. Компрессор засасывает из испарителя хладагент, сжимает его (за счёт чего температура хладагента повышается) и выталкивает в конденсатор. В конденсаторе, нагретый в результате сжатия хладагент отдаёт полученную теплоту (температура порядка 85-125°C) в отопительный контур и окончательно переходит в жидкое состояние. Процесс повторяется вновь. При достижении необходимой температуры терморегулятор размыкает электрическую цепь и компрессор останавливается. При понижении температуры в отопительном контуре терморегулятор вновь включает компрессор. Хладагент в *ТН* совершает обратный цикл Карно.

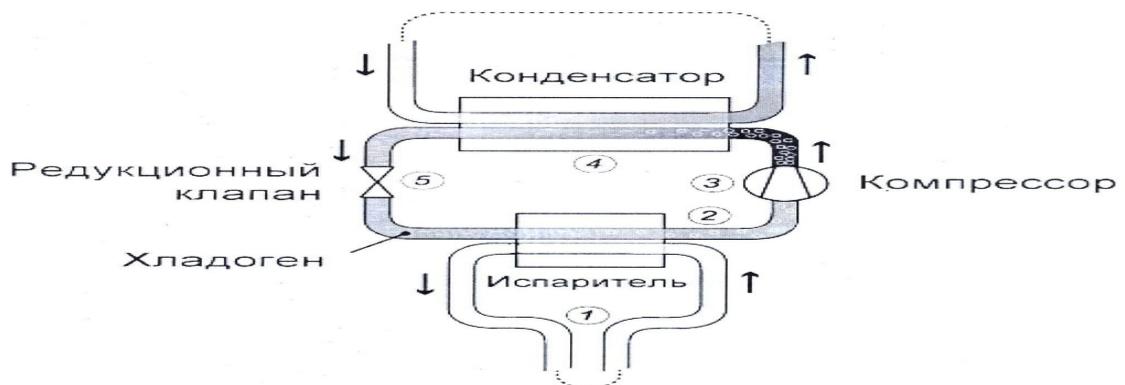


Рис. 2. Принципиальная схема теплового насоса

1. Охлажденный теплоноситель, проходя по внешнему трубопроводу нагревается на несколько градусов
2. Внутри *ТН* теплоноситель, проходя через теплообменник, называемый испарителем, отдает собранную из окружающей среды теплоту во внутренний контур *ТН*. Внутренний контур *ТН* заполнен хладагентом. Хладагент, имея очень низкую температуру кипения, проходя через испаритель, превращается из жидкого состояния в газообразное. Это происходит при низком давлении и температуре -5°C .
3. Из испарителя газообразный хладагент попадает в компрессор, где он сжимается до высокого давления и высокой температуры.

4. Далее горячий газ поступает во второй теплообменник, конденсатор. В конденсаторе происходит теплообмен между горячим газом и теплоносителем из обратного трубопровода системы отопления дома. Хладагент отдаёт свою теплоту в систему отопления, охлаждается и снова переходит в жидкое состояние, а нагретый теплоноситель системы отопления поступает к отопительным приборам.
5. При прохождении хладагента через редукционный клапан давление понижается, хладагент попадает в испаритель, и цикл повторяется снова.

1.2 ТЕПЛОНАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ

Разработанные в настоящее время теплонасосные установки (*ТНУ*) по принципу действия подразделяются на *компрессионные, сорбционные и термоэлектрические*.

В *компрессионных ТНУ* повышение температурного уровня отбираемой рабочим агентом низкотемпературной теплоты различных сред производится механическим сжатием рабочего агента в компрессоре.

От вида рабочего агента известны *воздушно-компрессионные и пароконпрессионные ТНУ*.

В *сорбционных ТНУ* повышение температурного уровня отбираемой рабочим агентом низкотемпературной теплоты различных сред осуществляется за счёт термохимических реакций поглощения (сорбции) рабочего агента соответствующим сорбентом при низких температурах, а затем выделении (десорбции) рабочего агента при подводе внешней энергии в виде дополнительной теплоты на более высоком температурном уровне. В зависимости от вида термохимических реакций различают *абсорбционные и адсорбционные* установки. В первых процесс сорбции осуществляется во всем объёме абсорбента (на границе жидкой и паровой фаз), во втором - на поверхности адсорбента, находящегося, как правило, в твёрдой фазе (лёд).

Термоэлектрические ТНУ основаны на эффекте Пельтье, заключающемся в том, что если через разнородные и соединённые друг с другом металлы пропускать постоянный электрический ток, то при направлении его от положительного проводника к отрицательному в месте контакта (спая) происходит выделение теплоты, а при обратном направлении тока (на другом спае) - поглощение низкотемпературной теплоты различных сред. От мощности тока, подводимой к проводникам, изменяется и температурный уровень выделяемой теплоты. На этом принципе устроены полупроводниковые *ТНУ*.

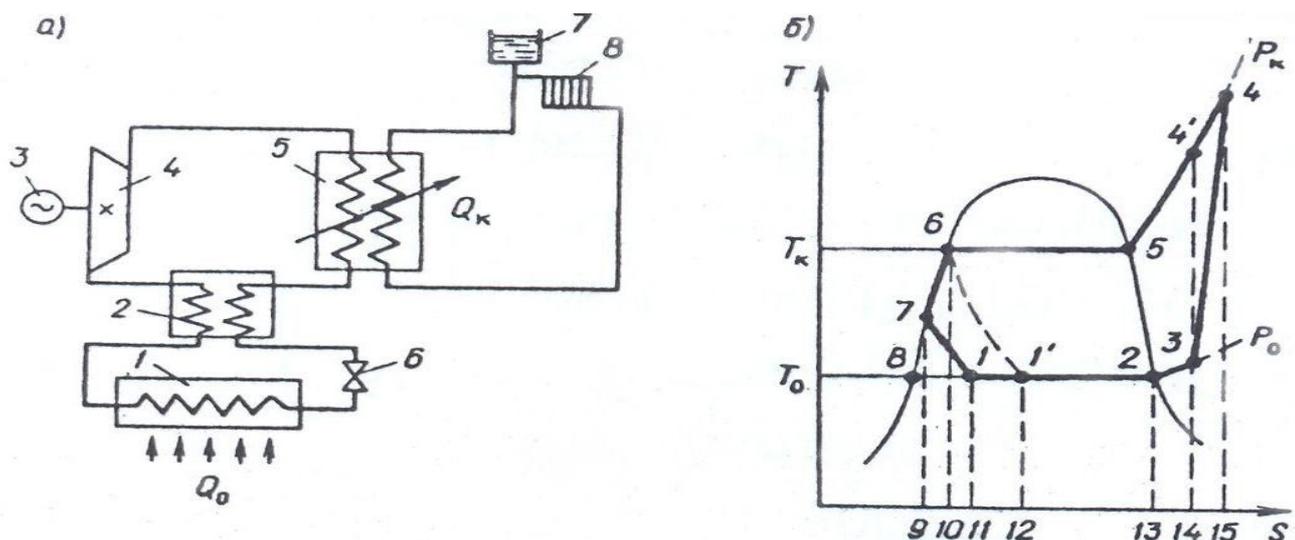


Рис.3 Простейшая схема (а) и цикл в *TS*-диаграмме (б) одноступенчатой пароконпрессионной *ТНУ*

1 – испаритель; 2 – регенеративный теплообменник; 3 – электродвигатель; 4 – компрессор; 5 – конденсатор; 6 – дроссель; 7 – бак-расширитель; 8 – отопительный прибор

Проведённые различными организациями исследования показали, что наиболее перспективными типами *ТНУ* для теплоснабжения являются в настоящее время пароконпрессионные [4; 46]. Простейшая схема и цикл в *TS*-диаграмме одноступенчатой пароконпрессионной *ТНУ* показаны на **рис.3**.

Жидкий рабочий агент с параметрами T_0 и P_0 поступает в испаритель 1 , где происходит его испарение за счёт подвода низкотемпературной теплоты среды Q_0 . Образующийся насыщенный пар поступает в регенеративный теплообменник 2 , где перегревается за счет осаждения конденсата идущего из конденсатора 5 . Затем пар сжимается компрессором 4 до давления P_k , которому соответствует более высокая температура насыщения T_k , и поступает в конденсатор 5 , где конденсируется и отдаёт теплоту Q_k потребителю (воде систем отопления). После охлаждения в теплообменнике 2 производится снижение давления конденсата от P_k до P_0 в дросселе 6 (или в детандере с частичным возвратом энергии) с понижением его температуры до T_0 , т. е. до исходных параметров, и цикл повторяется.

Перегрев пара перед компрессором в регенеративном теплообменнике улучшает работу компрессора, а уменьшение температуры конденсата перед дросселем снижает потерю энергии при дросселировании и увеличивает количество отбираемой низкотемпературной теплоты Q_0 в испарителе.

Таблица 1. Характеристики применяемых фреонов

Фреоны	Параметры при $T_0=10$ °С, $T_k=90$ °С и $T_{вс}=25$ °С			Критические параметры	
	P_0 , МПа	P_k , МПа	q_0 , кДж/м ³	$t_{кр}$, °С	$P_{кр}$, °С
R 11	0,06	0,62	475	198	4,86
R 12	0,42	2,83	1960	112	4,06
R 21	0,11	1,08	697	178,5	5,2
R114	0,13	1,14	565	145,7	3,27
R 12B1	0,17	1,39	993	154	4,2
R 142	0,21	1,72	1280	136,5	4,25

В TS -диаграмме процесс подвода теплоты в испарителе изображается линией $1-2$, перегрева пара в теплообменнике $2-3$, сжатия в компрессоре $3-4$, отвода теплоты в конденсаторе $4-5-6$, охлаждения конденсата $6-7$, дросселирования $7-1$. Количество теплоты, подведённое в испарителе, равно площади $1-2-13-11-1$, а отведённое в конденсаторе - площади $4-5-6-10-15-4$. Дополнительная энергия, затраченная в компрессоре, равна площади $2-3-4-5-6-7-8-2$ минус площадь $2-3-14-13-2$ (или площади $6-7-9-10-6$).

Из TS -диаграммы видно, что коэффициент преобразования (трансформации) энергии в ТНУ. определяемый как отношение полезно получаемой энергии к затраченной

$$\varphi = \frac{Q_k}{L} = \frac{(Q_0 + L)}{L} = 1 + \frac{Q_0}{L}$$

получается больше единицы и будет тем выше, чем меньше величина дополнительной энергии, затраченной в компрессоре.

Последняя зависит от свойств рабочего агента и принятого уровня температур его испарения и конденсации.

В качестве рабочего агента в парокомпрессионных $ТНУ$ используются жидкости, испаряющиеся (кипящие) при низких температурах и, в частности, фреоны. В табл. 1 представлены характеристики применяемых фреонов.

Из табл. 1 видно, что наибольшей объёмной производительностью (q_v) обладает $R12$, следовательно при одинаковой тепловой мощности установки требуется меньшее его количество, в результате будут меньше и затраты работы, в компрессоре. Поэтому $R12$ в настоящее время применяется наиболее широко. Однако при работе на $R12$ для получения высоких температур конденсации требуется создавать в компрессоре большие давления, что по техническим и экономическим причинам не всегда целесообразно. В одноступенчатых уста-

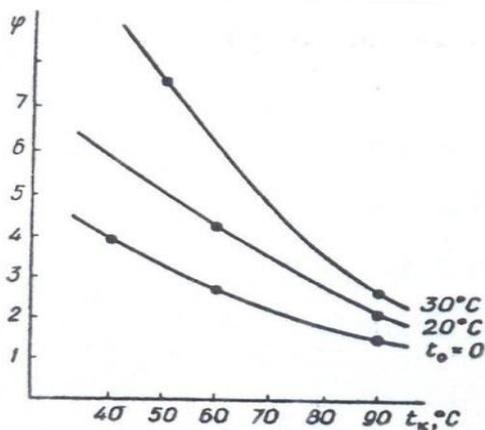
новках при работе на **R12** получают t_k до 70°C при $P_k = 1,8 \text{ МПа}$. Для получения более высоких температур конденсации используются другие фреоны, например **R113**, температура насыщения которого составляет 127°C при тех же давлениях, смеси различных фреонов, двухступенчатые и каскадные схемы [43].

Влияние принятого уровня температур конденсации и испарения на коэффициент преобразования для одноступенчатой **ТНУ** типа **НТ-80** при работе на **R12** представлено на **рис. 4**.

*Значения ϕ снижаются при увеличении t_k и уменьшении t_0 .
при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ увеличение t_k от 40 до 90°C приводит к снижению ϕ от 4 до $1,5$, т.е. до значений, когда практически вся тепловая энергия получается за счёт подвода дополнительной (электрической) энергии к компрессору.*

При применяемых (из-за давлений) значениях $t_k = 60^\circ\text{C}$ увеличение t_0 от 0 до 30°C приводит к резкому росту ϕ от $2,8$ до 6 .

Возможности увеличения t_0 ограничиваются источниками низкотемпературной теплоты и затратами на поверхность испарителя, а снижение t_k - с затратами на поверхность, конденсатора и систему теплоснабжения.



Источниками низкотемпературной теплоты для ТНУ могут являться естественная теплота, содержащаяся в наружном воздухе, грунте, поверхностных и подземных (например, геотермальных) водах, солнечная энергия и др., а также теплота различных ВЭР, сточных жидкостей и др.

Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования ТНУ от температур испарения (t_0) и конденсации (t_k)

При одинаковой температуре испарения рабочего тела t_0 чем выше температура низкотемпературного источника, тем меньше требуемая величина поверхности испарителя (последняя обратно пропорциональна среднему температурному напору в испарителе). Например, при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и температурах теплоносителя низкотемпературной теплоты $t_0^{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$, $t_0^{\text{вых}} = 15^\circ\text{C}$ и $t_0^{\text{вх}} = 10^\circ\text{C}$, $t_0^{\text{вых}} = 5^\circ\text{C}$ в первом случае требуемая величина поверхности испарителя снижается в 2,2 раза. При повышении температуры испарения до $t_0 = 10^\circ\text{C}$ и тех же значениях температур теплоносителя низкотемпературной теплоты $t_0^{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$, $t_0^{\text{вых}} = 15^\circ\text{C}$ требуемая величина поверхности испарителя, по сравнению с первым случаем, возрастает в 2,3 раза.

Таким образом, *увеличение значений t_0 требует, во-первых, наличия соответствующей (на $10... 15^\circ\text{C}$ выше) низкотемпературной теплоты и, во-вторых, связано со значительным увеличением требуемой поверхности испарителя.*

Аналогично и при снижении t_k , происходит увеличение требуемой поверхности конденсатора (только менее резкое, т.к. температуры более высокие). Кроме того, при этом будет происходить и снижение, температуры теплоносителя, подаваемого потребителям, что увеличивает затраты в систему теплоснабжения.

Поэтому в каждом конкретном случае, т.е. при известных параметрах низкотемпературной теплоты, значений и видов тепловых нагрузок и др., *выбор значений t_0 и t'_0 следует производить на основании технико-экономических расчётов с учётом всех затрат как в ТНУ, так и в систему теплоснабжения.*

Следует отметить, что коэффициент преобразования φ принимается иногда за КПД ТНУ, однако он не отражает всех потерь, связанных с выработкой теплоты Q_k .

В реальных условиях, помимо дросселирования, происходят потери в трубопроводах и оборудовании ТНУ при преобразовании первичной энергии в приводном двигателе и передаче её к компрессору, при выработке первичной энергии и передаче её к двигателю и др. В частности, *при использовании электрической энергии КПД ТНУ может быть определен по выражению*

$$\eta_{ТНУ} = \frac{Q_k}{L} \cdot \eta_{т.п} \cdot \eta_{эм} \cdot \eta_{кэс} \cdot \eta_{эл} \quad (2)$$

где Q_k – теплота, переданная в конденсаторе; L – работа сжатия в компрессоре от давления P_0 до P_k ; $\eta_{т.п}$ – КПД теплового потока, учитывающий потери энергии и рабочего агента в трубопроводах и оборудовании ТНУ; $\eta_{эм}$ – электрический КПД двигателя и компрессора; $\eta_{кэс}$ – КПД КЭС, т. е. источника, вырабатывающего дополнительную электрическую энергию; $\eta_{эл}$ – КПД электрических линий передач.

При средних значениях $Q_k/L = 2,5$; $\eta_{т.п} = 0,8$; $\eta_{эм} = 0,98$; $\eta_{кэс} = 0,4$ и $\eta_{эл} = 0,92$ получаем $\eta_{ТНУ} = 0,72$ т. е. примерно такой же, как и в поселковых котельных.

В ряде работ [43 и др.] за КПД ТНУ принимается

$$\eta_{потерь} = \varphi_d \cdot \mathcal{E} \quad (3)$$

где $\varphi_d = \frac{Q_k}{L} \eta_{эм}$ – действительный коэффициент преобразования ТНУ; \mathcal{E} – удельные затраты работы в ТНУ, отнесенные к единицы теплоты, отданной в конденсаторе.

Значения \mathcal{E} определяются с учётом потерь эксергии, связанной с конечной разностью температур теплоносителей в конденсаторе и испарителе по уравнению

$$\mathcal{E} = \frac{T_k^{cp} - T_0^{cp}}{T_k^{cp}} = \frac{t_k - (t_0 + \Delta t_k^{cp} + \Delta t_0^{cp})}{(273 + t_k) - \Delta t_0^{cp}}, \quad (4)$$

где $\Delta t_k^{cp} = T_k - \frac{T_k^{вх} - T_k^{вых}}{\ln \frac{T_k^{вх}}{T_k^{вых}}}$ и $\Delta t_0^{cp} = \frac{T_0^{вх} - T_0^{вых}}{\ln \frac{T_0^{вх}}{T_0^{вых}}} - T_0$ – средние разности температур между рабочим агентом и соответственно нагреваемым в конденсаторе и охлаждаемым в испарителе теплоносителями; $t_k(T_k)$ и $T_0^{вх}(T_0^{вх})$ – температуры рабочего агента, соответственно, в конденсаторе и испарителе, °С (К); $T_k^{вх}(T_k^{вх})$ и $T_0^{вх}(T_0^{вх})$ – температуры теплоносителей на входе (выходе), соответственно, в конденсаторе и испарителе, К.

При средних значениях $t_k = 60$ °С, $t_0 = 0$ °С, $t_k^{вх} = 35$ °С, $t_0^{вх} = 55$ °С, $t_0^{вх} = 10$ °С и $t_0^{вх} = 5$ °С получаем $\Delta t_k^{cp} = 15$ °С, $\Delta t_0^{cp} = 7,5$ °С и $\mathcal{E} = 0,115$. При $Q_k/L = 2,5$ и $\eta_{эм} = 0,98$ имеем $\eta_{потерь} = 2,5 \cdot 0,98 \cdot 0,115 = 0,282$.

Из приведённых примеров видно, что существует разница в значениях КПД ТНУ, определённых по указанным методам. Связано это с тем, что при втором методе учитывается ценность (работоспособность) отбираемой низкотемпературной теплоты и потери её эксергии в испарителе. Между тем ценность этой теплоты обычно не имеет значения, так как "Она нигде (кроме ТНУ) не используется. Поэтому при оценке расходов топлива в ТНУ на выработку теплоты этот метод не применим. Он может быть использован при анализе циклов ТНУ для выявления степени отклонения реальных установок от идеальных и при необходимости оценки различных способов использования низкотемпературной теплоты.

Расход топлива в ТНУ, на выработку дополнительной энергии (в частности, для привода компрессора) может быть определён по формуле

$$B_{ТНУ} = b_{ТНУ} Q_k = Q_k / (\eta \eta_{ТНУ} Q_p^H) \quad (5)$$

где $b_{ТНУ}$ – удельный расход топлива на выработку теплоты в ТНУ; $\eta \eta_{ТНУ}$ – КПД ТНУ; Q_p^H – удельная теплота сгорания топлива на станции (источнике), вырабатывающего дополнительную энергию для ТНУ.

Экономия топлива, получаемая в ТНУ по сравнению с замещаемым топливным вариантом, определяется из уравнения

$$\Delta B_{\text{эк}} = Q_k / Q_p^H (1 / \eta_{\text{зам}} - 1 / \eta_{\text{ТНУ}}), \quad (6)$$

где $\eta_{\text{зам}}$ - КПД замещаемого топливного источника теплоты.

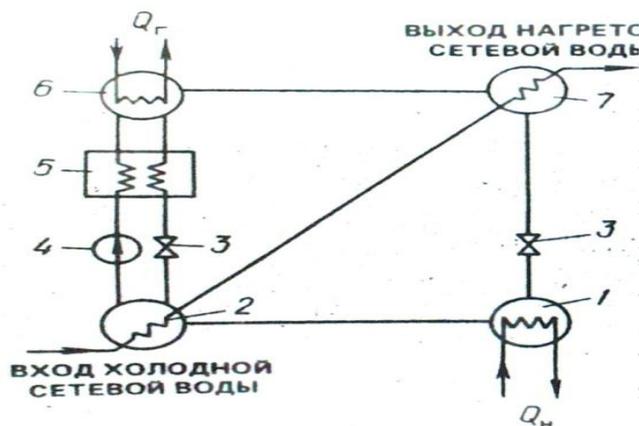
При $\eta_{\text{ТНУ}} > \eta_{\text{зам}}$ получаем экономию топлива, при $\eta_{\text{ТНУ}} < \eta_{\text{зам}}$ - перерасход топлива.

Для привода компрессора в паротурбинных ТНУ наряду с электродвигателями находят применение двигатели внутреннего сгорания, работающие на газе и дизельном топливе, паровые и газовые турбины и др.

При этом часто достигается более полное использование первичной энергии топлива за счёт снижения потерь (утилизируется теплота охлаждающей воды и смазочного масла двигателей, теплота отработавших в турбинах пара и газа и др.).

В последние годы начали применяться также и абсорбционные ТНУ, в которых используются бинарные растворы состоящие из абсорбента (бромистый литий, вода, нитрат лития и др.) и рабочего тела (вода, аммиак, дихлорметан и др.), имеющие неодинаковые температуры кипения и изменяющие температуру при смесеобразовании.

Принципиальная схема абсорбционного теплового насоса представлена на рис. 5. Рабочее тело в виде жидкости при низком давлении поступает в испаритель 1, где за счёт подвода низкотемпературной теплоты Q_n испаряется (кипит). Пар отсасывается в абсорбер 2 и поглощается абсорбентом, при этом выделяется теплота $Q_{аб}$ (так как увеличивается температура смеси), которая отводится сетевой водой. Образующаяся смесь рабочего тела и абсорбента (слабый раствор) с помощью насоса 4 перекачивается в генератор 6, подогреваясь по пути в регенеративном теплообменнике 5 встречным потоком крепкого раствора абсорбента.



В генераторе 6 происходит выпаривание из раствора рабочего тела за счёт подвода дополнительной теплоты Q_2 на высоком температурном уровне t_2 . Крепкий раствор абсорбента из 1 генератора возвращается через теплообменник и дросселирующее устройство 3 в абсорбер, а рабочее тело в виде пара с температурой t_k поступает в конденсатор 7, где передаёт теплоту Q_k сетевой воде и конденсируется. После этого жидкое рабочее тело дросселируется в устройстве 3 до давления в испарителе и цикл повторяется.

Рис. 5. Принципиальная схема абсорбционного теплового насоса

В генераторе 6 происходит выпаривание из раствора рабочего тела за счёт подвода дополнительной теплоты Q_2 на высоком температурном уровне t_2 . Крепкий раствор абсорбента из 1 генератора возвращается через теплообменник и дросселирующее устройство 3 в абсорбер, а рабочее тело в виде пара с температурой t_k поступает в конденсатор 7, где передаёт теплоту Q_k сетевой воде и конденсируется. После этого жидкое рабочее тело дросселируется в устройстве 3 до давления в испарителе и цикл повторяется.

Коэффициент преобразования абсорбционных ТНУ составляет $\varphi = \frac{Q_{аб} + Q_k}{Q_Г} > 1$

$$\text{т.к. } Q_{аб} + Q_k = Q_Г + Q_u \quad (7)$$

Основным преимуществом абсорбционных ТНУ является отсутствие движущихся частей и затрат механической энергии (только незначительное на насос). Но для его работы требуется источник высокотемпературной теплоты: при $t_k = 70^\circ \text{C}$ температура подводимой теплоты составляет $t_Г = 150^\circ \text{C}$.

1.3 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

1.3.1 КРАТКИЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплоснабжение в условиях России с её продолжительными и достаточно суровыми зимами требует весьма больших затрат топлива, которые превосходят почти в два раза затраты на электроснабжение.

Основными недостатками традиционных источников теплоснабжения являются низкая энергетическая (особенно на малых котельных), экономическая и экологическая эффективность (традиционное теплоснабжение является одним из основных источников загрязнения крупных городов).

Кроме того, высокие транспортные тарифы на доставку энергоносителей усугубляют негативные факторы, присущие традиционному теплоснабжению. Нельзя не учитывать и такой серьезный термодинамический недостаток, как низкий энергетический *КПД* использования химической энергии топлива для систем теплоснабжения, который в системах отопления составляет 6-10%.

Чрезвычайно велики затраты на тепловые сети, которые, самый ненадежный элемент в системах централизованного теплоснабжения.

Удельная аварийность для трубопроводов диаметром *1400 мм* составляет *одну аварию* в год на *1 км длины*, а для труб меньшего диаметра - *шесть аварий*. Если учесть, что общая протяжённость тепловых сетей в России доставляет *650 тыс. км*, а в полной замене нуждаются *300 тыс. км*, становится очевидно, что строительство и поддержание тепловых сетей в рабочем состоянии требуют затрат, соизмеримых со стоимостью *ТЭЦ* или районных котельных.

Перечисленные негативные факторы традиционного теплоснабжения создают условия для использования одновременно и нетрадиционных методов теплоснабжения.

ТН в силу того, что они избавлены от большинства перечисленных недостатков централизованного теплоснабжения, нашли широкое применение за рубежом. Массовое производство *ТН* налажено практически во всех развитых странах. По прогнозу Мирового энергетического комитета к 2020 г. в передовых странах доля отопления и горячего водоснабжения с помощью тепловых насосов составит 75 % .

Принцип работы ТН вытекает из работ Карно и описания цикла Карно, опубликованного в его диссертации в 1824 г. Практическую теплонасосную систему предложил Вильям Томсон (лорд Кельвин) в 1852 г. Она была названа умножитель теплоты и показывала, как можно холодильную машину эффективно использовать для целей отопления.

В обосновании своего предложения, уже тогда Томсон указывает, что ограниченность энергетических ресурсов не позволит непрерывно сжигать топливо в печах для отопления и что его умножитель теплоты будет потреблять меньше топлива, чем обычные печи. Предложенный Томсоном тепловой насос (*ТН*) использовал воздух в качестве рабочего тела. Окружающий воздух засасывался в цилиндр, расширялся охлаждаясь от этого, а затем проходил теплообменник, где нагревался наружным воздухом. После сжатия до атмосферного давления воздух из цилиндра поступает в обогреваемое помещение, будучи нагретым до температуры выше окружающей. Фактически подобная машина была реализована в Швейцарии. Томсон заявил, что его *ТН* способен давать необходимую теплоту при использовании только 3% энергии, затрачиваемой на отопление.

Дальнейшее свое развитие теплонасосные установки получили только в 20 и 30-х гг. XX в., когда в Англии была создана первая установка предназначенная для отопления и горячего водоснабжения с использованием теплоты окружающего воздуха.

После этого начались работы в США, приведшие к созданию нескольких демонстрационных установок.[2.с.52]

Первая крупная ТНУ в Европе была введена в действие Цюрихе в 1938-1939 гг. В ней использовалась теплота речной воды, ротационный компрессор и хладогент. Она обеспечивала отопление ратуши водой стемпера-

турой $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ при мощности 175 кВт . Имелась система аккумулирования теплоты электронагревателем для покрытия пиковой нагрузки. В летние месяцы установка работала на охлаждение. В период с 1939 по 1945 года было создано ещё 9 подобных установок с целью сокращения потребления угля в стране. Некоторые из них успешно проработали более 30 лет.

Итак, в 1824 г. Карно впервые использовал термодинамический цикл для описания процесса, и этот цикл остается фундаментальной основой для сравнения с ним и оценки эффективности ТН.

ТН можно рассматривать как обращённую тепловую машину. Тепловая машина получает теплоту высокотемпературного источника и сбрасывает его при низкой температуре, отдавая полезную работу.

ТН требует затраты работы для получения теплоты при низкой температуре и отдачи его при более высокой.

В настоящее время эксплуатируется большое число ТНУ, отличающихся по тепловым схемам, рабочим телам и по используемому оборудованию.

По обозначению различных классов установок, в известных нам литературных источниках, нет единого установившегося мнения, встречаются различные обозначения и термины.

1.3.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Классификацию теплонасосных установок (*ТНУ*) следует осуществлять прежде всего по циклам их работы.

Классификация основных типов тепловых насосов: - воздушно - компрессорные; - с механической компрессией пара (парокомпрессионный цикл); - абсорбционные; - основанные на использовании эффекта Ранка; - основанные на использовании двойного цикла Ренкина; - работающие по циклу Стерлинга; - работающие по циклу Брайтона; термоэлектрические; - обращенный топливный элемент; - использованием теплоты плавления; - использованием механохимического эффекта; - использованием магнетокалорического эффекта.

Все *ТН* по принципу взаимодействия рабочих тел можно объединить в две основные группы:

- открытого цикла*, где рабочее тело забирается и отдаётся во внешнюю среду;
- замкнутого цикла*, где рабочее тело движется по замкнутому контуру, взаимодействуя с источником и потребителем теплоты лишь посредством теплообмена в аппаратах поверхностного типа;
- различают одно и двухступенчатые и каскадные ТНУ*, а также ТНУ с последовательным соединением по нагреваемому и охлаждаемому теплоносителям с противоточным их движением.
- по назначению: стационарные и передвижные*, для аккумулирования тепловой энергии и её транспорта и утилизации сбросной теплоты;
- по производительности: крупные, средние, мелкие*;
- по температурному режиму: *высокотемпературные, среднетемпературные и низкотемпературные*;
- по режиму работы: *стационарные, нестационарные, непрерывные или циклические, нестационарные с аккумулятором тепловой энергии*;
- по виду холодильного агента: *воздушные, аммиачные, фреоновые, на смесях холодильных агентов*;
- по виду потребляемой энергии: *с приводом от электродвигателя или газовой турбины, работающие на вторичных энергоресурсах и др.*

1.4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В СИСТЕМАХ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

ТН - термодинамическая установка, в которой теплота от низкопотенциального источника передаётся потребителю при более высокой температуре. При этом затрачивается механическая энергия.

Большую перспективу представляет использование *ТН* в системах горячего водоснабжения (*ГВС*) зданий. В годовом цикле на *ГВС* расходуется примерно столько же теплоты, как и на отопление зданий.

Примером использования *ТН* для *ГВС*, является жилой дом, построенный в Москве в Никулино-2. В этом здании в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии используется теплота земли и теплота удаляемого вентиляционного воздуха.

Подробно эта система будет рассмотрена ниже.

Источником низкопотенциальной тепловой энергии может быть теплота как естественного, так и искусственного происхождения. В качестве естественных источников низкопотенциальной теплоты могут быть использованы:

- *теплота земли* (теплота грунта);
- *подземные воды* (грунтовые, артезианские, термальные).

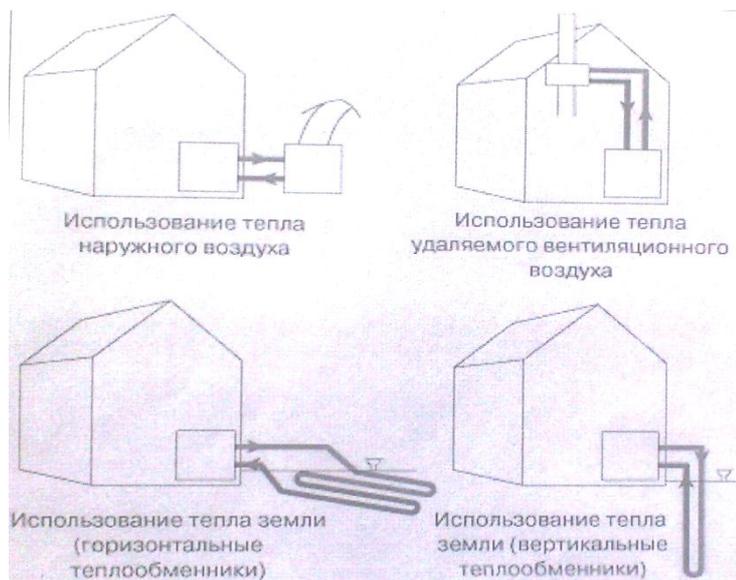


Рис. 6. Некоторые возможные источники низкопотенциальной тепловой энергии

1.5 ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДУХА

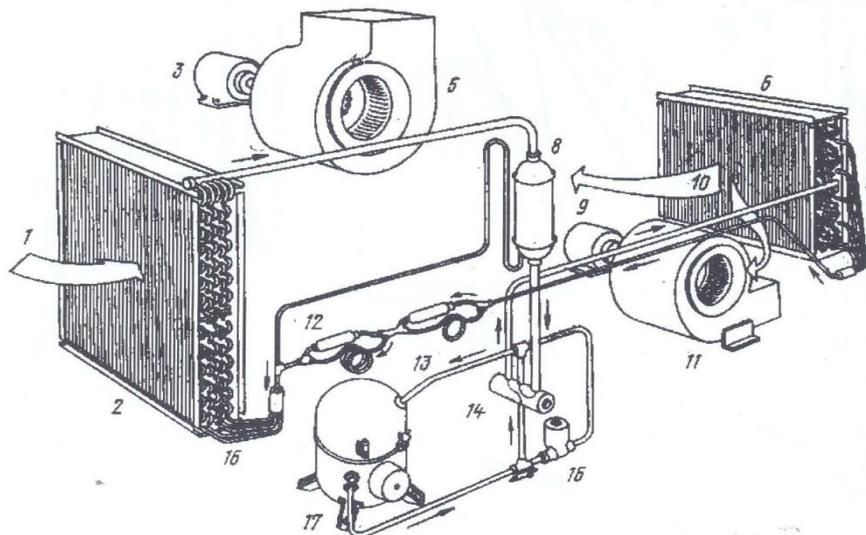


Рис.7. Схема домашнего теплового насоса типа воздух-воздух

1-наружный воздух; 2-испаритель; 3-двигатель вентилятора; 4-выброс охлажденного воздуха; 5-вентилятор наружного воздуха; 6-конденсатор; 7-холодный воздух из комнаты; 8-регулятор расхода; 9-двигатель вентилятора; 10-нагретый воздух в комнату; 11-вентилятор внутреннего воздуха; 12-обратные клапаны; 13-капилляры; 14-распределительный клапан; 15-клапан разгрузки компрессора; 16-распределитель потока; 17-компрессор.

Наибольшее распространение получили *ТН с воздухом в качестве источника теплоты в системах отопления. В основном воздух же является и тепловым стоком.*

Типичный домашний воздушно-воздушный *ТН*, поступивший в продажу в 60-е годы, показан на рис.2.

Наружный воздух прогоняется через оребрѐнные трубки испарителя, внутри которых циркулирует рабочее тело. Подобным же образом теплота отводится от конденсатора к воздуху внутри дома. В *ТН*, все компоненты можно собрать в один агрегат либо сделать установку раздельной, когда конденсатор расположен на значительном расстоянии от испарителя.

Как источник теплоты воздух обладает рядом недостатков, поэтому требуется тщательная оптимизация конструкции в зависимости от места установки, где температура воздуха может быть существенно различной. Характеристики *ТН* и в особенности КОП уменьшаются по мере увеличения разности температур испарителя и конденсатора. Это оказывает особенно неблагоприятное влияние на *ТН* с воздушным источником теплоты. По мере снижения температуры окружающего воздуха требуемое количество теплоты для отопления повышается, но способность *ТН* поддерживать даже постоянную тепловую мощность существенно снижается.

Дополнительный нагрев. Стоимость *ТН* с любым источником теплоты заметно выше, чем обычной центральной котельной. Чем большую долю покрывает *ТН* в домашней тепловой нагрузке, тем выше разница в капиталовложениях, поэтому *ТН*, как правило, рассчитываются лишь на часть годовой тепловой нагрузки, а оставшуюся часть даёт дополнительный нагреватель, чаще всего электрический или на органическом топливе. Выбор между ними определяется соотношением капитальных и эксплуатационных затрат. Если *ТН* обеспечивает и воздушное кондиционирование летом, его размеры и мощность могут диктоваться именно этим применением.

Наиболее эффективным способом управления дополнительным нагреванием являются **внутренний и внешний термостаты**. Внутренний термостат *I* имеет две ступени, из них первая управляет только *ТН*. Вторая ступень управления связана с внешним термостатом и включает дополнительное нагревание только тогда, когда окружающая температура падает ниже точки баланса.

Принцип действия паракомпрессионных *ТН*, выпускаемых АОЗТ "Тритон Лтд", заключается в следующем (см.рис.8)

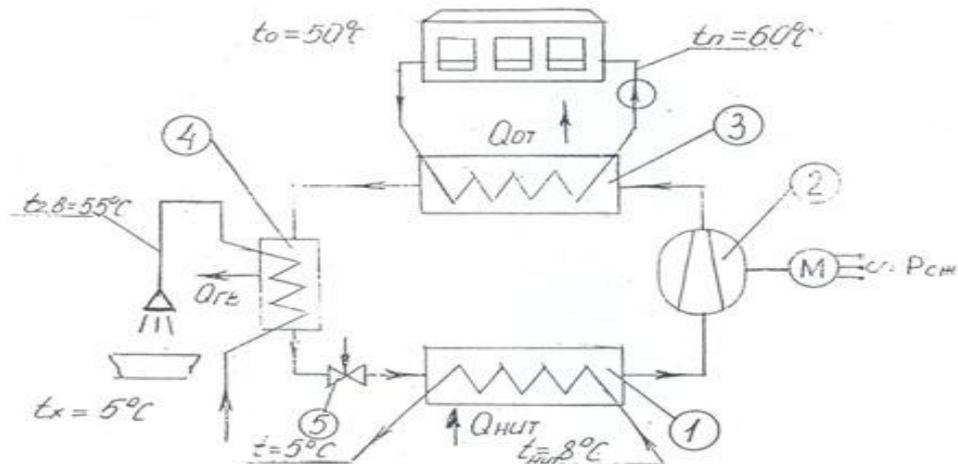


Рис. 8. Принцип действия паракомпрессионной теплонасосной установки

1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – предохранитель; 5 – дроссельное устройство.

В кожухотрубный испаритель *1* поступает вода от низкопотенциального источника (грунтовые, артезианские, термальные воды; вода рек, озѐр, морей, систем оборотного водоснабжения промпредприятий и тд.).

За счёт теплоты охлаждения этой воды в испарителе происходит процесс кипения хладагента - фреона, пары которого поступают в компрессор *2*, где происходит их сжатие с повышением температуры. Сжатые пары фреона затем конденсируются в конденсаторе *3*, отдавая теплоту воде системы отопления. Сконденсировавшийся нагретый жидкий фреон в предохранителе *4* отдаёт свою теплоту воде, поступающей на горячее водо-

снабжение (55°C). Термодинамический цикл *ТН* завершается дросселированием охлаждённого жидкого фреона при помощи дроссельного устройства *5* с последующим его возвратом в испаритель *1*.

Конструкция теплообменных аппаратов *ТН* исключает попадание фреона в водяные магистрали систем отопления, городского водоснабжения.

1.6 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Грунтовые теплообменники в вертикальных скважинах в последние 10-15 лет широко применяются в качестве низкотемпературного источника теплоты для систем отопления и горячего водоснабжения с использованием *ТН*. Этот экологически чистый источник теплоты достаточно часто используется, например, в Швейцарии, где в настоящее время эксплуатируется около четырех тысяч таких установок.

Автоматизированная система управления *ТН* типа АТНУ рассчитана таким образом, чтобы он работал при оптимальных условиях с постоянным значением теплового потока, определяемым тепловым потоком от первичного теплоисточника, входной температурой высокотемпературного контура и массовой скоростью теплоносителя высокотемпературного контура. При снижении требуемого теплопотребления происходит отключение *ТН* до восстановления заданной температуры.

Если мощность грунтового теплообменника недостаточна для покрытия теплопотерь, то в высокотемпературном контуре должен включаться пиковый доводчик.

Результаты показали, что извлекаемая из грунта тепловая энергия линейно зависит от логарифма рабочей длины теплообменника. При этих условиях (фильтрационная скорость 10 м/сут) для получения из грунта 5-6 кВт тепловой мощности необходимая глубина теплообменника составит 50-60 м. Конструктивные особенности АТНУ требуют определенных условий для расхода теплоносителя высокотемпературного контура.

Минимальный расход теплоносителя в контуре отопления должен составлять 0,3 кг/с ($1 \text{ м}^3/\text{ч}$).

При меньших объёмах в системе начнется накопление теплоты и, как показали испытания на натурной установке, это приведёт к повышению температуры и давления хладагента, ухудшению работы испарителя и уменьшению съёма теплоты в грунтовой теплообменнике. И хотя при этом температура теплоносителя высокотемпературного контура повышается, эффективность работы всей схемы, определяемая отопительным коэффициентом, падает.

Изучение грунта как источника теплоты, проведённое в Европе показало, что тепловой поток к испарителю из грунта составляет 20-25 Вт/м, минимальное значение для Европы составляет 10 Вт/м, максимальное 50-60 Вт/м.

Оптимальная глубина и шаг размещения трубок составляют соответственно 1,5 и 2 м. В некоторых случаях из-за взаимного влияния предел 2 м расширяется. Трубки можно размещать на меньшей глубине, но при этом производительность теплового насоса может снижаться на 5% на каждый градус понижения температуры испарителя.

Помимо варианта испарения непосредственно хладагента можно использовать промежуточный теплоноситель-рассол, циркулирующий по трубкам в грунте и отдающий теплоту хладагенту в специальном теплообменнике. Средняя температура рассола зимой составляет -3°C . Если содержание воды в почве велико, показатели повышаются благодаря увеличению теплопроводности и хорошему контакту с трубками. Большая концентрация в почве гравия ухудшает характеристики.

Была обнаружена и такая интересная деталь. Минимум температуры грунта всегда выше, чем воздуха, и достигается двумя месяцами позднее, когда требуемая мощность отопления снижается.

Вертикальные трубы занимают меньше места и позволяют в некотором смысле использовать теплоту, аккумулированную в летние месяцы, что даёт им экономические преимущества. Исследования вертикальных U-

образных трубок показали возможность значительного извлечения теплоты. Горизонтальный испаритель с площади $150-200 \text{ м}^2$ позволяет получить 12 кВт теплоты. U-образные трубки, размещённые в скважинах диаметром 127 мм и глубиной 8 м , позволили получить 12 кВт только из двух скважин. U-образные трубки снижают требуемую поверхность грунта в $10-20$ раз по сравнению с горизонтальными.

Несмотря на сравнительную дешевизну отечественных тепловых насосов по сравнению с зарубежными при современном слабом финансовом положении предприятий, внедрение тепловых насосов встречает определённые трудности. Не последнюю роль играет большая новизна и непривычность этой техники для наших потребителей.

Эти проблемы преодолевались за рубежом путём предоставления в течение нескольких лет льгот предприятиями, внедряющим *ТНУ*. В большинстве стран Западной Европы на прибыль, получаемую от применения тепловых насосов, устанавливался меньший налог, а в некоторых странах делались прямые финансовые дотации.

Кроме использования теплоты грунта наиболее привлекательным для использования в домашних приложениях теплового насоса является «бесплатный» источник теплоты для создания комфортных условий внутри дома – воздух.

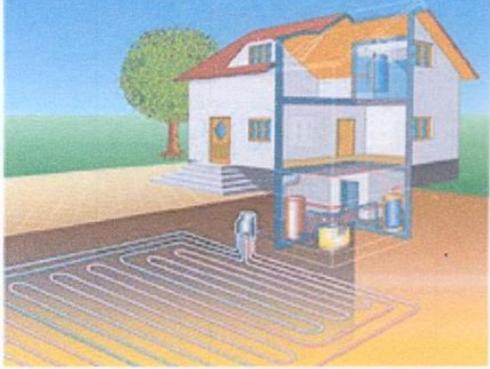
Он общедоступен и привлёк наибольшее внимание в массовом производстве. В тех случаях, когда доступна вода, она имеет несколько преимуществ по сравнению с воздухом. Активно исследуется использование сбросной теплоты или солнечных коллекторов, к которым проявляется интерес во всём мире [1стр. 51]

Наибольшее распространение получили ТН с воздухом в качестве источника теплоты с самого начала их применения в домашних условиях. В основном воздух является и тепловым стоком.

1.7 ТИПЫ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Эффективность применения *ТН* в первую очередь зависит от того, откуда у Вас есть возможность черпать низкотемпературную теплоту, во вторую – от способа обогрева вашего дома (водой или воздухом). Дело в том, что *ТН* работает как перевалочная база между двумя тепловыми контурами: одним, нагревающим, на входе (на стороне испарителя) и другим, отопительным, на выходе (конденсатор). По виду теплоносителя во входном и выходном контурах *ТН* подразделяют на виды: “грунт-вода”, “вода-вода”, “воздух-вода” и т.п.

Таблица.2 Типы тепловых насосов

Внешний контур (откуда тепловой насос берёт энергию)	Внутренний контур (чем обогревается/ охлаждается дом)	Тип теплового насоса
Грунт	Вода	 <p>Тепловой насос «грунт-вода»</p>

Вода	Вода	 <p>Тепловой насос «вода-вода»</p>
Воздух	Вода	 <p>Тепловой насос «воздух-вода»</p>
Грунт	Воздух	 <p>Тепловой насос «грунт-воздух»</p>
Вода	Воздух	 <p>Тепловой насос «вода-воздух»</p>

Воздух	Воздух	 <p data-bbox="887 369 1369 448">Тепловой насос «воздух-воздух»</p> <p data-bbox="991 459 1369 492">(по сути обычный кондиционер)</p>
--------	--------	--

Таблица 3. Характеристики выпускаемых тепловых насосов (ТН)

Марка ТН	Потребляемая эл.мощность, кВт	Номинальная вых.мощность, (теплопроизводи тельность) кВт	Отапливаемый объект, кв.-квартир ⁺ , кт.-коттеджей, площадь, кв.м	Габариты [■] , м; Масса, кг
НТП 15-130	3-60	15-150	Коттедж > 150 м ²	-
НТП - 300	90	300 [”]	70-75 кв., 15 кт, 3265 м ²	1.8x4.5x1.7; 4300
НТВ - 500	150	500 [”]	100-105 кв., 25 кт, 4520 м ²	1.8x4.7x1.8; 9700
НТВ - 1000	300	1000 [“]	200-250 кв., 10125 м ²	2.2x5.0x2.0; 15000
НТВ - 2200	650	2200 [“]	400-450 кв. Пром. объект. 19125 м ²	4.5x5.2x3.3; 22000

+ - квартиры двухкомнатные. ■ - габариты: (ширина)x(длина)x(высота)

“Потребляемая мощность электроэнергии из сети и теплопроизводительность даны при температурах источника тепла 8 °С и теплоснабжения 60 °С.

Указанные марки ТН выпускает НПФ «Тритон-Лтд» г.Н.Новгород.

Эффективность ТН определяется коэффициентом преобразования (КОП). На 1 кВт затраченной электроэнергии потребитель получит от 3.4 до 7.8 кВт тепловой энергии (КОН = 3.4- 7.8) в зависимости от температуры охлаждаемого источника. Чем выше температура, тем выше эффективность. Например, при охлаждении воды (артезианской, реки, моря, промышленных стоков, очистных сооружений и т.п.) с температурой Т коэффициент эффективности равен значениям, приведенным в таблице.

Т(°С)	5	10	15	20	25	30	35	40
КОП	2,5	3,75	4,25	4,78	5,5	6,10	6,86	7,8

Таким образом, исходя из сложившегося соотношения цен на электрическую и тепловую энергию, стоимость выработанного ТН теплоты (в указанных пределах КОП) будет от 1.6 до 3.7 раза ниже стоимости теплоснабжения от котельной.

1.7 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что называется тепловым насосом?
2. Определение коэффициента преобразования энергии (КПЭ) в ТН.
3. Определение коэффициента преобразования теплоты (КПТ) в ТН.
4. В каких тепловых насосах используется (КПЭ), а в каких (КПТ)?
5. За счёт чего энергия низкого теплового потенциала передаётся на более высокий температурный уровень?
6. Опишите цикл паровой компрессионной ТНУ.
7. Что такое двухцелевая ТНУ?
8. От каких параметров и как зависит КПЭ теплового насоса?
9. Опишите как работает абсорбционная ТНУ.
10. За счёт чего энергия низкого теплового потенциала передаётся на более высокий температурный уровень в абсорбционной ТНУ?
11. Что применяется в качестве низкотемпературных источников в ТНУ?
12. Целесообразно ли использовать в качестве температурного источника в ТНУ?

1.8 Используемые источники

1. Васильев Г.П., Крундышев Н.С. Энергоэффективная сельская школа в Ярославской области // АВОК. 2002. №5.
2. Васильев Г.П. Энергоэффективные здания с теплонасосными системами теплоснабжения // ЖКХ. 2002. №12.
3. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии Москомархитектура. ГУП «НИАЦ», 2001.
4. Энергоэффективный жилой дом в Москве // АВОК. 1999. №4.
5. Васильев Г.П. Энергоэффективный экспериментальный жилой дом в микрорайоне Никулино-2 // АВОК. 2002. №4.
6. Гохштейн Д.П. Использование отходов тепла в тепловых насосах. – М. ...Л.: Госэнергоиздат, 1955.-80с.: ил.
7. Коплан А.М. Тепловые насосы.- Книга 4, выпуск 1/А.М.
8. Каплан А.М., Зысин В.А., под ред. к.т.н. Л.А.Шубенко.- М. ...Л.: ГНТИ Машиностроит. Литературы, 1947.- 40с.:ил.
9. Даисевский М.Г. Энергетическая эффективность тепловых насосов для жилых зданий (США).- Строительство и архитектура. Серия 9. Выпуск 16
10. Инженерное обеспечение объектов строительства. Экспресс – информация. – М.: ВНИИС Госстроя СССР, 1984. – 11с.

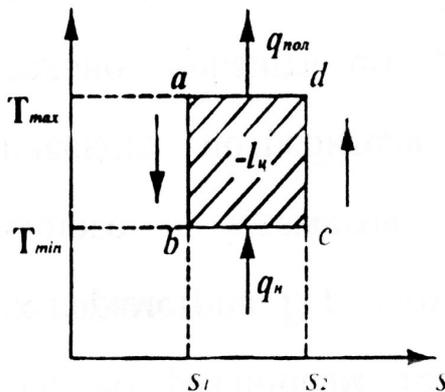
1.9 Дополнительные источники

11. Таблицы и диаграммы термодинамических свойств фреонов 12, 13, 22. М.: ВНИХИ, 1971.90 с.
12. Чоджой М.Х. Энергосбережение в промышленности/ Металлургия: 1982. 270 с.
13. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов. М.: Энергия, 1979.
14. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоиздат, 1981. 319 с.
15. Waste Power and Heat Plant in Savenas, Goteborg. Проспект.
16. Попов А.В., Система охлаждения и утилизации тепла дымовых газов мусоросжигающих заводов// В сб. н/т. Работ «Очистка и обезвреживание дымовых газов из установок, сжигающих отходы и мусор» под ред. С.В. Алексеенко и А.С. Басина. Новосибирск: 1999. СОРАН, с. 121-131.
17. Бугузов В.А. Перспективы применения тепловых насосов // Промышленная энергетика. 2005. № 10. С 5-7.
18. Петин Ю.М. Тепловые насосы в теплоснабжении// Новости теплоснабжения. 2001. №11. С.42-43.
19. Петин Ю.М. Опыт десятилетнего производства тепловых насосов, осуществляемый предприятием ЗАО «Энергия», и анализ их эксплуатации на территории российских регионов. Проспект.
20. Кузнецов Б.Б., Захаров В.А. Опыт применения теплонасосной станции для отопления Велижанского водозабора// Новости теплоснабжения. 2001.
21. Гершкович В.Ф. Опыт применения в Киеве теплового насоса «воздуховода» для отопления офисного здания// Новости теплоснабжения. 2001. №11(15). С.38-41.
22. Сеппанен О. Европейская директива по использованию возобновляемых источников энергии // Энергосбережение. 2009. №3. с. 66-68.
23. Коптюг В.А. Конференция ООН по окружающей среде и развитию, июнь 1992 (аналитический обзор). Новосибирск, СОРАН: 1992.

1.10 ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

П.А. ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ (21,с.15...40)

П.А.1.Основные понятия



Тепловым насосом называется устройство, которое передаёт теплоту более низкого потенциала на более высокий за счёт затраты энергии ещё более высокого потенциала.

Теоретически такая возможность из обратного цикла Карно $abcd$ (рис.1). Тепловой насос и холодильная установка работают по одинаковым циклам, но у них разные цели, а следовательно - уровни температур.

Задача холодильной установки – отобрать теплоту q_n от низкотемпературного источника (рис.1), а задача *ТНУ* - передавать эту теплоту на более высокий уровень вместе с затраченной для этого энергией: $q_n+l_ц$

Если имеем в пруду летом воду с температурой $20\text{ }^\circ\text{C}$, а для горячего водоснабжения нужна вода с температурой $65\text{ }^\circ\text{C}$, то с помощью *ТН* можно использовать прудовую воду для горячего водоснабжения. Это значительно выгоднее, чем просто нагревать воду от 20 до $65\text{ }^\circ\text{C}$ электричеством.

Для обратного цикла Карно, при адиабатном расширении ab температура рабочего тела уменьшается от T_{max} до T_{min} . В процессе bc оно при постоянной температуре T_{min} расширяется, забирая теплоту q_n от низкотемпературного источника. В TS -диаграмме эта теплота изображается площадью s_1bcs_2 .

В процессе cd рабочее тело подвергается адиабатному сжатию, в результате чего его температура повышается от T_{min} до T_{max} . Наконец, после изотермического сжатия da при температуре T_{max} рабочее тело возвращается в исходное состояние a , отдавая в процессе da теплоту $q_{пол}$ высокотемпературному источнику (потребителю).

Эта теплота изображается в TS -диаграмме площадью s_1bcs_2 , а работа $l_ц$ затраченная на перенос теплоты от низкотемпературного источника к потребителю (эквивалентная соответствующей теплоте) - площадью цикла $abcd$.

П.А.2 .Коэффициент преобразования энергии

Работа *ТН*, на привод которого затрачивается механическая или электрическая энергия, характеризуется коэффициентом преобразования энергии (*КПЭ*).

Коэффициент преобразования энергии есть отношение количества теплоты, отданной потребителю, к количеству потребленной механической энергии.

Для обратного цикла Карно

$$\text{КПЭ} = \frac{q_{пол}}{l_ц} = \frac{T_{max}(S_2 - S_1)}{(T_{max} - T_{min})(S_2 - S_1)} = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{1}{1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}} \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что *КПЭ* увеличивается с увеличением отношения T_{min} / T_{max} .

Т.е. чем ближе температура низкотемпературного источника T_{min} к необходимой температуре теплоносителя (например, горячей воды в системе *ГВС*) T_{max} , тем больше эффект от применения *ТН*.

При $T_{min}=273+20=293\text{ К}$ и $T_{max}=273+65=338\text{ К}$ $КПЭ=1/(1-293/338)=7,5$.

На прямой электронагрев 1кг воды от 20 до 65 °С ($\delta t=45^\circ\text{С}$) пришлось бы затратить $q_{нагр}=c_p \delta t = 4,187 \cdot 45 = 188$ кДж/кг энергии (здесь c_p - теплоёмкость воды). С учётом энтальпии исходной воды, равной $4,187 \cdot 20 \approx 84$ кДж/кг, потребитель получит $q_{пол}=188+84=272$ кДж/кг теплоты. Использование идеального ТН (работающего по обратному циклу Карно) позволяет передать потребителю то же количество теплоты, затратив всего $q_{пол}/КПЭ=272/7,5=36$ кДж/кг электроэнергии, т.е. в 5 раз меньше, чем при прямом нагреве. Остальная теплота будет получена от низкотемпературного источника.

Поскольку КПЭ возрастает с уменьшением T_{max} , системы отопления и горячего водоснабжения, где используются ТНУ, целесообразно проектировать так, чтобы температура нагрева теплоносителя в них не превышала 50 - 55 °С, в некоторых случаях до 63 °С.

П.А.3. Коэффициент преобразования теплоты

Наряду с КПЭ в теории ТН существует понятие *коэффициент преобразования теплоты (КПТ)*. Для того чтобы пояснить его смысл, рассмотрим совместно два процесса: получения энергии (скажем, на конденсационной электростанции (КЭС)) и использование её в ТНУ, рис.2.

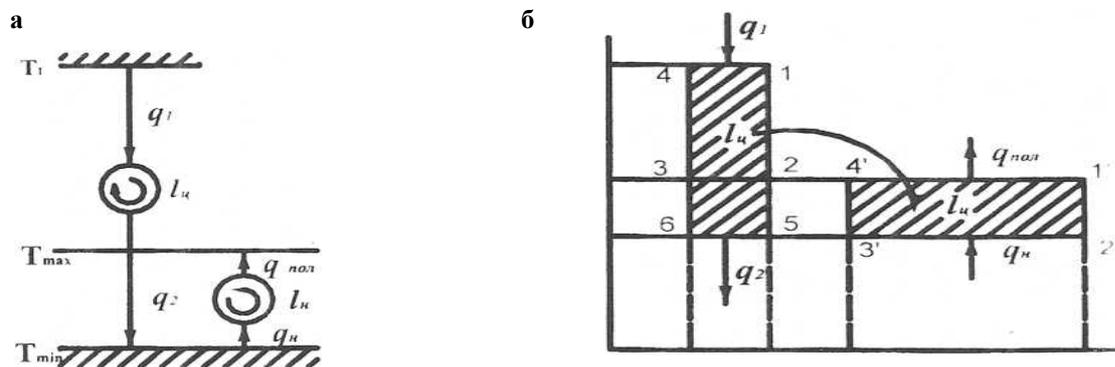


Рис.2. Схема получения электроэнергии на КЭС и использование ее в ТНУ (а) и изображение идеальных циклов в TS- диаграмме (б)

От горячего источника (за счёт сжигания топлива) отбирается теплота q_1 с температурой T_1 . Её можно использовать непосредственно для отопления, как это и делается в отопительных котельных. В этом случае полезная теплота будет равна площади $1S_3S_4A$.

Можно сделать иначе: осуществить прямой цикл между температурами T_1 и T_{min} , получив работу $l_{ц}$ от каждого килограмма рабочего тела. (Для простоты анализа мы оперируем на рисунке простейшими циклами - Карно). Теплота q_2 эквивалентна площади $5S_3S_4B$, будет при этом отдана холодному источнику, это - тепловые потери цикла. Затем всю полученную работу можно затратить на привод теплового насоса, который возьмёт от низкотемпературного источника теплоту $q_{н}$, эквивалентную площади $2'S_3S_43'$, и даст потребителю теплоту $q_{пол}$ эквивалентную площади $1'S_1S_24'$.

По определению $КПЭ = q_{пол}/l_{ц}$ а термический КПД цикла $\eta_t = l_{ц}/q_1$. Следовательно, отношение количества переданной потребителю теплоты $q_{пол}$ к количеству располагаемой теплоты q_1 будет равно

$$\frac{q_{пол}}{q_1} = \frac{q_{пол}}{l_{ц}} \cdot \frac{l_{ц}}{q_1} = КПЭ \cdot \eta_t = КПТ \quad (2)$$

Это произведение называется *коэффициентом преобразования теплоты*. Оно представляет собой отношение количества теплоты, переданной потребителю, к количеству теплоты более высокого потенциала, использованной в ТН.

Понятие КПТ применяется для ТНУ, в которых теплота низкого потенциала передаётся на более высо-

кий температурный уровень не с помощью использования механической (электрической) энергии, как в обратном цикле Карно на рис. 1, а непосредственно с помощью использования теплоты ещё более высокого потенциала. Такие *ТНУ* будут рассмотрены ниже.

Самый термодинамически невыгодный вариант - использовать эту работу (т.е. электроэнергию) в электрических отопительных приборах. В этом случае будет получена теплота, эквивалентная всего лишь площади цикла *1465*.

Соотношения (2) верны и в том случае, если температуры холодного источника в цикле теплового двигателя и низкотемпературного источника в цикле теплового насоса различны (их равенство нигде при выводе не предполагалось). Например, конденсатор в паросиловом цикле *ТЭС* охлаждается обратной водой с температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в тепловом насосе, установленном в бальнеологическом курорте, потребляющем электроэнергию от этой *ТЭС*, используется вода с температурой $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ из ванного корпуса.

Поскольку $\eta_i < 1$, то *КПТ* всегда меньше, чем *КПЭ*. Смысл этого очевиден. В обоих случаях мы относим количество полученной потребителем теплоты к количеству затраченной на работу теплового насоса энергии, а т.к. теплота в любом цикле не может быть полностью превращена в электроэнергию, её приходится затрачивать больше, чем электроэнергии. Более того, поскольку коэффициент полезного действия η_i преобразования теплоты в работу уменьшается с уменьшением температуры горячего источника T_1 (для цикла Карно, как известно, $\eta_i = 1 - T_2/T_1$, где T_2 - температура холодного источника), то величина коэффициента преобразования теплоты также будет тем меньше, чем ниже потенциал теплоты, используемой для работы в *ТНУ*.

Теоретически используя продукты сгорания непосредственно сжигаемого топлива с температурой $1000\text{-}2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в качестве горячего источника, можно получить значительно большую величину *КПТ*, чем, например, на отбираемом из турбины паре с температурой $200\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Правда, на практике эти преимущества не всегда удаётся реализовать.

Если *ТН* получает электроэнергию не от *КЭС*, а от *ТЭЦ*, электрический *КПД* которой ниже, чем у *КЭС*, из-за более высоких параметров за турбиной, то формально по формуле (2) коэффициент преобразования теплоты будет ниже. Однако фактически использование теплоты горячего источника в этом случае будет ниже, чем в случае *КЭС*, поскольку теплота выходящего из турбины *ТЭЦ* пара тоже используется потребителем. Просто она не включается в полезную теплоту *ТН* (идёт, так сказать, «по другой статье»). В чисто конденсационной станции эта теплота q_2 (рис.2, а) выбрасывается холодному источнику.

Выше приведены идеальные рассуждения. Реальные условия, естественно, отличаются от них. Во-первых, цикл Карно нигде не реализуется. Коэффициенты преобразования энергии у реальных *ТН* примерно в 2 раза ниже, чем у соответствующих обратных циклов Карно, в том числе и из-за различных внутренних потерь энергии и эксергии в теплообменниках (из-за разности температур), в двигателе и т.д.

Во-вторых, это только термодинамический анализ. Конечный выбор системы отопления определяется экономикой, т.е. стоимостью оборудования, топлива, тарифами на электроэнергию и т.д. Экономические расчёты могут внести очень серьезные коррективы к выводам, полученным на основе термодинамического анализа.

П.А.4. Паровая компрессионная теплонасосная установка

Схема паровой *ТНУ* приведена на рис.3, а, а её цикл - на рис.3, б.

По сути дела это - почти обратный цикл Ренкина. Он же является и циклом холодильной установки, отличаясь от неё лишь функционально.

В холодильниках в качестве рабочего тела широко применяют аммиак NH_3 . Но он взрывоопасен, токсичен, коррозионно активен, против него выступают «зеленые». Температура его кипения при атмосферном давлении равна минус $33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ - это большое его преимущество для холодильных машин и морозильников, в рабочем пространстве которых надо поддерживать отрицательные температуры. *ТН* всегда работают в области положительных температур.

Поэтому в них сейчас чаще применяют фреоны $C_mH_nCl_kF_l$ - фторхлор- производные простейших предельных углеводородов.

Среди них есть неопасные, которые разрешены к применению, например монофтордихлорметан CHF_2Cl (в этом случае в метане CH_4 один атом водорода заменен атомом фтора, а два атома водорода - атомами хлора) или дифтормонохлорэтан $C_2F_2ClH_3$ (в этане C_2H_6 заменены три атома водорода). Все хладагенты называются обобщённым словом *хладон*. В каталоге хладонов первый из вышеназванных фреонов обозначается - **R21**, второй - **R142** (буква **R** от слова refrigeration - охлаждение). Аммиак в этом каталоге имеет индекс **R717**. У фреонов иногда вместо **R** ставят букву **Ф**: например **фреон-22** (дифтормонохлорметан CHF_2Cl).

Хладоны, применяемые в **ТНУ**, должны существовать в диапазоне рабочих температур **ТН** (T_2+T_4) на рис.3, б) в виде насыщенного пара не очень высокого и не очень низкого давления - иначе возникнут конструктивные сложности. В компрессионных **ТНУ** воду не применяют, т.к. при низких температурах она имеет слишком низкое давление насыщения (например ~ 5 кПа при $30^\circ C$) и соответственно огромный удельный объём (в холодильных установках её тем более не применяют, т.к. она замерзает при отрицательных температурах).

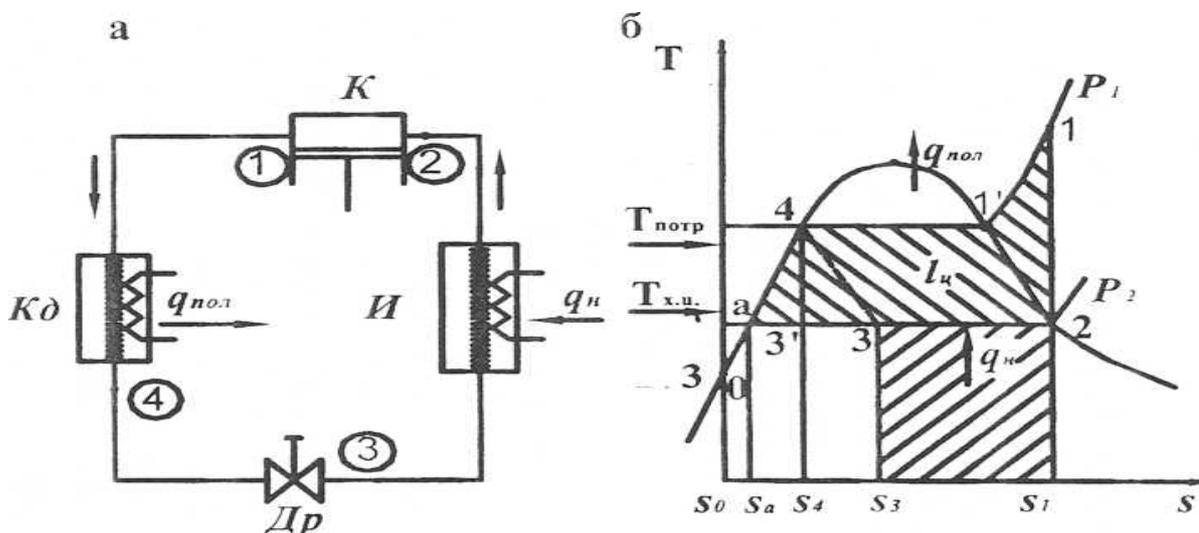


Рис.3. Принципиальная схема парового компрессионного теплового насоса (а) и его цикл в TS -координатах (б)

Идеальный цикл паровой компрессионной **ТНУ**-осуществляется следующим образом. В компрессоре **К** насыщенный пар хладона сжимается по адиабате **21**, становясь перегретым. Из компрессора пар поступает в конденсатор **Кд**, где сначала охлаждается до температуры насыщения (линия **11'**), а затем конденсируется (линия **1'4**),

Выделяющаяся при этом теплота $q_{пол}$ передаётся потребителю, реально имеющему температуру $T_{потр}$ чуть ниже температуры конденсации T_4 .

Из термодинамики известно, что количество переданной теплоты изображается в TS -диаграмме площадью под кривой процесса, следовательно теплота $q_{пол}$ эквивалентна площади $S_11'4S_4$.

Для того чтобы замкнуть цикл, т.е. вернуться в точку **2**, надо снизить давление с P_4 до P_2 (равного давлению $P_в$, т.к. давление насыщенного пара зависит только от температуры, которая по линии **a-2** не меняется). Для этого жидкий хладон дросселируют в дросселе **Др** по линии **4-3** (т.к. дросселирование - процесс неравновесный, линия **4-3** нанесена пунктиром, поскольку мы знаем только начальное (точка **4**) и конечное (точка **3**) равновесные состояния). При дросселировании хладона его давление падает, энтальпия остаётся постоянной, а энтропия - растёт (неравновесный процесс!). т.е. точка **3** лежит на линии **a-2** правее точки **4** (**4-3** - линия постоянной энтальпии).

Сильно влажный пар из дросселя поступает в испаритель **И**, где каждый килограмм его забирает от

низкотемпературного источника теплоту q_n - (площадь S_123S_3) на испарение содержащейся во влажном паре жидкости. Эта теплота вместе с теплотой, в которую превратилась работа компрессора, и передаётся потребителю в конденсаторе.

Реально температура низкотемпературного источника $T_{хн}$ должна быть, естественно, несколько выше температуры T_2 , чтобы обеспечить нужную интенсивность теплообмена.

Следовательно, за упрощение конструкции и связанный с этим неравновесный процесс 4-3 пришлось заплатить «недобором» теплоты от низкотемпературного источника, эквивалентной площади $S_a a3S_3$ при той же затраченной работе.

П.А.5. Коэффициент преобразования энергии паровой компрессионной ТНУ

Для потока из первого закона термодинамики известно, что работа адиабатного сжатия в компрессоре равна приращению энтальпии рабочего тела

в нём; $l_u = h_1 - h_2$. Количество теплоты, переданной рабочим телом в теплообменнике, равно уменьшению его энтальпии: $q_{пол} = h_1 - h_4$. Следовательно, коэффициент преобразования энергии в этом цикле

$$КПЭ = q_{пол} / l_u = (h_1 - h_4) / (h_1 - h_2) \quad (3)$$

Изменение энтальпии в изобарном процессе равно количеству отданной (или полученной) в этом процессе теплоты. Абсолютное значение энтальпии в рамках технической термодинамики определить нельзя. Поэтому точку начала отсчёта энтальпии выбирают произвольно.

Для воды принято $h = 0$ при $t = 0^\circ\text{C}$ в состоянии насыщения. Для хладонов такой выбор неудобен, поскольку в холодильных машинах их приходится использовать при минусовых температурах. Поэтому в источнике [10] энтальпия насыщенного жидкого фреона при $t = 0^\circ\text{C}$ была принята $h' = 100$ ккал/кг. Абсолютное значение энтропии в пределах технической термодинамики можно определить, используя 3-й закон термодинамики (теорему Нернста). Однако, поскольку в термодинамических расчётах оно не требуется, было произвольно принято, что энтропия насыщенного жидкого фреона при $t = 0^\circ\text{C}$, $S' = 1$ ккал/кг К.

При переходе к СИ точку начала отсчёта изменили: при $t = 0^\circ\text{C}$, $A' = 400$ кДж/кг, $S' = 4$ кДж/кг [10]. Обратите внимание, что при этом даже не пересчитали старые координаты точки отсчёта на новые (1 ккал = 4,186 кДж), а просто приняли новую точку отсчёта, поскольку она не имеет никакого значения.

В расчётах технической термодинамики используются лишь разности энтальпий и энтропий, а не их абсолютные значения.

С учётом сказанного, энтальпия h' точки 1 на рис.3, б эквивалентна площади $S_00a41'1S_1$ под соответствующим участком изобары P_1 (считаем, что, как и для воды, изобара жидкого хладона при давлении, превышающем давление насыщения, совпадает с нижней пограничной кривой - участок 04). Энтальпия точки 2 эквивалентна площади S_00a2S_1 под соответствующим участком изобары 2. Следовательно, разность $0a41'12a$ равная затраченной в цикле работе, эквивалентна площади $a41'12a$, аналогично работе, полученной в цикле Ренкина (площадь, заштрихованная слева вниз направо на рис. 3,б).

Количество теплоты $q_{пол}$ переданной потребителю в процессе 14, эквивалентно площади под кривой процесса $S_11'1'4S_4$. С другой стороны, оно же равно количеству теплоты, взятому от холодного источника q_n (площадь S_123S_3) плюс работа цикла l_u (площадь $12a41'$), т.е. сумме двух заштрихованных на рис.3,б площадей.

$$КПЭ \approx \frac{T_{нотр}}{T_{нотр} - T_{х.и.}} = \frac{\alpha}{1 - \frac{T_{х.и.}}{T_{нотр}}} \quad (1')$$

В оценочных расчётах значение КПЭ пароконпрессионной ТНУ можно принимать равным примерно 60% от КПЭ идеального обратного цикла Карно, осуществляемого при тех же температурах низкотемператур-

ного источника $T_{x.u}$ и потребителя $T_{номр}$ (формула (1)). Точнее где $a=0,45-0,55$ при мощности ТНУ (т.е. теплоте, отданной потребителю) $Q_{ТНУ} = 0,2-1,0$ МВт; $\alpha=0,55-0,6$ при $Q_{ТНУ} = 1,0-3$ МВт и $\alpha = 0,6-0,65$ при $Q_{ТНУ} > 3$ МВт.

Тогда необходимая мощность двигателя в теплонасосной установке

$$N_{ТНУ} \approx \frac{Q_{ТНУ}}{КПЭ} = \frac{Q_{НУЕ} (T_{номр} - T_{x.u.})}{\alpha T_{номр}} \quad (4)$$

Точный расчёт выполняется с учётом внутренних потерь в компрессоре и температурных напоров в теплообменниках. При этом используется диаграмма *lgp-S* [10], а не *h-s*, как при расчёте двигателей.

ПА-6 Способы повышения КПЭ ТНУ

В связи с широким распространением парокомпрессионных **ТНУ** (особенно за рубежом), используются все возможные способы для увеличения их **КПЭ**. Схема современной **ТНУ** выглядит значительно сложнее изображенной на рис.3, а. Есть два пути увеличения **ТНУ**.

1. Увеличение эффективности равновесного (идеального) цикла.

2. Уменьшение потерь от неравновесности (необратимости) процессов.

Первый путь связан с выбором оптимальных параметров цикла и соответствующего рабочего тела (хладона). Из формулы (1) видно, что величина **КПЭ** тем больше, чем выше T_{min} (в пределе равная $T_{x.u.}$) и ниже $T_{x.u.}$ (в пределе)

ПА-7 Двухцелевые теплонасосные установки

Выше говорилось, что наибольшее распространение **ТНУ** нашли в странах с мягким климатом, где они могут использоваться и для отопления помещений зимой, и для их кондиционирования летом. Рассмотрим работу таких установок чуть подробнее. Для предельного упрощения изложения будем считать, что зимой в задачу **ТНУ** входит нагрев воздуха не для отопления, а для вентиляции помещения. Разница заключается в том, что воздух, подаваемый приточной вентиляцией, должен быть нагрет до температуры помещения, а при воздушном отоплении температура воздуха должна быть больше (но не выше 40°C в соответствии с санитарными нормами и правилами (СанПиН)).

Зимой температура наружного воздуха равна, допустим, минус 10°C, а в помещении поддерживается плюс 20°C. В этом случае наружный воздух прогоняется через теплообменник-испаритель (см. рис.3,а), в котором кипит хладон при температуре минус 15°C. Необходимая для его испарения теплота забирается от воздуха, при этом он, естественно, охлаждается (обычно на несколько градусов), после чего выбрасывается обратно в атмосферу.

Пары хладона сжимаются в компрессоре, нагреваясь за счёт работы сжатия до 60°C. Далее они, как обычно, конденсируются в теплообменнике- конденсаторе, в котором выделяющаяся теплота затрачивается на нагрев прогоняемого через конденсатор наружного воздуха до температуры помещения (20°C), и с этой температурой он подаётся в помещение.

Летом температура наружного воздуха равна, допустим, 30°C, а в помещении нужно поддерживать те же 20°C. В этом случае наружный воздух прогоняют через испаритель, где он охлаждается с 30°C, скажем, до 15°C, после чего поступает в помещение, создавая в нем комфортные условия. В принципе сама **ТНУ** может работать в прежнем режиме, т.е. температура хладона в испарителе может быть по-прежнему равной минус 15°C. Тогда и в конденсаторе хладон будет иметь прежнюю температуру (60°C в нашем примере). Через конденсатор прогоняется наружный воздух, который забирает теплоту конденсации хладона, немного нагревается за счёт этого и выбрасывается в атмосферу. Таким образом, в этом случае переход с зимнего режима работы **ТНУ** на летний связан с простым переключением потоков воздуха шиберами. Зимой наружный воздух после

испарителя выбрасывается в атмосферу. а воздух, нагреваемый в конденсаторе, подается в помещение. Летом, наоборот, наружный воздух, охлажденный в испарителе, поступает в помещение. а воздух, охлаждающий хладон в конденсаторе (т.е. нагревающийся в нём), выбрасывается в атмосферу.

В принципе от описанной не отличается и работа двухцелевой *ТНУ* в том случае, если в зимнем режиме она работает для отопления. Различия могут быть лишь в деталях. Во-первых, при воздушном отоплении экономичнее нагревать в конденсаторе воздух, взятый из помещения (он теплее), а не из атмосферы. Во-вторых, в конденсаторе часто нагревают не воздух, а воду, которая подаётся затем в обычные приборы отопления. Поэтому реальные схемы часто оказываются сложнее описанных здесь простейших. Наконец, *ТНУ* может служить одновременно в качестве как холодильника, так и отопителя. Практически это может оказаться целесообразным в случаях, когда в технологическом процессе требуется охладить, например, поток жидкости (в частности, молока после пастеризации на крупном молокозаводе). Этот поток можно использовать в качестве низкотемпературного источника для отопления помещения с помощью *ТНУ*.

Все цифры в этом описании приведены ориентировочно. Конкретные температуры зависят от конкретных условий, детальной схемы *ТНУ* и т.д.

ПА-9 Низкотемпературные источники, используемые в ТНУ

Тепловой насос предназначен для использования «природной» теплоты, получение которой не связано с затратами топлива или иного вида энергии (наружный воздух, вода из водоёмов, грунт и т.д.), либо отбросной теплоты (вентиляционные выбросы, канализационные стоки и т.д.). Высказываемые иногда предложения использовать обратную воду в системе отопления в качестве низкотемпературного источника неграмотны. Дело в том, что воду, возвращаемую из отопительных приборов в котельную, снова нагревают до заданной температуры, чтобы направить её для отопления. Если мы отберём часть теплоты от обратной воды для *ТНУ*, то ровно столько теплоты придётся добавить в котельной, сжигая топливо. Никакого использования «бросовой» теплоты не будет.

В качестве низкотемпературного источника следует использовать только отбросную или природную теплоту. В системах отопления ни в коем случае нельзя считать низкотемпературным источником обратную воду.

По состоянию на 2001 г. в мире в системах теплоснабжения эксплуатировалось более 18 млн. крупных тепловых насосов [7]. В Швеции, например, их общая установленная мощность превысила 1200 МВт. Наибольшую одиночную мощность имеют, как правило, абсорбционные *ТНУ*, самая крупная из них (по состоянию на 1989 г.) выдает **320 МВт** теплоты для г. Стокгольма (Швеция). Она использует теплоту воды Балтийского моря с температурой зимой 4°C.

В России общая установленная тепловая мощность *ТНУ* составляет всего 65 МВт [7] (по состоянию на 2004 г.). Причём подавляющее большинство тепловых насосов-парокомпрессионные, несмотря на то, что *АТНУ* зачастую более эффективны, т.к. они не потребляют электроэнергию на привод компрессора (его нет) и имеют меньшие потери от неравновесности процессов.

Одной из причин такого положения является недостаточная информированность заинтересованных лиц, а зачастую и недостаточный уровень подготовки специалистов в этой области. По состоянию на 2005 г. серийно паро-компрессионные *ТНУ* теплопроизводительностью от 110 до 3000 кВт выпускало только ЗАО «Энергия» (г. Новосибирск) [8, 9], еще несколько предприятий выпускали относительно небольшие парокомпрессионные *ТНУ* по отдельным заказам. Упомянутая ООО «ОКБ Теплосибмаш» изготавливает достаточно мощные *АТНУ* по-видимому, тоже по отдельным заказам. Небольшие *АТНУ* тепловой мощностью 10-14 кВт по отдельным заказам выпускал ФГУП «Рыбинский завод приборостроения» [7].

Поэтому потребители вынуждены закупать импортное оборудование.

Стоимость *ТНУ*, выпускаемых ЗАО «Энергия» составляла в 2005 г. от 90 до 160 долларов США за

1 кВт установленной мощности (чем мощнее установка, тем меньше удельная стоимость долл/кВт). Зарубежные компрессорные *ТНУ* стоили в 1999 г. по данным [10] **160-180** долл/кВт и более. Для сравнения укажем, что отопительная котельная с монтажом под ключ, мощность которой сравнима с мощностью *ТНУ*, сейчас стоит около **70** долл/кВт.

Достаточно подробно описан опыт работы парокompрессионной *ТНУ* тепловой мощностью 1 МВт, разработанной Институтом теплофизики СО РАН. Её цикл представлен на рис. 1.4, а схема - на рис. 1.13.

Коэффициент преобразования энергии этой *ТНУ* зависит от температуры низкотемпературного источника теплоты следующим образом (табл. 1.1).

ПА-10 Пароэжекторный (струйный) тепловой насос

Недостатком компрессионных *ТНУ* является наличие компрессора, который вносит основной вклад в стоимость установки. Например, масса *ТНУ* мощностью 1 МВт составляет примерно 15 т, значительная доля которой приходится на компрессор и его привод (для привода компрессора нужна электрическая или механическая (например, от ДВС) энергия). В ряде случаев вместо «механических» компрессоров применяют струйные, фактически заменяя компрессор источником пара (паровым котлом) и эжектором [12].

Пар высокого давления вырабатывается в паровом котле *ПК* (или берётся из отбора турбины), с помощью эжектора *Э* эжектируется пар низкого давления из испарителя *И* (рис.7). В испарителе кипит вода при низком давлении P_n , соответствующем температуре низкотемпературного источника, от которого отбирается теплота $q_{н.}$, необходимая для образования пара.

В эжекторе этот пар сжимается до давления $P_{к.д.}$ помощью пара из парового котла. Смесь конденсируется в конденсаторе K_d . Выделяющаяся теплота q_n отдаётся потребителю. Далее поток конденсата разделяется. Часть его в количестве g долей килограмма подаётся конденсатным (питательным) насосом *Н* в котёл, а остальная часть $(1-g)$ дросселируется до давления P_n насыщения при температуре низкотемпературного источника и кипит в испарителе, забирая теплоту q_n .

В *TS*-диаграмме цикл для этой доли $(1-g)$ кг пара почти не отличается от обычного парокompрессионного. Условно изобразим его в виде *2143*, хотя чуть ниже будет видно, что сжатие в эжекторе линией 21 изображать вообще говоря, нельзя, т.к. оно сопровождается смешением с эжектирующим паром, т.е. неравновесным процессом. Теплота, забираемая в испарителе (в расчёте на 1 кг выходящего из эжектора пара), эквивалентна на рис.7. площади $(a32b)(1-g)$. Доля g воды после конденсатора нагревается (линия 45) и испаряется (линия 56) в котле *К*.

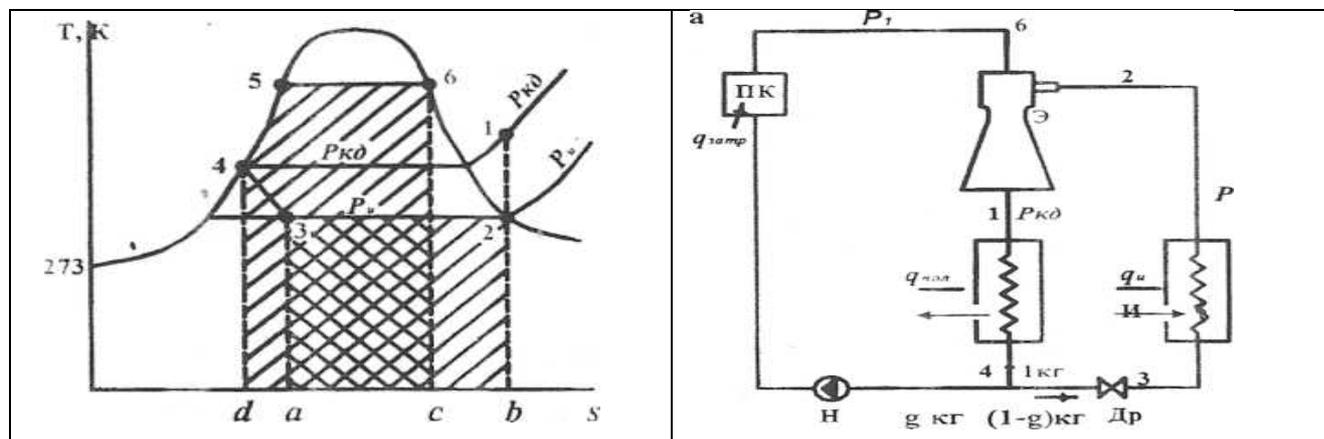


Рис.7. Схема пароэжекторной ГНУ (а) и изображение процессов в *T-S*-диаграмме(б)

При этом она получает теплоту $q_{нtr}$, эквивалентную площади $(d45bc)g$. Неравновесный процесс смешения двух потоков пара изобразить в *TS*- диаграмме нельзя, тем более, что *TS*-диаграмма строится для одного

килограмма пара, а при смешении надо учитывать их доли. Можно лишь указать состояния паров перед эжектором (точки 6 и 2). Состояние пара за эжектором (точка 1) и необходимое соотношение потоков пара g и $(1-g)$ определяются из расчёта эжектора. Подробности расчёта приведены в источнике [13].

Пароэжекторные *ТНУ* имеют невысокий *КПЭ* из-за низкой экономичности пароструйного компрессора (эжектора). Но в ряде случаев, например, в выпарных аппаратах его использование экономически целесообразно.

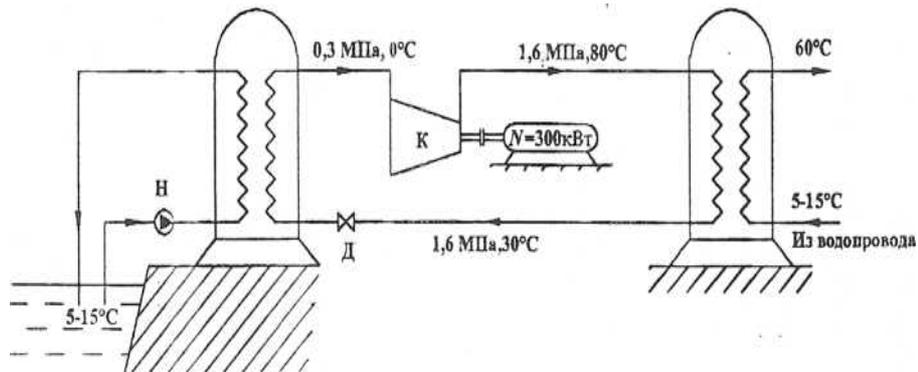


Рис. 1.13. Схема ТНУ для горячего водоснабжения Академгородка в г.Новосибирске

Таблица ПА-1 Зависимость КПЭ парокомпрессионной ТНУ от температуры

низкотемпературного источника

Температура низкотемпературного источника, °C	5	15	25	35	40
КПЭ	3,6	4,6	6	7,2	8

ТНУ на берегу Новосибирского водохранилища использует в качестве низкотемпературного источника речную воду с температурой 5°C (зимой) - 15°C (летом). Соответственно, *КПЭ*=3,6-4,6. По расчёту мощность электродвигателя для привода компрессора составляет $(\text{КПЭ})^{-1}=0,278$ МВт, с небольшим запасом поставлен двигатель мощностью 300 кВт.

Аналогичная *ТНУ* мощностью 1,2 МВт установлена на курорте «Бело- куриха» (недалеко от г.Бийска). Она забирает теплоту использованной родоновой воды с температурой 32°C из бальнеологических ванн и, соответственно, её *КПЭ*=7,2.

Примерно 77% установленных в Европе отопительных тепловых насосов используют в качестве низкотемпературного источника наружный воздух, как в описанном примере со зданием в Киеве. Часто стараются найти более тёплый низкотемпературный источник, например воду в водоёме (зимой она все же теплее, чем наружный воздух).

Наконец, широко распространено использование теплоты грунта, особенно для отопления отдельных коттеджей. В грунт на глубину 2,8 м (т.е. ниже глубины промерзания) закладывают в виде серпантина полиэтиленовые трубы Ø25...50 мм из расчёта примерно 20 погонных метров на 1 кВт мощности *ТНУ*.

Расстояние между трубами в серпантине- 2м. Среднегодовая температура грунта составляет +4...7°C, тепловой поток к жидкости в трубке от 10 до 50 ватт на погонный метр. Иногда трубы размещают в скважинах под зданием на большую глубину (десятки метров) во время сооружения фундамента.

Зимой теплоноситель, циркулирующий через эти трубы нагревается, забирая теплоту от грунта, грунт несколько охлаждается. Летом, теплоноситель, циркулирующий в трубах, охлаждается, отдавая теплоту грунту. Охлажденный теплоноситель используют для кондиционирования (охлаждения) воздуха в помещении, отключая тепловой насос. Такие схемы особенно выгодны, когда в грунте есть водонасыщенные пласты, имеющие большую теплоемкость и теплопроводность. Водонасыщенных пластов много в Голландии (часть ее территории расположена ниже уровня моря), поэтому там широко применяются такие схемы [13].

1.11 Приложение Б

(Справочное)

П1.11 Б-1. Экономия прежде всего

Тепловые насосы не относятся к дешёвому оборудованию. Затраты окупаются за счёт энергосбережения. Для дома площадью **150-180 м²** достаточно теплового насоса с отопительной мощностью **8-10 кВт** с компрессором (**2,5 кВт**).

Это не значит, что он будет работать круглосуточно. Зимой при температуре за окнами минус 15-20 °С насос будет автоматически включаться на **15-20** минут каждый час, чтобы поддерживать в помещении желаемую температуру. А летом в жару он будет, наоборот, охлаждать нагретый воздух, работая как кондиционер.

Потребность в горячей воде и отоплении может быть разной. Она зависит от числа членов семьи и от величины дома. При общей площади **250 м²** на все нужды достаточно теплового насоса с одним компрессором и со встроенным резервуаром на **340** литров воды. Необходимое количество воды возрастает, если в доме есть большая ванна-джакузи или бассейн. В этом случае необходим агрегат с дополнительным резервуаром для горячей воды.

П1.11 Б-2. Почему нужен термонасос?

Если централизованное теплоснабжение от Вас далеко, а Вам нужна теплота, то лучше отопительной системы на базе термонасоса вы не найдёте. Термонасос может брать теплоту из воздуха, вытягивать её из воды и высасывать из грунта.

Термонасос - это повседневная экономия энергозатрат и надёжность автоматизированной работы.

На каждый киловатт затраченной электроэнергии, вы имеете 3 киловатта теплоты, получаемой при помощи термонасоса, используемого для отопления и горячего водоснабжения.

Для краткости термонасос в техническом исполнении будем называть *тепловой насосной установкой (ТНУ)*.

П1.11 Б-3. Из чего состоит ТНУ?

Сердцевина его - испарительно-конденсаторная установка (*ИКУ*). Это в бытовом понимании холодильник наоборот, который обогревает вас, используя для своей работы теплоту низкопотенциального источника, при этом слегка его охлаждая.

Второй элемент - теплоотборник. Это механическое устройство, которое приспособлено для отбора низкопотенциальной теплоты из воздуха, из воды или из грунта.

Третьим элементом является аккумулятор теплоты. Это бак, в котором хранится и из которого раздаётся горячая вода для отопления и для технических (бытовых) нужд.

П1.11 Б-4. Как рассчитать требуемую для помещения мощность ТНУ?

1. Умножьте подлежащую отоплению площадь помещения на коэффициент $\kappa = 50-150 \text{ Вт/м}^2$ (этот коэффициент определяет нормативы тепловых потерь в помещениях и его величина зависит от степени их утепления).
2. В результате получите требуемую мощность ТНУ для вашего дома в ваттах.

П1.11 Б-5 Как рассчитать длину труб теплоотборника укладываемых в грунт?

1. Умножьте полученную требуемую мощность *ТНУ* в кВт на коэффициент **40 м/кВт** (выведен из практики). Получите длину труб в метрах.

П1.11 Б-6. Как рассчитать площадь земельного участка для укладки труб ?

1. Полученную длину труб теплоотборника, укладываемых в грунт умножьте на **0,4 м**. Получите площадь "укладки".
2. Если не удастся расположить "укладку" по периметру участка, тогда надо по участку "петлять". То есть укла-

дывать трубу петлями.

3. В одну траншею укладываются по две трубы - входящая и исходящая.

4. Расстояние между осями траншей должно быть не менее **2,0 м**.

П1.11 Б-7. Пример расчёта мощности потребного ТНУ.

Имеется дом (загородный дом типа коттеджа) площадью **200 м²**

1. Определяем требуемую мощность ТНУ.

Выбираем коэффициент теплопотерь - 50 Вт/м² (хорошее утепление).

$$T_m = 200 \times 50 = 10000 \text{ Вт} = 10 \text{ кВт.}$$

2. Определяем длину трубопровода.

$$D_1 = 10 \times 40 = 400 \text{ м}$$

3. Определяем площадь участка

$$S = 16 \times 20 = 320 \text{ м}^2$$

Б-8 Источники к приложениям А и Б

- 1.ГОСТ 7.9-95 (ИСО 214-76).
- 2.СТП ННГАСУ 1-98-7 «Реферат»
- 3.СНиП 2.04.05-91* Отопление, вентиляция и кондиционирование.
- 4.СТП ННГАСУ 1-1-98; СТП ННГАСУ 1-2-98; СТП ННГАСУ 1-3-98; СТП ННГАСУ 1-4-98; СТП ННГАСУ 1-5-98; СТП ННГАСУ 1-6-98.
- 5.Калинин М.И., Хахаев Б.Н., Кудрявцев Е.П. Эффективное использование приповерхностных геотермальных ресурсов в геолого-климатических условиях центральных регионов России // Вестник Ярославского регионального отделения РАЕН. - 2007. - том 1, №1. - С. 20-26.
- 6.Богуславский Э.И., Певзнер Л.А., Хахаев Б.Н. Перспективы развития геотермальной технологии // Разведка и охрана недр. - 2000. - № 7-8. - с. 43- 48.
- 7.Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли / монография. - М.: Издательский дом "Граница", 2006. - 176 с.
- 8.Ground Source Heat Pumps - Geothermal Energy for Anyone, Anywhere: Current Worldwide Activity. / Curtis R., Lund J., Sanner B., Rybach L., Hellstrom G. // Proceedings World Geothermal Congress 2005; 24-29 April 2005 Antalya, Turkey. - Antalya, Turkey, 2005. - 9 p.
- 9.Rybach L, Sanner B. Ground-Source Heat Pump Systems the European Experience // Geo-Heat Center Quarterly Bulletin. - 2000. - Vol. 21, №1. - P.16- 26.
- 10.Sanner B., Kohlsch. Examples of Ground Source Heat Pumps (GSHP) from Germany // International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy. - Bad Urach, 2001. - P. 81-94.
- 11.Васильев Г.П. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России// АВОК. - 2007. -№5.-С. 22-27.
- 12.Калинин М.И., Баранов А.В, Метод расчета глубинных теплообменников для односкважинной технологии геотермального теплоснабжения. // Разведка и охрана недр. - 2003. - №6. - С. 53-60.
- 13.Eskilson P. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes I I Dissertation Lund - MPH - 87/13. - University of Lund, Lund, 1987. - 264 p.
- 14.Калинин М И., Кудрявцев Е П., Баранов А В. Методы расчета и рекомендации по эффективному использованию приповерхностных геотермальных ресурсов в центральных регионах России // Новости теплоснабжения. -2007. - № 10.- С. 26 - 33.
- 15.Виссманн-больше, чем тепло. Новинки 2005 года / Viessmann ООО, Moskau-www.viessmann.ru.
- 16.Калинин М.И., Хахаев Б.Н., Баранов А.В. Геотермальное теплоснабжение центральных регионов России с использованием мелких и глубоких скважин // Электрика. - 2004. -№4, - С. 8-13.
- 17.Пат. 2292000 Российской Федерации. Устройство для энергообеспечения помещений с использованием низкопотенциальных энергоносителей / Калинин М.И., Кудрявцев Е.П.; опубл. 2007; БИ №2.
- 18.Наумов А. Л. МИНИ-ТЭЦ - очередной бум или объективная потребность отечественной энергетики // АВОК. - 2005. - № 7. - С. 22-27.
- 19.Калинин М.И., Кудрявцев Е.П. Энергообеспечение регионов России с использованием ресурсов приповерхностной геотермии и грунтовых тепловых насосов // Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы: Материалы Междунар. конф. -- Махачкала, Инс-т проблем геотермии ДНЦ РАН, 2005. - Том 1. - С. 144-153.
- 20.Делягин Г.Н., Лебедев В.И. Теплогенерирующие установки: Учеб. для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: ООО «ИД «БАСТЕТ»», 2010. - 624
- 21.БаскаковА.П.Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие в 2-х частях.ч.1/А.П.Баскаков. Екатеринбург: УГТУ,2008.-114с.:ил.

Климов Геннадий Матвеевич
Цой Евгений Николаевич
Климов Михаил Геннадьевич

**Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии для
получения теплоты в системах теплоснабжения: использование с применением тепловых насосов**

Методическая разработка для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 140104.65 Промыш-
ленная теплоэнергетика и 270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция

Подписано в печать _____ Формат 60x90 1/8 Бумага газетная. Печать трафаретная.

Уч. изд.л 4,8. Тираж 300 экз.Заказ №_____

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
603950, Н.Новгород, Ильинская, 65. Полиграфцентр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65.